

M E T O D A

Metodą, która stwarza możliwość przekroczenia tych przeszkód i uniezależnienia się od czynników przyrodniczych, jest modelowanie. Ten kierunek badań geomorfologicznych w Polsce nie doczekał się szerokiego upowszechnienia. Poza nielicznymi pracami o charakterze metodycznym i aplikacyjnym (m.in. Fedorowicz-Jackowski 1988; Gliński, Dębicki 1999, 2000) istnieje na tym polu poważna luka.

Dostrzegając prawidłowości rządzące procesami spłukiwania (nazywane też „erozją wodną gleb”), a zwłaszcza wpływ poszczególnych elementów środowiska (warunki meteorologiczno-klimatyczne, rzeźba, budowa geologiczna, roślinność i inne), podjęto badania (m.in. Zingg 1940; Musgrave 1947; Smith 1961; Wischmeier, Smith 1965) mające na celu ustalenie zależności empirycznych (równań) pomiędzy intensywnością procesów a warunkującymi je czynnikami. Drugim, nowoczesnym podejściem w badaniach modelowych jest kierunek deterministyczny. Jest on obecnie rozwijany przez zespoły interdyscyplinarne, w skład których wchodzi między innymi geografowie, przedstawiciele nauk rolniczych, fizycy i informatycy. W tym podejściu główny nacisk kładzie się na mechanizmy rządzące procesami spłukiwania i depozycji oraz na ich poznanie i opisanie przy użyciu formuł matematyczno-fizycznych. Eksperyment polowy jest ciągle istotnym ogniwem procesu badawczego, ale przy podejściu deterministycznym służy on, poprzez dostarczenie danych ilościowych, do weryfikacji przyjętych założeń teoretycznych. Procesy geomorfologiczne rozpatrywane są w skali zlewni, w trakcie pojedynczego opadu (*single event*).

Badania nad modelami deterministycznymi stały się możliwe dzięki zastosowaniu technik komputerowych, a w szczególności programów z grupy GIS (*Geographical Information Systems*). Modele deterministyczne mają charakter systemów symulacyjnych, gdzie wszystkie obliczenia wykonywane są przez komputer. Daje to możliwość analizy dużej liczby dowolnych wariantów, a wizualizacja wyników odbywa się w sposób półautomatyczny. W ten sposób modelowanie staje się rozwinięciem badań terenowych. Jest to szczególnie przydatne w badaniach zjawisk ekstremalnych, o powtarzalności rzędu kilkudziesięciu lat.

Obecnie spośród istniejących modeli deterministycznych najlepszy do stosowania w badaniach nad rozwojem rzeźby geokośmosystemu dolin lessowych wydaje się model LISEM (*Limburg Soil Erosion Model*; De Roo, Wesseling 1996).

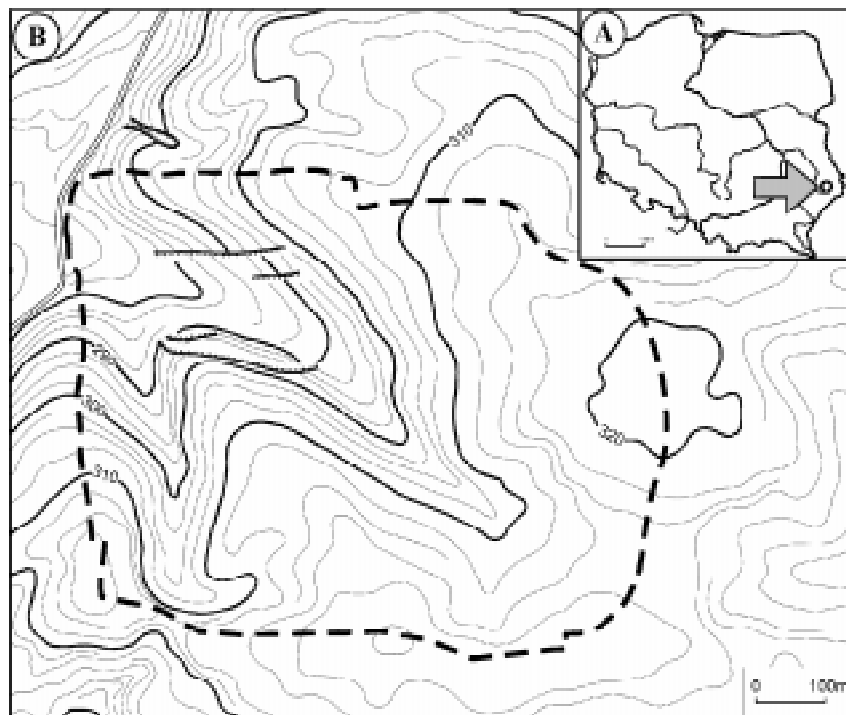
Wyniki uzyskiwane metodą modelowania i zestawione z obserwacjami terenowymi są zwykle zbliżone. Mimo że stosowanie modeli empirycznych i deterministycznych dostarcza dokładnych danych ilościowych o przebiegu i skutkach procesów geomorfologicznych, nie jest i prawdopodobnie nie będzie w stanie zastąpić badań terenowych. Tak więc przyszłość badań z zakresu geomorfologii

dynamicznej leży w połączeniu badań modelowych i obserwacji terenowych (Gawrysiak 2003).

Niniejsze opracowanie jest próbą integracji metody symulacji komputerowych i klasycznych badań geomorfologicznych. Materiały i wyniki uzyskane w trakcie badań terenowych geomorfologicznych skutków pojedynczej ulewy w dniu 15 czerwca 2000 r. posłużyły do przeprowadzenia modelowania tego zdarzenia.

BADANIA TERENOWE

Badaniami objęto zlewnię suchej doliny lessowej położonej na gruntach wsi Dąbrowa Krynicka, w dorzeczu górnego Wieprza we wschodniej części Roztocza Tomaszowskiego (ryc. 1A). Zlewnia ma powierzchnię 50 hektarów i jest w ok. 90% użytkowana jako grunty orne. Rolniczy charakter zlewni sprzyja intensyfikacji procesów morfogenetycznych i ułatwia obserwację ich skutków geomorfologicznych. W jej skład wchodzi dwie doliny, mające wspólne ujście do doliny niższego rzędu (ryc. 1B).



Ryc. 1. Położenie (A) oraz hipsometria badanej zlewni (B)
Location (A) and hipsometry of the studied catchment (B)

Opad o charakterze burzowym w rejonie Dąbrowy Krynickiej miał miejsce w dniu 15 czerwca 2000 r. w godzinach 15.05–15.15. Wysokość opadu zmierzono w trzech punktach zlokalizowanych w ujściowym odcinku doliny. W ciągu 10 minut spadło 10 mm deszczu, a jego intensywność wyniosła średnio 1 mm/min. Gwałtowny spływ wywołany tym opadem, mimo jego niewielkiej wysokości, był skutkiem specyficznych warunków, jakie panowały w zlewni w momencie jego wystąpienia. Opady burzowe, które wystąpiły dwukrotnie w pierwszej połowie czerwca (w nocy z 6 na 7 oraz z 14 na 15 czerwca), wywołały skutki morfologiczne w postaci bruzd i koryt epizodycznych. W trakcie opadu w dniu 15 czerwca doszło do szybkiej koncentracji spływu w obrębie istniejących już form. Drugim czynnikiem, który istotnie przyspieszył spływ, było silne nasycenie gleby wodą, które nastąpiło po opadzie nocnym (z 14 na 15 czerwca).

W drugiej dekadzie czerwca rośliny uprawne znajdują się w różnych fazach rozwoju. Najlepiej rozwinięte są zboża, których wysokość w tym okresie dochodzi do 50 cm. Gęsto rosnące rośliny mają rozbudowane systemy korzeniowe, które dobrze chronią glebę przed erozją rozbryzgową i splukiwaniem. Natomiast rośliny okopowe w tym okresie nie osiągają jeszcze nawet połowy wzrostu. W związku z tym gleba na polach z tymi uprawami jest chroniona przed erozją tylko w niewielkim stopniu.

W opisywanym okresie (druga dekada czerwca) 90,14% powierzchni zlewni stanowiły grunty orne, w tym 73,48% zboża i 16,66% rośliny okopowe (tab. 1). Użytki zielone (łąki kośne i pastwiska) zajmowały 6,72% powierzchni, a lasy 3,14%. Rozmieszczenie poszczególnych typów upraw, układ działek w zlewni oraz kierunek orki, zwykle równoległy do stoku, ułatwiały szybki spływ (ryc. 2). Jedynie w górnym odcinku doliny głównej znajdowały się użytki zielone, co mogło sprzyjać retencji i spowalniać spływ. Niewielkie powierzchnie zadarnione znajdują się również w jej ujściowym odcinku, gdzie wystąpiła intensywna akumulacja osadów deluwialnych.

Tab. 1. Typy użytków i ich udział w ogólnej powierzchni badanej zlewni w czerwcu 2000 r.
Types of plants and their area in the studied catchment in June 2000

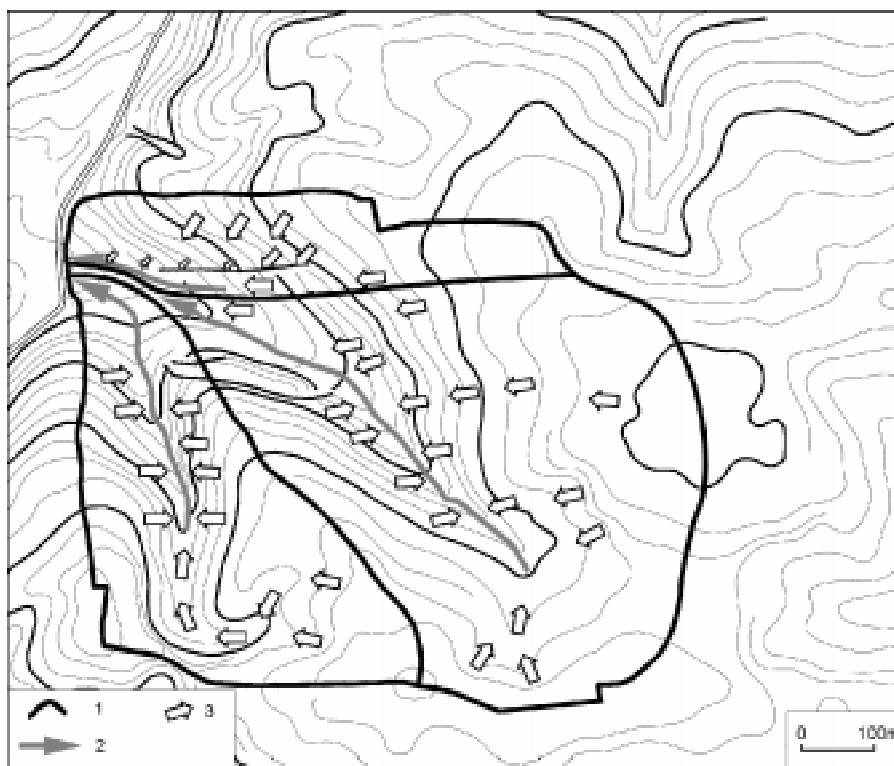
Typ użytków	Powierzchnia (ha)	Udział w powierzchni zlewni (%)
Zboża	37,47	73,48
Okopowe	8,49	16,66
Użytki zielone	3,43	6,72
Las	1,60	3,14

Zwarta roślinność zielna wyhamowała procesy erozji i nie spowodowała wyraźnych zmian w rzeźbie. Stwierdzono jedynie nieznaczne pogłębienie już istniejących koryt transportowo-erozyjnych i kotłów eworsyjnych oraz powstanie niewielkich żłobin na polach z roślinnością okopową. Rozwój form erozyjnych przebiegał ściśle w powiązaniu z odpornością podłoża oraz układem pól i kierun-

kiem orki. Na polach, gdzie poziom iluwalny gleby występuje dosyć płytko, bruzdy erozyjne po osiągnięciu jego stropu zaczynały się poszerzać. Natomiast na polach z mięszką pokrywą deluwiów utworzyły się głębsze bruzdy erozyjne. Obok spłukiwania skoncentrowanego dość powszechne były również ślady spłukiwania rozproszonego, zarówno wśród zbóż, jak i roślin okopowych. Na polach z trwałymi użytkami zielonymi brak było jakichkolwiek śladów erozji.

W dolnym odcinku doliny, podpartym przez drogę utwardzoną, istniały warunki sprzyjające akumulacji. W tej strefie uformował się rozległy stożek napływowy, który w końcowej fazie sylvu uległ nieznacznemu rozcięciu. Ponadto stwierdzono powstanie cienkich pokryw akumulacyjnych w dnach koryt epizodycznych oraz na polach z roślinnością okopową, pomiędzy rządkami upraw.

Podstawą do obliczenia denudacji mechanicznej wyzwolonej opadem były pomiary hydrometryczne prowadzone w ujściowym odcinku doliny. Wskutek wcześniejszego nasycenia podłoża wodą opad wywołał prawie natychmiast sylv



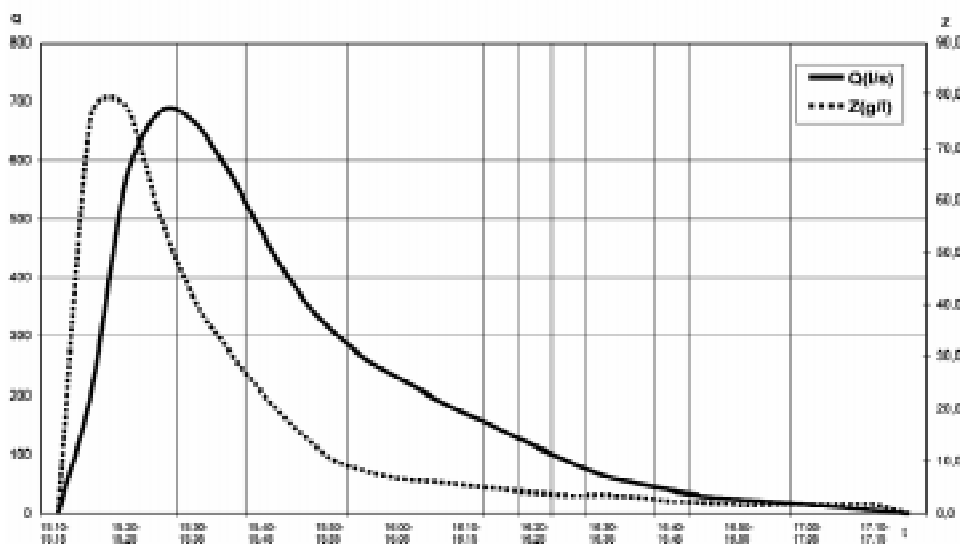
Ryc. 2. Granice zlewni cząstkowych oraz główne kierunki sylvu w czasie opadu w dniu 15.06.2000 r. (1 – granice zlewni, 2 – kierunki sylvu w dnach dolin głównych, 3 – kierunek sylvu na stokach)
Borders of subcatchments and main directions of flow during rainfall on 15.06.2000 (1 – borders of catchment, 2 – directions of flow in bottoms of main valleys, 3 – directions of flow on slopes)

powierzchniowy, który trwał około 2 godzin. Spływająca woda wykorzystwała istniejące koryta erozyjne oraz uformowała nowe o charakterze transportowym. Sieć koryt łączyła się w dolnej części zlewni w 3 koryta główne, którymi następował odpływ poza zlewnię przez przepust pod drogą (ryc. 2). W końcowych odcinkach koryt głównych prowadzono rejestrację prędkości przepływu (metodą pływakową) oraz pobierano próby wody w celu określenia ładunku zawiesiny. Pomiary trwały przez cały okres spływu, aż do momentu jego ustania.

W kilka dni po opisywanej ulewie przeprowadzono kartowanie upraw oraz zmierzono położenie bruzd i koryt epizodycznych. Na podstawie rozmieszczenia świeżych form erozyjnych zrekonstruowano linie i kierunki spływu oraz wyznaczono zasięg zlewni cząstkowych, dla których w czasie ulewy wykonywane były pomiary.

Na podstawie danych z pomiarów hydrometrycznych obliczono średnie przepływy oraz zmaczenie dla poszczególnych faz spływu (ryc. 3). Opad trwał 10 minut – rozpoczął się o godz. 15.05 i zakończył o 15.15. Odpływ poza zlewnię rozpoczął się o godzinie 15.15. W trakcie całego spływu, trwającego od godziny 15.15 do 17.15, poza zlewnię zostało odprowadzone 51,8 t materiału oraz odpłynęło 1605,3 m³ wody, co stanowi 32,1% opadu. Pozostała część opadu przypada na intercepcję, infiltrację i mikroretencję. Kubatura wyniesionego materiału, w przeliczeniu na całą zlewnię, dałaby warstwę o miąższości 0,068 mm.

Kształtowanie się przepływu oraz zmaczenia można uznać za typowe dla krótkotrwałych wezbrań spowodowanych gwałtownymi opadami. Odpływ poza zlewnię



Ryc. 3. Kształtowanie się przepływu (Q) oraz zmacnienia (Z) w poszczególnych fazach spływu po opadzie w dniu 15.06.2000 r.

Chart of flow (Q) and sediment concentration (Z) in stages of outflow after rainfall on 15.06.2000

rozpoczął się w momencie ustania opadu. Fala wezbraniowa uformowała się w dnie doliny po upływie około 10 minut. W pierwszej fazie – około 15 minut od momentu rozpoczęcia odpływu – zmaczenie osiągnęło najwyższą wartość (78 g/l). Największy przepływ (683 l/s) wystąpił w 5 minut po kulminacji zmaczenia. Po krótko trwających maximach przepływu i zmaczenia rozpoczął się powolny spadek, przy czym zmaczenie zmniejszało się znacznie szybciej niż przepływ (ryc. 3).

SYMULACJE KOMPUTEROWE

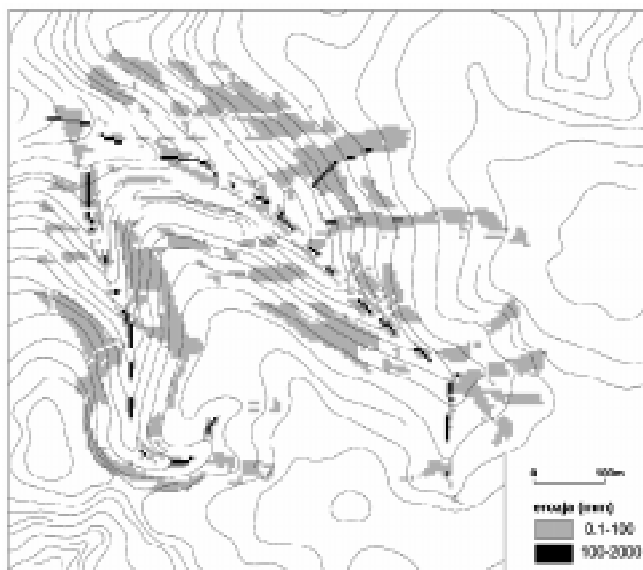
Do wykonania symulacji opisywanego opadu przygotowano mapy cyfrowe charakteryzujące stan zlewni (numeryczny model terenu, użytkowanie, właściwości pokrywy glebowej i inne) w oparciu o mapy topograficzne, wyniki kartowania oraz analizy laboratoryjne (Gawrysiak 2003). Nieznana była wilgotność początkowa gleby w początkowej fazie opadu, wobec tego przyjęto założenie, że gleba po nocnych opadach burzowych była silnie uwilgotniona. Na tej podstawie przyjęto, że wilgotność początkowa gleby była na poziomie $pF = 1,0$ (gleba bliska całkowitego nasycenia). Symulacje przeprowadzono z wykorzystaniem modelu LISEM, stosując procedury zalecane przez autorów (De Roo, Wessling 1996). Wynikiem symulacji są wskaźniki ilościowe (tab. 2 i 3) oraz mapy charakteryzujące przestrzenne zróżnicowanie natężenia spłukiwania i akumulacji w zlewni (ryc. 4A i 4B).

Tab. 2. Wskaźniki charakteryzujące natężenie procesów geomorfologicznych dla całej zlewni – wynik symulacji dla ulewy z 15.06.2000 r.
Indices characterizing the intensity of geomorphological processes in the whole catchment – results of simulation for rainfall on 15.06.2000

Wysokość/czas opadu	10 mm/10 min
Erozja rozbryzgowa	2,6 t
Spłukiwanie	276,3 t
Depozycja w zlewni	228,1 t
Całkowity odpływ materiału poza zlewnię	50,8 t
Średnia strata gleby	1,06 t/ha
Średni zmyw	0,07 mm

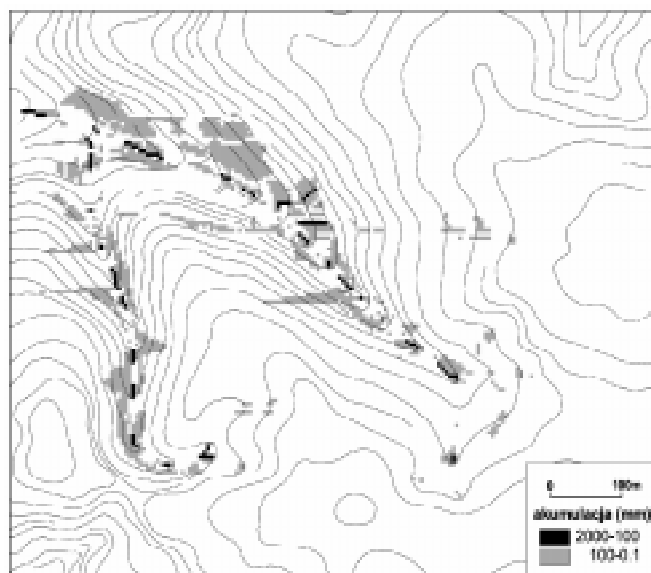
Tab. 3. Zróżnicowanie wskaźników erozji i akumulacji w obrębie głównych elementów rzeźby badanej zlewni – wyniki symulacji dla ulewy z 15.06.2000 r.
Differentiation of indices of erosion and deposition inside main elements of relief in the studied catchment – results of simulation for rainfall on 15.06.2000

Element rzeźby	Maksymalna depozycja		Maksymalna erozja		Średnia strata gleby (t/ha)	Średni zmyw (mm)
	(t/ha)	(mm)	(t/ha)	(mm)		
Wierzchowiny	8	0,53	28	1,87	0,0091	0,0006
Skłony wierzchowin	41	2,73	45	3,00	0,0523	0,0035
Stoki	338	22,53	242	16,13	+0,2849	+0,0190
Niecki	307	20,47	367	24,47	8,4910	0,5661
Dna dolin	3766	251,07	1312	87,47	4,0125	0,2675



Ryc. 4A. Symulowany rozkład stref splukiwania rozproszonego i skoncentrowanego w badanej zlewni po opadzie z 15.06.2000 r.

Simulated zones of dispersed and concentrated washing in the studied catchment after rainfall on 15.06.2000



Ryc. 4B. Symulowany rozkład stref akumulacji deluwialnej w badanej zlewni po opadzie z 15.06.2000 r.

Simulated zones of deluvial accumulation in the studied catchment after rainfall on 15.06.2000

WYNIKI I WNIOSKI

Rozmieszczenie stref spłukiwania i depozycji materiału deluwialnego wykazuje wyraźny związek z głównymi elementami rzeźby (ryc. 4A, 4B).

Strefą o najniższych wskaźnikach spłukiwania (do 1,87 mm) i depozycji (do 0,53 mm) jest poziom wierzchowinowy, gdzie średni wskaźnik erozji osiągnął zaledwie 0,0006 mm (tab. 3).

Niskim wskaźnikiem spłukiwania (do 3,0 mm) i depozycji (do 2,73 mm) charakteryzują się skłony wierzchowin i górne odcinki stoków, gdzie średni wskaźnik erozji wyniósł – 0,0035 mm.

Na stokach, mimo znacznego zróżnicowania natężenia procesów (spłukiwanie do 16,13 mm, depozycja do 22,53 mm), przeważa akumulacja nad spłukiwaniem, co w sumie daje przyrost równy 0,019 mm. Na tej podstawie można wnioskować, że w przypadku krótkiego i niezbyt intensywnego opadu (10 mm w ciągu 10 minut) ma miejsce wygasanie transportu poprzecznego w dolnych odcinkach stoków (depozycja w zlewni osiąga 228,1 t, co stanowi aż 82,5% całkowitej erozji). Rozmieszczenie tych powierzchni w obrębie stoków jest dość nierównomierne. Powierzchnie erodowane występują zwykle w środkowych odcinkach stoków, a depozycja w odcinkach dolnych. Bardzo często pomiędzy tymi obszarami występują znaczne powierzchnie bez erozji.

Dolinki nieckowate cechuje najwyższy średni wskaźnik denudacji, wynoszący 0,5661 mm, co świadczyłoby, że są to powierzchnie najsilniej przekształcane w czasie tego typu opadów. Mimo niewiele wyższych wartości ekstremalnych niż dla stoków (erozja do 24,47 mm i depozycja do 20,47 mm) erozja jest tutaj procesem dominującym. W profilu podłużnym dolinek nieckowatych ma miejsce wyraźne zróżnicowanie intensywności i jakości procesów – w górnych odcinkach nieckek brakuje erozji, w środkowych jest bardzo silna, a w dolnych przeważa akumulacja nad spłukiwaniem.

Dna głównych dolin charakteryzują najwyższe wartości wskaźników erozji i akumulacji. Erozja osiąga tu do 87,47 mm, a depozycja do 251 mm. W obrębie dna doliny występują również powierzchnie, gdzie erozja jest równoważona przez akumulację. Tylko w liniach spływu (korytach epizodycznych) dochodzi do przekształceń rzeźby. W niektórych odcinkach doliny występuje tylko depozycja, prawdopodobnie związana z transportem poprzecznym i wygasaniem erozji w transporcie podłużnym (ryc. 4B). Średni wskaźnik denudacji dla den dolin jest ujemny i wynosi –0,6019 mm, co oznacza, że przeważa tu wynoszenie materiału nad jego akumulacją.

Symulowany całkowity odpływ materiału poza zlewnię (50,8 t) jest bardzo zbliżony do obserwowanego (51,8 t). Istnieją jednak pewne różnice oraz zagadnienia trudne do oceny, na które należy zwrócić uwagę.

Ocena wiarygodności symulowanej wielkości erozji rozbryzgowej oraz depozycji w zlewni jest bardzo trudna. Niska wartość erozji rozbryzgowej (2,6 t, co

stanowi zaledwie 5,1% masy materiału odprowadzonego poza zlewnię) wydaje się prawdopodobna, gdyż był to okres, kiedy uprawy dobrze chroniły podłoże. Wysoka wartość symulowanej depozycji w zlewni (228,1 t) jest trudna do weryfikacji z uwagi na brak danych terenowych w tym zakresie.

Intensywna erozja w dnach dolinek nieckowatych i dolin głównych jest zgodna z obserwacjami terenowymi, gdzie stwierdzono rozwój głębokich bruzd i koryt, z których prawdopodobnie pochodziła większa część materiału wyniesionego poza zlewnię. Symulowany rozkład rozcięć erozyjnych nie jest tak dokładny jak form obserwowanych w terenie. Wiąże się to prawdopodobnie z dokładnością numerycznego modelu terenu (DEM) użytego w symulacjach. Jego rozdzielczość (5 x 5 m) nie pozwala na odwzorowanie mikroform (miedze, bruzdy po orce, rzędy upraw itp.), które odgrywają istotną rolę w formowaniu się spływu powierzchniowego na stokach.

Przeprowadzone badania terenowe oraz symulacja komputerowa wykazały, że istnieje możliwość integracji obydwu metod. Jakkolwiek rysują się pewne rozbieżności w przestrzennym rozkładzie form obserwowanych i symulowanych, to otrzymane wyniki można uznać za zadowalające i zachęcające do dalszych badań w tym zakresie.

LITERATURA

- Buraczyński J., Wojtanowicz J. 1971: Przebieg i skutki gwałtownej ulewy w Dzierzkowicach na Wyżynie Lubelskiej. Biuletyn Lubelskiego Towarzystwa Naukowego, sec. D, 12.
- De Roo A. P. J., Wesseling C. G. 1996: LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I. Theory, Input and Output, Hydrological Processes, 10.
- Fedorowicz-Jackowski W. 1988: Wyznaczanie obszarów o zróżnicowanym stopniu zagrożenia erozyjnego na podstawie zintegrowanych danych teledetekcyjnych i konwencjonalnych (maszynopis pracy doktorskiej). Zakład Geomorfologii UMCS, Lublin.
- Gawrysiak L. 2003: Współczesna ewolucja suchych dolin lessowych w świetle badań terenowych i symulacji komputerowych (maszynopis pracy doktorskiej). Zakład Geomorfologii, INoZ UMCS.
- Gliński P., Dębicki R. 1999: Degradacja gleb lessowych na przykładzie zlewni Ciemięgi. [W:] Procesy degradacji gleb i metody ich rekultywacji. Acta Agrophysica 23, Lublin.
- Gliński P., Dębicki R. 2000: Ocena zagrożeń erozyjnych oraz charakterystyka jakości wód przy zastosowaniu symulacji komputerowej. Acta Agrophysica 36, Lublin.
- Janicki G., Zagórski P., Gawrysiak L. 2002: Rozwój rzeźby terenu w wyniku gwałtownego opadu w strefie północnej krawędzi Grzędy Sokalskiej. Annales UMCS, sec. B, 54.
- Janicki G., Zglobicki W. 1998b: Geomorfologiczne skutki ulewy (z 16 września 1995 r.) w okolicy Garbowa na Wyżynie Lubelskiej. Annales UMCS, sec. B, 53.
- Maruszczak H., Trembaczowski J. 1958: Geomorfologiczne skutki gwałtownej ulewy w Piaskach Szlacheckich koło Krasnegostawu. Annales UMCS, sec. B, 11.
- Musgrave G. W. 1947: The Quantative Evaluation of Factors in Water Erosion, a First Approximation. Journ. Soil and Water Conserv., 2.

- Rodzic J. 1984: Natężenie współczesnej denudacji w silnie urzeźbionym terenie lessowym w okolicy Kazimierza Dolnego. [W:] Przewodnik Ogólnopolskiego Zjazdu PTG. Lublin, 13–15 IX1984, cz. 2.
- Smith D. D. 1961: A Universal Soil-Loss Estimating Equation to Guide Conservation Farm Planning. 7th Cong. Internat. Soil Sci. Soc. Trans., V, 1.
- Wischmeier W. H., Smith D. D. 1965: Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains, Guide for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No 282, Washington.
- Ziemnicki S. 1956: Skutki deszczu nawalnego we wsi Piaski Szlacheckie pod Krasnymstawem. *Gospodarka Wodna*, 16, 11.
- Ziemnicki S., Repelewska-Pękłowa J. 1975: Studium geomorfologiczne wąwozu lessowego (Dzierzkowice-Góry, Wyżyna Lubelska). *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 170.
- Zingg A. W. 1940: Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. *Agriculture Engineering*, 21.

SUMMARY

Investigations of geomorphological effects of rainfalls in small dry catchments are carried with traditional geomorphological mapping. It gives possibility to estimate the role of morphological factors and to describe qualitative effects of processes. Quantitative data (volume of newly developed forms and material discharged out of catchment) usually are not accurate. Another limitation is the necessity to carry out investigations only in regions where rainfalls took place and scientists could not choose their intensity.

Simulations (computer modelling) is the method which gives possibility to overcome these limitations. Older (empirical) and modern (deterministic) models give possibility to choose parameters for simulation so it is possible to test several scenarios. Data from field investigations are used to test and verify the results of simulations.

In this paper the author tried to simulate rainfall which was previously investigated in field using mapping method. Hydrometric method was used to estimate the volume of material discharged out of catchment. Modelling was made using the LISEM model, which was built and had been tested for loess areas.

Results of mapping and computer simulations are usually similar, but some differences are observed. Field investigations (mapping) give better possibility to make qualitative description of geomorphological results of rainfall. Simulations are better to determine the zones of erosion and deposition in catchment and give quantitative data about processes.

Combination of the results of these two methods (mapping and modelling) used to describe geomorphological results of rainfall shows that computer simulations give possibility to extend investigations on single events (rainfalls).