

CYFROWY MODEL ZLEWNI JAKO PODSTAWA DO PLANOWANIA MELIORACJI PRZECIWEROWYJNYCH W ZLEWNIACH ROLNICZYCH

Rafał Wawer

Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów
Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
e-mail: huwer@iung.pulawy.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań nad pozyskiwaniem danych przestrzennych, zastosowaniem analiz przestrzennych i modelowania przestrzennego dla celów precyzyjnego wyznaczania lokalizacji i zasięgów melioracji przeciwerozyjnych. W oparciu o dane analogowe utworzono Cyfrowy Model Zlewni, na którym przeprowadzono analizy przestrzenne: układu dróg rolniczych i użytków w rzeźbie terenu, pilności utwardzania dróg oraz jakościowych wskaźników erozji wodnej. Ponadto przeprowadzono modelowanie stateczności stoków w modelu SINMAP oraz erozji wodnej powierzchniowej w modelu EROSION 3D. Na podstawie wyników badań przestrzennych opracowano cyfrową mapę zalecanych zabiegów przeciwerozyjnych, uwzględniając pilność ich wprowadzenia. Cyfrowy Model Zlewni może służyć jako podstawa systemu wspierania decyzji na szczeblu samorządów i RZGW w zakresie rozpoznania i zapobiegania erozji wodnej i ruchom masowym.

Słowa kluczowe: modelowanie przestrzenne, GIS, melioracje przeciwerozyjne

WSTĘP

Badania erozyjne prowadzono do niedawna przy pomocy żmudnych technik, stosowanych zarówno w badaniach kameralnych jak i terenowych, określanych umownie jako „analogowe”. Słabą stroną tych technik była duża czasochłonność oraz ograniczona liczba zmiennych, wymuszające wąski zakres analiz. Wraz z postępującą informatyzacją badań naukowych oraz pojawieniem się technologii Systemów Informatyki Geograficznej (GIS) otworzyły się nowe możliwości techniczne i analityczne o prawie nieograniczonym zakresie zastosowań teoretycznych i praktycznych.

Przewaga systemów GIS, jako narzędzi wspierania decyzji nad tradycyjnymi opracowaniami wynika z możliwości bieżącej oceny zmian zachodzących w przestrzeni, wykonywanej w sposób zautomatyzowany. Bazy danych i narzędzia GIS

umożliwiają dokonywanie analiz i symulacji, których wyniki są w sposób automatyczny przedstawiane w postaci odpowiednich map tematycznych obrazujących odpowiedź na pytanie użytkownika.

Nowoczesne podejście do przeciwoerozyjnego kształtowania krajobrazu, szczególnie na obszarach, gdzie podlega on ochronie, wymaga minimalnej ingerencji środków technicznych oraz zrównoważonych, zachowawczych melioracji przeciwoerozyjnych. W związku z tym najistotniejszym zagadnieniem jest precyzyjne określenie obszarów koniecznej ingerencji.

Celem pracy było utworzenie systemu informacji przestrzennej o rolniczej przestrzeni produkcyjnej dla precyzyjnego wyznaczania zasięgów zabiegów przeciwdziałających erozji wodnej i ruchom masowym na obszarze lessowej zlewni wyżynnej. Bazę danych dla tego systemu stanowi Cyfrowy Model Zlewni (CMZ) agregujący cyfrowe dane przestrzenne, otrzymane w wyniku digitalizacji dostępnych danych analogowych.

MATERIAŁY I METODY

Obszar badań

Badania przeprowadzono w latach 1999-2004 na obszarze wyżynnej zlewni potoku Grodarz. Górna część dorzecza Grodarza leży na Równinie Bełżyckiej, a środkowa i dolna na Płaskowyżu Nałęczowskim [8]. Większa część zlewni znajduje się w granicach Kazimierskiego Parku Krajobrazowego.

Rzeźba zlewni Grodarza jest zróżnicowana głównie dzięki odrębności pokrywowych utworów geologicznych, które uwarunkowały rozwój odmiennych form geomorfologicznych. Obszar bezlessowy Równiny Bełżyckiej, wchodzący w skład zlewni, charakteryzuje się mało urozmaiconą rzeźbą, niewielkimi nachyleniami i obecnością zespołu form wydmowych. Obszary lessowe zlewni (Płaskowyż Nałęczowski) charakteryzują się silnie urozmaiconą rzeźbą i mikrorzeźbą terenu oraz dużymi nachyleniami zboczy.

Zlewnia jest w większości użytkowana rolniczo. Duży udział mają zalesienia, występujące zwłaszcza w bezpośredniej bliskości wąwozów i na stromych stokach. Stosunkowo niewiele jest użytków zielonych i sadów. Układ użytków wykazuje charakterystyczne cechy szachownicy.

Dane źródłowe

Podstawę do analiz przestrzennych zlewni potoku Grodarz stanowił Cyfrowy Model Zlewni, składający się z różnych grup warstw przestrzennych utworzonych poprzez digitalizację i obróbkę cyfrową danych analogowych:

1. Mapy topograficznej w skali 1:10 000 z 1999 r.;
2. Mapy glebowo-rolniczej w skali 1:25 000 z 1962 r., uzupełnionej o pomiary terenowe i analizy laboratoryjne;
3. Zdjęć lotniczych z nalotu z maja 1996 r., w skali 1:26 000 o cyfrowej rozdzielczości 1 m;
4. Mapy inwentaryzacji przyrodniczej gminy Kazimierz Dolny i gminy Karczmiska wg Wilgata z 1991 r. [11].

Warstwy przestrzenne CMZ podzielono pod względem tematycznym na 6 grup:

1. Warstwy informacji o rzeźbie terenu w postaci zdigitalizowanych warstw i punktów wysokościowych oraz rastrowej warstwy Cyfrowego Modelu Terenu o rozdzielczości 10 m otrzymanej poprzez interpolację warstw metodą TOPOGRID w systemie ARC/INFO wraz z warstwami pochodnymi: spadków i wystawy stoków;
2. Warstwy informacji o pokrywie glebowej w postaci zdigitalizowanych konturów mapy glebowo-rolniczej z bazą danych charakterystyki gleb;
3. Warstwa informacji o użytkowaniu terenu w podziale na 5 klas: użytki orne, użytki zielone, sady, zabudowa zwarta oraz zalesienia i zadrzewienia, otrzymana poprzez klasyfikację nadzorowaną ortofotomapy lotniczej o rozdzielczości 1m, wykonanej w programie ERDAS Imagine 8.3;
4. Warstwa informacji o obszarach chronionych w postaci zdigitalizowanych konturów mapy inwentaryzacji przyrodniczej [11].
5. Warstwa informacji o sieci drogowej, otrzymana poprzez digitalizację mapy topograficznej w skali 1:10 000;
6. Warstwa informacji o kierunkach uprawy otrzymana poprzez digitalizację mapy topograficznej i zdjęć lotniczych, uzupełniona badaniami terenowymi.

Zakres badań

Badania obejmowały analizy przestrzenne: analizę sieci hydrograficznej, jakościową analizę erozji wodnej powierzchniowej; modelowanie erozji wodnej powierzchniowej i modelowanie prawdopodobieństwa wystąpienia osuwisk.

Analizę sieci hydrograficznej wykonano w programie Watershed Modeling System (WMS) w wersji 6.1. Analizę oparto na Cyfrowym Modelu Terenu (DEM). Przyjęto progową wartość akumulacji spływu na poziomie 2 ha.

Dla potrzeb analizy układu dróg rolniczych w rzeźbie terenu opracowano teoretycznie oraz zaimplementowano do środowiska ArcView 3.2 metodę IARRR [9]. Analizę układu kierunków upraw wykonano analogicznie do analizy układu dróg gruntowych. Poligonowy charakter układu uprawy w rzeźbie wymaga uwzględnienia ograniczeń wynikających z faktu, że kierunek uprawy nie zawsze jest zgodny z geometrią pola, tj. uprawa nie przebiega zgodnie z kierunkiem jego

dłuższego boku. Dlatego przeprowadzono uzupełniającą weryfikację z zastosowaniem ortofotomapy lotniczej.

W analizie pilności utwardzania nawierzchni i urządzeń odwadniających dróg gruntowych wykorzystano klasyfikację Nowocienia [4,8] opartą na trzech warstwach informacji przestrzennej: Cyfrowego Modelu Terenu, warstwie informacji o gatunkach gleb oraz warstwie inwentaryzacji sieci dróg rolniczych.

Analizę jakościową erozji wodnej powierzchniowej oparto na trzech wskaźnikach opracowanych przez Józefaciuków [1,3]: zagrożenia erozją wodną powierzchniową (erozja wodna potencjalna), nasilenia erozji wodnej powierzchniowej (erozja wodna aktualna) oraz nasilenia erozji wąwozowej. Wszystkie analizy wykonano w środowisku ArcView© GIS 3.2 w oparciu o odpowiednie warstwy CMZ.

Modelowanie erozji wodnej powierzchniowej w programie Erosion 3D przeprowadzono w dwóch etapach [5,6,8]:

- 1) Przygotowanie danych wejściowych do modelu w oparciu o poligony mapy glebowo-rolniczej Cyfrowego Modelu Zlewni:
 - a) charakterystyka pokrywy glebowej: zawartość C_{org} (%), zawartość frakcji granulometrycznych w podziale wg normy DIN (%), odporność gleb na erozję wg Schmid't'a ($N \cdot m^{-2}$), gęstość objętościowa ($kg \cdot m^{-3}$);
 - b) charakterystyka użytkowania terenu: stopień pokrycia roślinnością (%) wg badań kameralnych i tabel podanych przez Schmid't'a, szorstkość terenu wg Manninga ($s \cdot m^{-1/3}$);
 - c) charakterystyka rzeźby terenu w postaci Cyfrowego Modelu Terenu o rozdzielczości 10 m.
- 2) Modelowanie w oparciu o przyjęty scenariusz opadu: opad historyczny z dnia 25.04.1976 r. o natężeniu $I = 40 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ i czasie trwania $t = 1 \text{ h}$, o prawdopodobieństwie wystąpienia obliczonym wg algorytmu Górskiego wynoszącym $p = 0,01$ oraz warunkach wilgotności gleby na poziomie $pF = 2,5$.

Modelowanie ruchów masowych w modelu SINMAP przeprowadzono w dwóch etapach:

1. Przygotowanie danych wejściowych w oparciu o poligony mapy użytkowania CMZ:
 - a. dane o właściwościach gruntu (gleby): zakres spójności ($N \cdot m^{-2}$) wg Wiłuna, gęstość ($kg \cdot m^{-3}$), zakres kąta tarcia wewnętrznego wg Wiłuna ($^{\circ}$), zakres T/R wg Zawadzkiego (m);
 - b. dane o lokalizacji istniejących osuwisk, uzyskane z badań terenowych;
 - c. dane o rzeźbie terenu w postaci Cyfrowego Modelu Terenu o rozdzielczości 10 m.
2. Modelowanie i kalibracja modelu [6,8,10].

WYNIKI I DYSKUSJA

Sieć hydrograficzna

Gęstość linii spływu, dla przyjętego proggu 2 ha kształtuje się na poziomie $4,39 \text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$, zaś długość cieków pierwszego rzędu wynosi 14,47 km, przy czym średni spadek cieków głównych wynosi $1,2^\circ$. W analizie obliczono również takie parametry geometryczne zlewni, jak: pole powierzchni równe $28,69 \text{ km}^2$ oraz średni spadek równy 7,37%.

Układ użytków ornich w rzeźbie terenu

Analiza układu użytków w rzeźbie terenu wykazała, że tylko 13,8% (233 ha) użytków ornich ma korzystny układ (poprzecznostokowy), z czego 20,4 ha położone jest na obszarach o nasileniu erozji wodnej aktualnej od 3 do 5 stopnia. Najmniej korzystny układ (wzdłużstokowy) posiada 24,7% (417 ha) użytków ornich, z czego 58,8 ha zagrożonych jest erozją w stopniu od 3 do 5.

Układ dróg rolniczych w rzeźbie terenu

Analiza układu dróg w rzeźbie terenu wykazała, że 26% (49 km) dróg rolniczych ma niekorzystny, wzdłużstokowy układ. Drogi o układzie poprzecznostokowym stanowią 18,5% (34 km) ogółu dróg rolniczych w zlewni Grodarza. Pozostałe drogi są drogami skośnostokowymi.

Pilności utwardzania nawierzchni i umacniania urządzeń odwadniania powierzchniowego dróg gruntowych

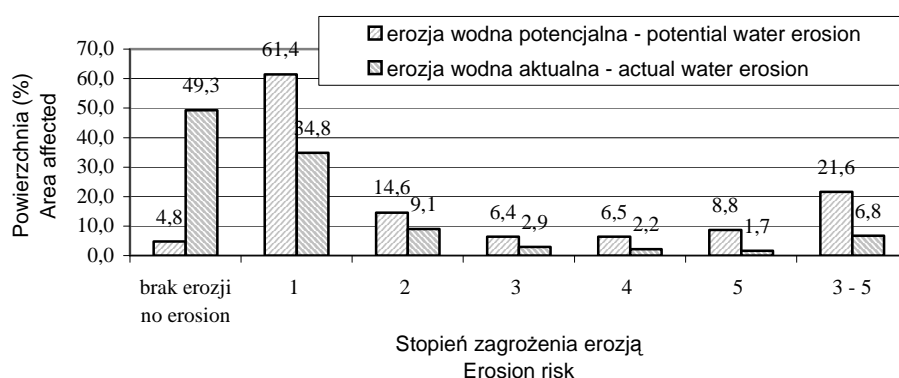
Analiza wykazała pilną i bardzo pilną potrzebę wykonania tych zabiegów na około 26% dróg rolniczych (49 km). Zabiegów takich nie wymaga 73,7% (131 km) dróg rolniczych.

Wskaźniki jakościowe erozji wodnej powierzchniowej

Okolo 21% (594 ha) obszaru zagrożone jest erozją wodną potencjalną w stopniach od średniego do bardzo silnego, przy czym najbardziej zagrożone są stoczyste obszary północnej części zlewni położone na lessach, aktualnie zalesione. Ze względu na to, że większa część obszaru zlewni zagrożonego erozją wodną potencjalną znajduje się obecnie pod użytkami, uznawanymi za ochronne tj. zalesieniami (351 ha, 12% obszaru zlewni), sadami (17 ha, 0,6% obszaru zlewni) oraz użytkami zielonymi (17 ha, 0,6% obszaru zlewni), rzeczywiste nasi-

lenie erozji wodnej wyrażone wskaźnikiem erozji wodnej aktualnej jest znacznie mniejsze, niż potencjalne (rys. 1).

Erozja wąwozowa w stopniu bardzo silnym (gęstość wąwozów przekracza $2,5 \text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$) występuje na 18% (512 ha). Łączna długość wąwozów wynosi około 65 km, zaś gęstość wąwozów, uśredniona dla obszaru zlewni wynosi $2,26 \text{ km}\cdot\text{km}^{-2}$, co kwalifikuje ją do 2 stopnia pilności ochrony przed erozją wąwozową.



Rys. 1. Wskaźniki jakościowe erozji wodnej powierzchniowej w zlewni potoku Grodarz
Fig. 1. Qualitative surface water erosion indicators in Grodarz watershed

Modelowanie erozji wodnej powierzchniowej w programie EROSION 3D

W wyniku modelowania w programie EROSION 3D otrzymano szereg warstw informacji przestrzennej m.in. mapę erozji (zmywów) i depozycji, mapę odpływu. Dla celów szacowania udziału poszczególnych wąwozów w dopływie wód i osadów do miasta Kazimierza Dolnego zlewnię podzielono na 27 cząstkowych zlewni wąwozów. W tabeli 1 podano zlewnie o największym udziale dopływu wody i rumowiska do cieku głównego Grodarza. Wyloty zlewni wąwozów numer 4 i 6 znajdują się bezpośrednio w obrębie miasta Kazimierz Dolny, pozostałe zlokalizowane są powyżej miasta.

Z racji braku danych rzeczywistych nie przeprowadzono kalibracji modelu EROSION 3D, toteż wyniki modelowania należy traktować wyłącznie jakościowo [7,8]. Skalibrowany model EROSION 3D umożliwiłyby obliczenia odpływu i transportu rumowiska na poziomie zastosowań inżynierskich.

Tabela 1. Ważniejsze wyniki modelowania w EROSION 3D dla wybranych zlewni cząstkowych wąwozów
Table 1. EROSION 3D modeling results for chosen gullies' subbasins

| Numer zlewni Sub-basin number | Powierzchnia zlewni cząstkowej Sub-basin area | Dane dla spływu skoncentrowanego Data for concentrated runoff | | | | |
|----------------------------------|--|--|---|-----------------------------|--|--|
| | | Odpływ Outflow | Ilość przemieszczonych osadów Sediment moved | Erozja netto Net erosion | Zawartość frakcji iltu w zawieszynie spływu powierzchniowego Silt content | Zawartość frakcji pyłu w zawieszynie spływu powierzchniowego Clay content |
| | | | | | | |
| ha | m ³ | Mg | Mg·ha ⁻¹ | % | % | |
| 4 | 748 | 77990 | 2914,5 | 4 | 17 | 71 |
| 6 | 63 | 10160 | 962,0 | 15 | 14 | 78 |
| 17 | 74 | 12170 | 1420,3 | 19 | 16 | 78 |
| 21 | 90 | 14690 | 2000,1 | 23 | 14 | 78 |
| 26 | 124 | 12600 | 370,4 | 3 | 11 | 76 |

Modelowanie ruchów masowych w modelu SINMAP

Zarejestrowana forma osuwiskowa znajduje na terenie o spadku około 30°, na południowym stoku doliny Grodarza. Osiąga ona maksymalnie 5 m głębokości i ma prostoliniowy przekrój podłużnym płaszczyzny poślizgu.

Wyniki modelowania wskazują na generalnie niski udział terenów o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia utraty stateczności stoków oraz brak stoków wymagających zabiegów ochronnych dla utrzymania stateczności (tab. 2).

Tabela 2. Wyniki modelowania stateczności stoków w zlewni Grodarza
Table 2. SINMAP slope stability modeling results

| Indeks stabilności Stability index | Przewidywany stan stateczności Predicted stability status | Powierzchnia Area | |
|---------------------------------------|--|----------------------|------|
| | | ha | % |
| SI>1,5 | Strefa stabilności Stability zone | 2758,2 | 96,0 |
| 1,5>SI>1,25 | Strefa względnej stabilności Moderate stability zone | 56,9 | 2,0 |
| 1,25>SI>1,0 | Strefa quasi-stabilna Quasi-stable zone | 39,8 | 1,4 |
| 1,0>SI>0,5 | Dolny próg stabilności Lower stability threshold | 14,4 | 0,6 |
| 0,5>SI>0,0 | Górny próg stabilności Upper stability threshold | 0,0 | 0,0 |
| 0,0>SI | Strefa wymuszonej stabilności Zone of defended stability | 0,0 | 0,0 |

WNIOSKI

1. Wyniki badań wskazują na znaczną skalę zagrożenia erozją wodną obszaru badanej zlewni. Jest to skutkiem przede wszystkim niewłaściwej struktury użytkowania terenu, szczególnie uprawy stromych zboczy oraz niewłaściwego układu pól i dróg rolniczych w rzeźbie terenu.

2. Analizy przestrzenne oraz wyniki modelowania umożliwiają wyznaczenie obszarów koniecznej transformacji użytkowania terenu w kierunku użytków ochronnych: zalesień i zadrzewień, sadów oraz trwałych użytków zielonych. Dla celów wspomagania decyzji można wprowadzić pilność wprowadzenia poszczególnych zabiegów.

3. Wyniki modelowania w EROSION 3D pozwoliły wyznaczyć zlewnie wąwozów o największym udziale dopływu spływu powierzchniowego i rumowiska do cieku Grodarza w obrębie miasta Kazimierz Dolny.

4. Cyfrowy Model Zlewni może mieć zastosowanie jako podstawa systemu wspierania decyzji, dostarczając informacji o pilności wprowadzania oraz precyzyjnej lokalizacji niezbędnych zabiegów przeciwoerozyjnych.

PIŚMIENNICTWO

1. **Józefaciuk A., Józefaciuk Cz.:** Erozja agroekosystemów. Bibl. Mon. Środ., Warszawa, 1996.
2. **Józefaciuk Cz., Józefaciuk A.:** Erozja i melioracje przeciwoerozyjne. Bibl. Mon. Środ., Warszawa, 1996.
3. **Józefaciuk Cz., Józefaciuk A.:** Mechanizm i wskazówki metodyczne badania procesów erozji. Bibl. Mon. Środ., Warszawa, 1996.
4. **Nowocień E., Stuczyński T., Wawer R.:** GIS in Supporting Decisions on the Management and Protection of Agricultural Roads' Network. Workshop on Identification of the Current Status and Needs of GIS and Databases Technology in the Agricultural Sector – GIS for Analysis and Monitoring of Land Use and Land/Water Quality, Proland, IUNG, Puławy, 2004.
5. **Nowocień E., Wawer R.:** Porównanie jakościowych metod analitycznych i fizycznego modelowania cyfrowego w badaniach erozji wodnej powierzchniowej. Zesz. Probl. Post. Nauk Roln., 487, 181-188, 2002.
6. **Schmidt J.:** A mathematical model to simulate rainfall erosion. Erosion, transport and deposition processes – theory and models. Catena Suppl., 19, 101-109, 1991
7. **Pack R.T., Tarboton D.G., Goodwin C.N.:** The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping. 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, British Columbia, Canada 21-25 September 1998, 1998.
8. **Wawer R.:** Zastosowanie cyfrowego modelowania zlewni Grodarza dla celów zagospodarowania przeciwoerozyjnego. Rozprawa Doktorska, IUNG Puławy, 2003.
9. **Wawer R.:** An Indicator for Estimating Arrangement of Rural Roads in Terrains Relief and Its Digital Implementation in GIS on the Example of Grodarz Stream Watershed. Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Civil Engineering Series, 7, 2, 2004.

10. **Wawer R., Nowocień E.:** Application of Sinmap terrain stability model in Grodarz stream watershed. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Environmental Development Series*, 6, 1, 2003.
11. **Wilgat T., red.:** *Zagadnienia ochrony środowiska w gminie Kazimierz Dolny*. Lublin, 1991.

DIGITAL WATERSHED MODEL AS A BASIS FOR ANTI-EROSIONAL MELIORATIONS WITHIN RURAL WATERSHEDS

Rafal Wawer

Department of Soil Science Erosion Control and Land Protection
The Institute of Soil Science and Plant Cultivation
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
e-mail: huwer@iung.pulawy.pl

Abstract. The work presents research results on the acquisition and processing of spatial data, application of spatial analyses and modeling for the purpose of precisely determining the location and extent of anti-erosion meliorations. A Digital Watershed Model (DWM) has been build through digitalization of analogue maps. The DWM was a basis for further investigations, including the arrangement of rural roads in the relief of the terrain, the urgency of road hardening and qualitative water erosion indicators. Moreover, the SINMAP model was used for modeling slope stability, and the EROSION 3D for modeling water erosion. The results provided a basis for the preparation of a map of recommended anti-erosion measures, taking into account the urgency of their implementation.

Key words: GIS, spatial analyses, anti-erosional meliorations