

MAPA PODATNOŚCI OSUWISKOWEJ W SKALI REGIONALNEJ – PRZYKŁAD Z DOLINY SANU NA POGÓRZU DYNOWSKIM

LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAP IN A REGIONAL SCALE – EXAMPLE FROM OF SAN VALLEY IN THE DYNÓW FOOTHILLS

MIROSLAW KAMIŃSKI¹

Abstrakt. Pogórze Dynowskie jest obszarem Karpat fliszowych, gdzie ruchy masowe, zwłaszcza osuwiska, są zjawiskami występującymi powszechnie. Wpływają one na ewolucję stoków, zarówno w długich (tysiące lat), jak i w krótszych (do kilku lat) przedziałach czasowych. Dlatego skutki ruchów osuwiskowych powinny stanowić istotną przesłankę przy planowaniu przestrzennym. Celem badań było opracowanie numeryczne w systemie GIS mapy podatności osuwiskowej w skali 1:25 000 dla wybranego odcinka doliny Sanu na Pogórzu Dynowskim. Mapy te są istotne pod kątem planowania przestrzennego w gminach i powiatach oraz oceny ryzyka osuwiskowego. Do modelowania GIS użyto pięciu czynników biernych: litologia podłoża fliszowego, budowa tektoniczna, nachylenie, ekspozycja oraz wysokość terenu. Do obliczenia podatności osuwiskowej wykorzystano metodę Weights of Evidence.

Słowa kluczowe: mapa podatności, osuwisko, geostatystyka, geologia, Pogórze Dynowskie.

Abstract. Dynów Foothills is an area Carpathians where mass movements, in particular landslides are phenomena commonly occurring. They affect the evolution of the slopes in both the long (thousands of years) as well as shorter (up to several years) intervals. Therefore, the effects of landslide movements should be an important consideration when planning. The objective was to develop a numerical GIS landslide susceptibility maps in scale 1: 25 000 for the selected area of the San river valley in the Dynów foothill. These maps are important for spatial planning in communities and counties, and landslide risk assessment. GIS was used to model passive five factors: flysch lithology, tectonic, slope, exposure and altitude. Susceptibility was calculated of the Weights of Evidence method.

Key words: susceptibility map, landslide, geostatistics, geology, Dynów Foothills.

WSTĘP

Na obszarze Pogórza Dynowskiego ruchy masowe, zwłaszcza osuwiska, są zjawiskami występującymi powszechnie. Dlatego skutki ruchów osuwiskowych powinny stanowić istotną przesłankę przy planowaniu przestrzennym. O ile procesy osuwiskowe były i są uwzględniane przy projektowaniu i realizacji dużych inwestycji inżynierskich (Zabuski i in., 1999), o tyle w nieznacznym tylko stopniu były one brane pod uwagę przy realizacji przedsięwzięć o mniejszej skali inwestycyjnej. Dotyczy to nie tylko zagospoda-

rowania nieruchomości prywatnych, ale również terenów gminnych. Na obszarze Karpat fliszowych istnieje wiele średnich i małych osuwisk, które w ostatnich latach przyniosły ogromne straty ekonomiczne i społeczne, a których można byłoby uniknąć lub zredukować, dysponując dokładniejszą informacją o potencjalnych zagrożeniach.

Przedstawiona w artykule metoda wyznaczenia podatności osuwiskowej w odniesieniu do specyfiki danego obszaru ma znaczenie zarówno metodyczne, jak i praktyczne.

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: mirosław.kaminski@pgi.gov.pl

Może stanowić materiał wspomagający do rozwiązywania zagadnień związanych z ograniczaniem skutków katastrof żywiołowych i ich przeciwdziałania oraz przy planowaniu przestrzennym.

Problem podatności osuwiskowej, jak i oceny ryzyka osuwiskowego nie był omawiany w literaturze naukowej dla obszaru doliny Sanu na Pogórzu Dynowskim. Za to szacowanie ryzyka i podatności osuwiskowej jest rozważane w licznych publikacjach w literaturze światowej, np. Bonham-Carter i in. (1989), Lee i in. (2002), Chung i Fabrii (2003), Glade (2003), Remondo i in. (2003). Natomiast w literaturze polskiej Bober (1984) przedstawił podział na

rejony osuwiskowe wyznaczone na podstawie ważonego wskaźnika osuwiskowości. Ten nurt prezentują również prace Wójcika i Zimna (1996) oraz Kamińskiego (2006). Odmienne podejście do podatności na osuwanie przedstawili Bober i Zabuski (1993), opracowując klasyfikację zboczy fliszowych. Bazując na metodzie statystycznej WoE opartej na prawdopodobieństwie Bayesa, Mrozek i in. (2004a, b) wyznaczyli podatność na osuwanie w okolicach Gorlic. Korzystając z technik GIS oraz metody indeksowej Kamiński (2007) opracował mapę podatności osuwiskowej dla rejonu Jodłówki (Pogórze Dynowskie).

POŁOŻENIE I RZEŻBA TERENU

Obszar badań jest położony na Pogórzu Dynowskim w dolinie Sanu w południowo-wschodniej części Polski (fig. 1). Teren ma charakter pagórkowato-górzysty, charakterystyczny dla rzeźby pogórzy karpaccich. Występują tu liczne osuwiska, które stanowią istotne zagrożenie dla lokalnej sieci dróg, linii wysokiego napięcia oraz zabudowań. W obrębie osuwisk zaznaczają się skarpy w postaci mniej lub bardziej wyraźnych, półkolistych krawędzi od 2 do 12 m wysokości. Powierzchnia jezorów osuwiskowych jest urozmaicona, składa się z pagórów, bezodpływowych zagłębień oraz progów o kilkumetrowej wysokości.

Sieć rzeczną tworzą dopływy Sanu (np. Magierówka, Baryczka, Łubienka, Ostrówek) i Stobnicy (np. Pietrykówka). Dolina Sanu składa się z dłuższych odcinków równoleżnikowych i nieco krótszych południkowych. W odcinku południkowym w rejonie Dynowa San płynie w obrębie przełomu antecedentnego (Klimaszewski, 1965; Starkel, 1972). Natomiast odcinek równoleżnikowy jest insekwentny względem przebiegu struktur tektonicznych oraz podłużny w stosunku do przebiegu elewacji neotektonicznej wyróżnianej przez Klimaszewskiego (1965) oraz Henkla (1977). W tym ostatnim odcinku dolina tworzy kilka wciętych, wielkopiennych meandrów.

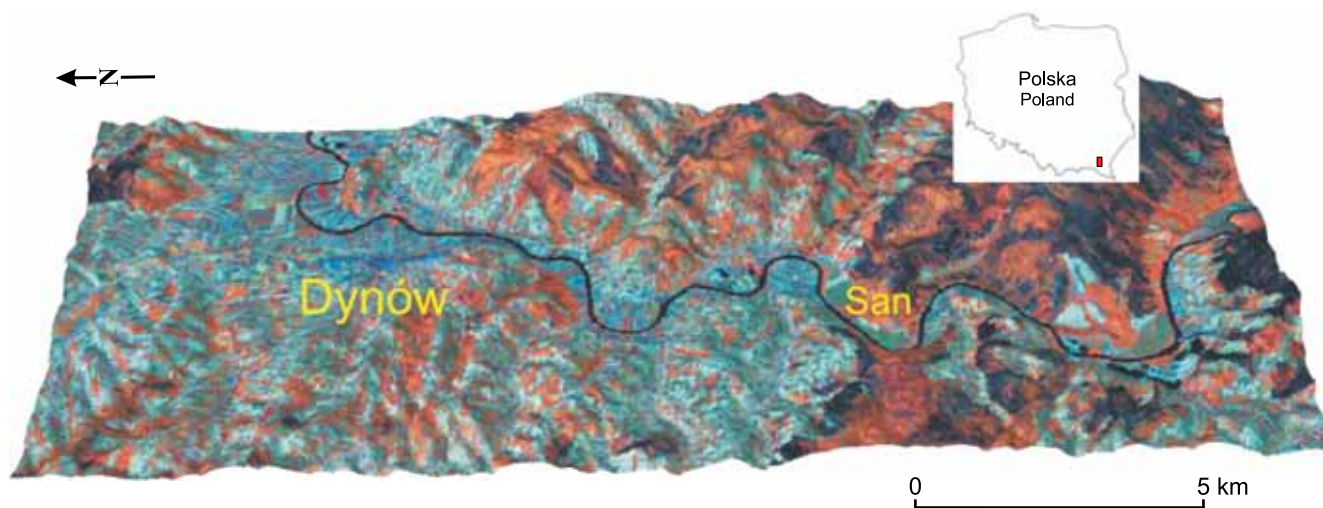


Fig. 1. Zdjęcie satelitarne obszaru badań, Landsat ETM+RGB453, widok 2.5D

Satellite image of the study area, Landsat ETM+RGB453, 2.5D view

BUDOWA GEOLOGICZNA

Obszar badań zawiera się całkowicie w obrębie płaszczowiny skolskiej, która jest tu najbardziej zewnętrznym elementem tektonicznym Karpat zewnętrznych. W obrazie kartograficznym widzimy szereg elementów łuskowo-fałdowych o przebiegu głównie NW–SE (fig. 2). Najbardziej południowo-zachodnim elementem tektonicznym jest fałd Witryłowa, którego oś znaczą warstwy hieroglifowe (Kamiński, Piotrowska, 2009). Kolejną strukturą tektoniczną jest rozległa antyklina Wary, wypełniona górnokredowymi warstwami inoceramowymi. Jest ona wtórnie sfałdowana. Jądro antykliny wypełniają gruboławicowe piaskowce, które w okolicach Wary zanikają. Antyklina jest pocięta licznymi uskokami o kierunku SE–NW. Jej skrzydło północne jest złuskowane, zaś południowe wskutek nacisku antykliny Witryłowa uległo częściowej redukcji.

Następną strukturą tektoniczną jest synklina Nozdrzca. Jest to rozległa, asymetryczna synklina wypełniona warstwami krośnieńskimi. Na wschód od Sanu warstwy krośnieńskie

są stromo pochylone ku południowi oraz nieznacznie drugorzędnie sfałdowane. Skrzydło północne, zbudowane w większości z łupkowo-piaskowcowych kompleksów litologicznych, jest dość strome, ale o spokojnej budowie. Synklina ta jest nasunięta na antyklinę Dylągowej. Antyklina ta charakteryzuje się dużą zmiennością ułożenia skrzydeł. Wzdłuż północnego skrzydła występuje tendencja do obalenia ku NE. Antyklina jest pocięta systemem kilku poprzecznych uskoków, które powodują podział na bloki o różnym stopniu zaangażowania tektonicznego. Na antyklinę Dylągowej jest nasunięta synklina Bartkówki. Jest to asymetryczna synklina o osi wynurzającej się ku wschodowi. Wypełniona jest warstwami menilitowymi i krośnieńskimi.

Istotną rolę na obszarze badań odgrywają strefy uskokowe, mające odzwierciedlenie w morfologii. Pod względem litologicznym jest to obszar bardzo zróżnicowany. Oprócz utworów czwartorzędowych na jego budowę litologiczną składają się liczne kompleksy litologiczne fliszu płaszczowiny skolskiej.

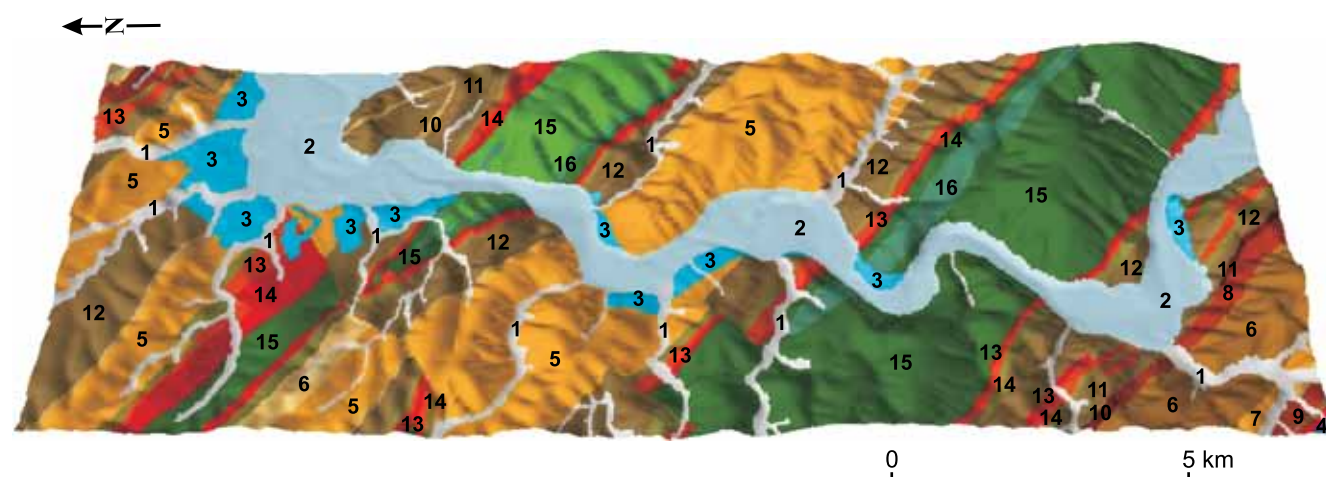


Fig. 2. Szkic geologiczny obszaru badań, widok 2.5D

Holocen: 1 – żwiry, piaski i mułki, 2 – żwiry, piaski i iły; plejstocen: 3 – żwiry, piaski; podłoże fliszowe, miocen: 4 – diatomity z piaskowcami i łupkami, 5 – łupki i piaskowce, 6 – piaskowce i łupki, 7 – łupki, 8 – piaskowce i łupki; miocen/oligocen: 9 – piaskowce i łupki; oligocen: 10 – łupki brunatne, 11 – piaskowce gruboławicowe z łupkami brunatnymi, 12 – łupki menilitowe, margle, diatomity; eocen: 13 – łupki i piaskowce, 14 – łupki pstre; kreda: 15 – łupki i piaskowce, 16 – piaskowce gruboławicowe ze zlepnięciami i łupkami

Geological sketch of the study area, 2.5D view

Holocene: 1 – gravels, sands and muds, 2 – gravels, sands and clays; Pleistocene: 3 – gravels, sands; Flysch bedrock, Miocene: 4 – diatomites with sandstones and shales, 5 – shales and sandstones, 6 – sandstones and shales, 7 – shales, 8 – sandstones and shales; Miocene/Oligocene: 9 – sandstones and shales; Oligocene: 10 – brown shales, 11 – thick bedded sandstones with brown shales, 12 – menilite shales, marls, diatomites; Eocene: 13 – shales and sandstones, 14 – verigated shales; Cretaceous: 15 – shales and sandstones, 16 – thick bedded sandstones with conglomerates and shales

METODA WEIGHTS OF EVIDENCE (WoE)

Metoda WoE jest logarytmiczno-linową wersją ogólnej teorii Bayesa (Bonham-Carter, 1994). Metoda ta została wykorzystana do określenia wpływu czynników geologicznych i geomorfologicznych na występowanie osuwisk między Dynowem a Witryłowem w dolinie Sanu na Pogórzu Dynowskim.

Metoda była stosowana z dużym powodzeniem do określania potencjalnych miejsc występowania złóż mineralnych (Bonham-Carter i in., 1988), a następnie do rozkładu przestrzennego innych zasobów naturalnych, a także do identyfikowania obszarów podatnych na osuwanie (van Vesten i in., 2003; Armas, 2011).

W teorii Bayesa przyjmuje się, że na podstawie informacji o oszacowanym prawdopodobieństwie danego zjawiska (prawdopodobieństwo *a priori*) oraz dodatkowej informacji o tym zjawisku (prawdopodobieństwa warunkowe) uzyskuje się lepszą, pełniejszą informację o rozważanym zjawisku (prawdopodobieństwo *a posteriori*). Można to wyrazić za pomocą następującego wzoru:

$$P(L/F) = \frac{P(L \cap F)}{P(F)} = \frac{P(L) \cdot P(F/L)}{P(F)} \quad [1]$$

gdzie:

- $P(L)$ – prawdopodobieństwo *a priori* danego zjawiska (rozumiane tu jako prawdopodobieństwo wystąpienia osuwiska),
- F – czynnik warunkujący wystąpienie danego zjawiska (czynnik kontrolujący występowanie osuwisk),
- $P(F/L)$ – prawdopodobieństwo warunkowe,
- $P(L/F)$ – prawdopodobieństwo *a posteriori*, tj. prawdopodobieństwo, że dane zjawisko wystąpi ze względu na czynnik F (prawdopodobieństwo występowania osuwiska ze względu na czynnik F).

Do równania [1] można wprowadzić wiele czynników warunkujących, przy spełnieniu założenia, że czynniki te są

między sobą niezależne. Wówczas równanie [1] może być przekształcone do następującej postaci:

$$P(L/F_1 \cap F_2 \cap \dots \cap F_n) = \frac{P(L) \cdot P(F_1/L) \cdot P(F_2/L) \cdot \dots \cdot P(F_n/L)}{P(F_1) \cdot P(F_2) \cdot \dots \cdot P(F_n)} \quad [2]$$

Prawdopodobieństwo *a priori* można określić jako stosunek obszaru zajętego przez osuwiska do całego badanego obszaru.

Wprowadza się także wyrażenie *odds*, które jest zdefiniowane jako stosunek prawdopodobieństwa zajścia danego zjawiska do przeciwieństwa takiego zjawiska:

$$Odds = O = \frac{P(L)}{1 - P(L)} \quad [3]$$

W wyniku dalszych przekształceń określa się warunkowe *odds*, a następnie na podstawie ich zlogarytmowanych wielkości oblicza się tzw. wskaźniki asocjacji W^+ oraz W^- , czyli *Weights of Evidence*. Wielkość wag jest miarą zależności pomiędzy osuwiskiem a każdą klasą zmiennych przyjętych do predykcji (czynników pasywnych). Różnica pomiędzy W^+ i W^- stanowi tzw. kontrast (C), jeden z parametrów służących do przyjęcia lub odrzucenia klasy zmiennych przyjętych do predykcji.

Pełne wyprowadzenie stosowanych w metodzie wzorów podaje Bonham-Carter (1994). Wartość wag decyduje o „sile” predykcyjnej modelu. Przyjmuje się, że wartości bezwzględne W pomiędzy 0,1 a 0,5 mają małe, 0,5–1,0 umiarkowane (średnie), 1,0–2,0 silne, a powyżej 2 bardzo silne znaczenie predykcyjne (Kemp i in., 1999).

INWENTARYZACJA OSUWISK

Kartowanie osuwisk wykonano na podkładach geodezyjnych w skali 1:10 000 z wykorzystaniem zdjęć lotniczych w skali 1:13 000, modelu cyfrowego terenu (LPIS *Land Parcel Identification System*) oraz materiałów archiwalnych Szczegółowej mapy geologicznej Polski (SMGP) w skali 1:50 000, ark. Dynów (Kamiński, Piotrowska, 2009), Kańczuga (Kamiński, Piotrowska, 2003), Bircza (Rauch, Zuchiewicz, 2009) oraz Błazowa (Rauch, Sokolowski, 2009).

Na badanym terenie zinwentaryzowano 208 osuwisk o łącznej powierzchni 14,9 km². Obliczony wskaźnik osuwiskowości wyniósł 9,49%, a współczynnik gęstości osuwisk – 1,316. Dla porównania, wskaźnik osuwiskowości obliczony dla tego obszaru przez Zabuskiego i in. (1999) wyniósł 5,558, a wskaźnik gęstości osuwisk – 0,193.

Największe nagromadzenia osuwisk znajdują się w obszarach o dużych deniwelacjach: na zboczach doliny Sanu

oraz wzdłuż osi większych dolin bocznych – doliny Stupnicy i Łubienki. Rzadziej osuwiska występują w obszarach wododziałowych, na stokach wierzchołków o niewielkich deniwelacjach. W północno-zachodniej części obszaru badań (Bartkówka, Pawłokoma) osuwiska tworzą się głównie na wychodniach warstw menilitowych, a w rejonie Sielnicy na warstwach inoceramowych. W rejonie Dąbrówki Starzeńskiej duże osuwiska powstały na kontakcie (często tektonicznym) warstw inoceramowych, warstw hieroglifowych, eoceńskich łupków pstrych i warstw menilitowych. W okolicy Dynowa – na kontakcie warstw inoceramowych, hieroglifowych, łupków pstrych, a także w strefach uskokowych. W górnym biegu Sanu w okolicy Wary i Temeszowa osuwiska towarzyszą głównie wychodniom warstw łupków pstrych, hieroglifowych i menilitowych oraz inoceramowych. Rozległe osuwisko rozwinęło się na wychodniach warstw krośnieńskich w okolicy miejscowości Siedliska.

Koluwia osuwiskowe są wykształcone jako ropy, gliny piaszczyste i piaszczysto-pylaste, niekiedy pyłowate, z rumoszem skalnym piaskowców, mułowców oraz rogowców różnej frak-

cji oraz z blokami i głazami skalnymi, a niekiedy także z pakietami utworów fliszowych. Miąższość koluwiów zmienia się od kilku do kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu metrów.

PRZYGOTOWANIE DANYCH

Dane wejściowe użyte do opracowania mapy podatności osuwiskowej obejmują dane pozyskane z bezpośrednich prac terenowych, interpretacji zdjęć lotniczych oraz analizy istniejących map SMGP w skali 1:50 000, ark. Błażowa, Bircza, Dynów i Kańczuga.

Podstawowym wymogiem przy realizacji tego zadania było sporządzenie aktualnej mapy rozmieszczenia osuwisk. Wcześniej mapy geologiczne zawierające osuwiska tego rejonu (Wdowiarz, 1939; Rajchel, 1989) wymagały weryfikacji, a dla niektórych części obszaru całkowitego opracowania od podstaw. Dlatego zostało przeprowadzone bardzo szczegółowe kartowanie terenowe w skali 1:10 000, wykonane w 2009 r.

Mapa geologiczna została opracowana na podstawie kartowania geologicznego w skali 1:25 000 oraz reinterpretacji wcześniejszych map geologicznych tego rejonu. Przedstawiono na niej główne kompleksy tworzące flisz karpacki, z wyodrębnieniem 16 jednostek litostratygraficznych. Mapa geologiczna zawiera również informacje dotyczące tektoniki obszaru, dzięki zaznaczonym na niej kierunkom zapadania warstw, osiom fałdów oraz kierunkom nasunięć. Na podstawie tej mapy zostały wyodrębnione warstwy tematyczne: litologia i tektonika.

Charakterystyka ukształtowania stoków, czyli wysokość, spadek stoku i ekspozycja względem stron świata, została uzyskana z cyfrowego modelu terenu (DTED 2 *Digital Terrain Elevation Data*).

ANALIZA DANYCH

Przed modelowaniem zbiorów zinwentaryzowanych osuwisk został podzielony na dwa przestrzenne podzbiory, które zawierały po 146 osuwisk. Pierwszy podzbiór osuwisk i mapy tematyczne służyły do opracowania modelu, zaś drugi podzbiór osuwisk wykorzystano do weryfikacji tego modelu.

Prawdopodobieństwo *a priori* obliczone dla 146 osuwisk wyniosło 0,9262. Należy zaznaczyć, że liczba punktów użytych do modelowania wpływa na wartość obliczonego prawdopodobieństwa.

Następnie opracowano cyfrowo w systemie GIS warstwy predykcyjne: litologia, uskoki, nachylenia, ekspozycja, wysokość, sieć rzeczna, użytkowanie terenu oraz osuwiska (fig. 3).

Dla map odpowiadających poszczególnym parom czynników przeprowadzono test zależności warunkowej χ -kwadrat. Na tym etapie odrzucono warstwy tematyczne sieć rzeczna oraz użytkowanie terenu ze względu na zbyt silną zależność warunkową.

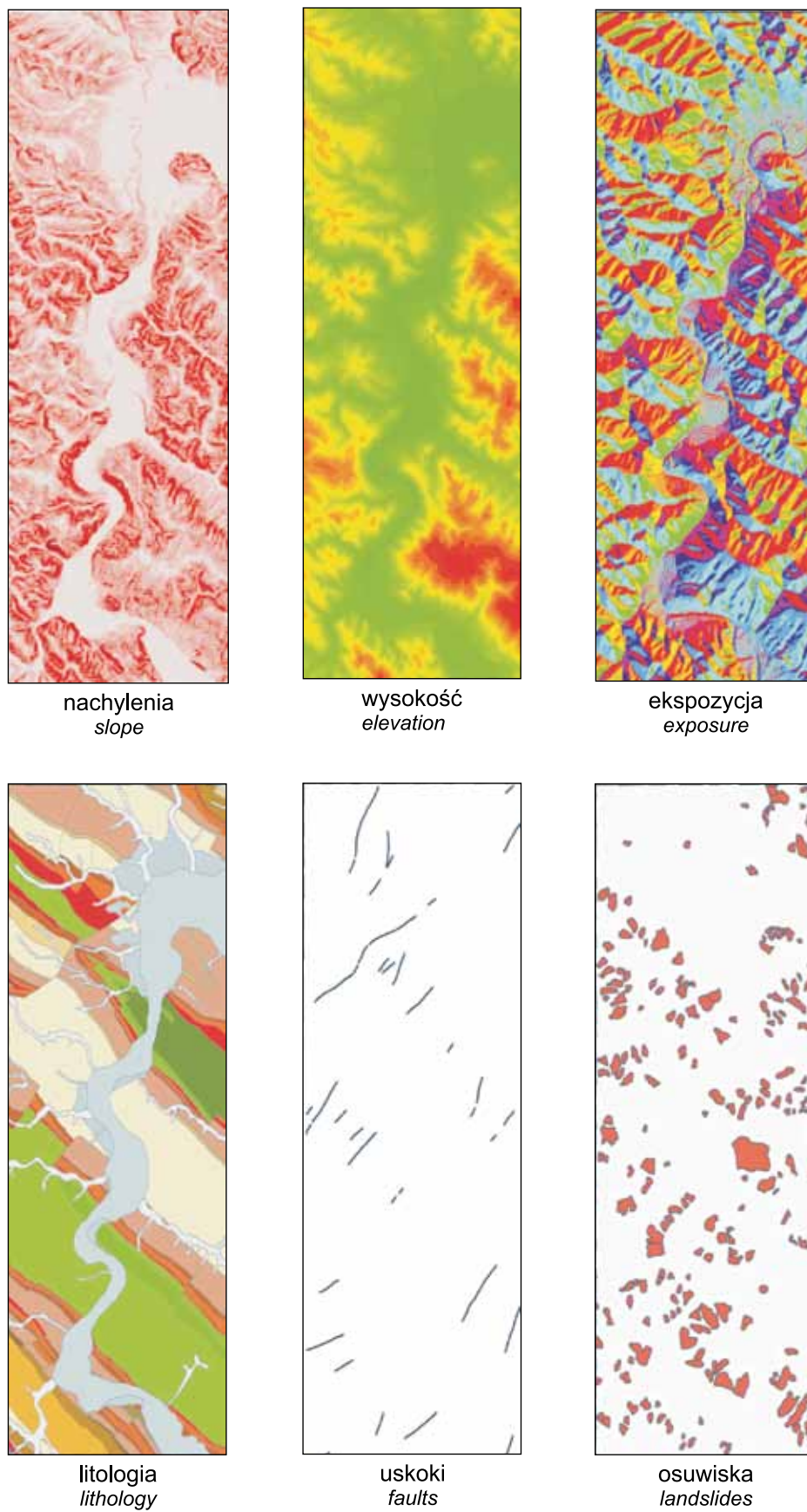
W efekcie modelowania wygenerowano pięć warstw tematycznych: mapa litologiczna, mapa uskoku, mapa nachyleń terenu, mapa ekspozycji terenu oraz mapa wysokości terenu.

Dwa pierwsze czynniki pasywne zostały opracowane w postaci wektorowej w geobazie, zaś pozostałe trzy powstały w efekcie cyfrowego przetwarzania modelu terenu DTED w formacie GRID, o wielkości piksela terenowego 30 m.

Kolejnym krokiem była konwersja danych wektorowych (litologia, uskoki) do formatu GRID 30 m. Następnie z warstwy uskoki wygenerowano w ArcGis trzy strefy buforowe o szerokości 100 m.

W ten sposób powstało pięć warstw gridowych, opracowanych w programie ArcGis. Jedyną warstwą wektorową poligonową to osuwiska, które do dalszych cyfrowych przekształceń były użyte w formie punktów centroidów. Modelowanie prowadzono używając modułu ArcSDM (*Spatial Data Modeller*), będącego rozszerzeniem ArcGis, opracowanego przez Geological Survey of Canada (Kemp i in., 2001). Moduł ten automatycznie oblicza dodatnie i ujemne wartości wag, wariancje, kontrast, prawdopodobieństwo *a posteriori* (tab. 1).

Obliczenie wag dla wielkości predykcyjnych obejmuje operacje *crossing* pomiędzy mapami poligonalnymi i/lub mapami rastrowymi a punktową mapą występowania osuwisk.

**Fig. 3. Warstwy tematyczne**

Thematic layers

Tabela 1

Wartości wag W^+ , W^- i kontrastów C dla poszczególnych warstw tematycznych
 Values of weights W^+ , W^- and contrasts C for the different thematic layers

Klasa	Obszar	Punkt	W^+	$s(W^+)$	W^-	$s(W^-)$	C	$s(C)$	$stud(C)$
Litologia / Lithology									
5	29	26	-0,4865	0,5854	0,1459	0,3639	-0,6324	0,6893	-0,9175
14	6	5	-0,3864	1,3959	0,0169	0,3161	-0,4033	1,4312	-0,2818
17	4	1	-3,5897	1,1641	0,2783	0,3523	-3,8679	1,2163	-3,1801
18	6	2	-3,1384	0,8826	0,3660	0,3685	-3,5043	0,9564	-3,6641
Uskoki / Faults									
200	8	6	-1,5920	0,7698	0,1836	0,3390	-1,7756	0,8412	-2,1109
Nachylenia / Slope									
2	43	33	-1,3083	0,3649	1,5535	0,7310	-2,8619	0,8170	-3,5029
Ekspozycja / Exposure									
1	27	21	-1,2190	0,4737	0,5116	0,4190	-1,7306	0,6324	-2,7365
2	19	14	-1,4699	0,5270	0,4388	0,3939	-1,9087	0,6579	-2,9012
3	17	9	-2,4454	0,4817	1,1780	0,5523	-3,6234	0,7329	-4,9441
4	15	9	-2,1905	0,5169	0,7373	0,4460	-2,9277	0,6827	-4,2883
5	19	15	-1,2416	0,5555	0,3310	0,3757	-1,5727	0,6706	-2,3452
Wysokość / Elevation									
6	10	7	-1,5990	0,7110	0,2217	0,3464	-1,8206	0,7908	-2,3021
7	5	2	-2,8295	0,9331	0,2502	0,3449	-3,0797	0,9948	-3,0956
8	2	1	-2,7529	1,3419	0,1068	0,3214	-2,8597	1,3798	-2,0725

WYNIKI I Dyskusja

Zbiór osuwisk został podzielony losowo na dwa zróżnicowane przestrzennie podzbiory. Pierwszy podzbiór osuwisk i mapy tematyczne służyły do opracowania modelu, natomiast drugi podzbiór – do weryfikacji opracowanego modelu. Po obliczeniu wartości wag i kontrastów i porównaniu ich z ich wartościami krytycznymi można było wybrać takie zmienne, które są istotne do budowy modelu, a także odrzucić te, które są nieistotne. Po wielokrotnych iteracjach opracowano model predykcyjny, który uwzględnia litologię, odległości od linii tektonicznych, nachylenie stoku i jego ekspozycję oraz wysokość terenu. Te zmienne są najbardziej istotne przy przewidywaniu obszarów podatnych na osuwanie.

Weryfikacja modelu polegała na sprawdzeniu, jaki procent osuwisk z podzbioru drugiego przypada na obszary wyznaczone na podstawie podzbioru pierwszego. Uzyskano 73% poprawnie sklasyfikowanych pikseli. W ten sposób opracowano końcową, wynikową mapę podatności osuwiskowej (*susceptibility map*) – [figura 4](#).

Obserwacje terenowe skłoniły autora do stwierdzenia, że na badanym obszarze doliny Sanu osuwiska tworzą się i reaktywują zarówno w obrębie pokryw czwartorzędowych, jak i podłoża fliszowego. Strefy poślizgu występują zazwyczaj na granicy litologicznej pomiędzy utworami czwartorzędowymi a skałami podłoża fliszowego lub tylko w obrębie podłoża.

Przeprowadzone modelowania upoważniły do podziału morfodynamicznego obszaru badań na dwie kategorie: stabilny i niestabilny. Obszary stabilne to przede wszystkim dolina Sanu, zbudowana z tarasów holocenijskich i czwartorzędowych. Również doliny większych potoków należą do obszarów stabilnych. Do tej samej kategorii zostały zaliczone wypłaszczenia wzgórz, zbudowanych głównie z kredowych warstw inoceramowych oraz oligocenijskich warstw kroszeńskich.

Pozostały obszar został zaliczony do kategorii niestabilnej (średnio i bardzo podatnej).

Obszary najbardziej podatne nawiązują w przeważającej części do przebiegu warstw geologicznych, głównie łupków pstrych i warstw hieroglifowych oraz kroszeńskich. Obszary najbardziej podatne zlokalizowane są głównie w okolicy Bachórcza, Dynowa, Dąbrówki Starzeńskiej, Krzemienicy i Temeszowa.

Wygenerowane w systemie GIS tereny podatne osuwiskowo w skali 1:25 000 mogą stanowić materiał wspomagający dla planistów i urbanistów pod kątem planowania przestrzennego w skali powiatu czy województwa. Niestety, mimo wielu zalet, otrzymana mapa ma również kilka niedoskonałości. Po pierwsze, dokładność danych użytych do modelowania była zbyt mała, aby wygenerować mapę podatności w skali 1:10 000. W efekcie nie może być wykorzy-

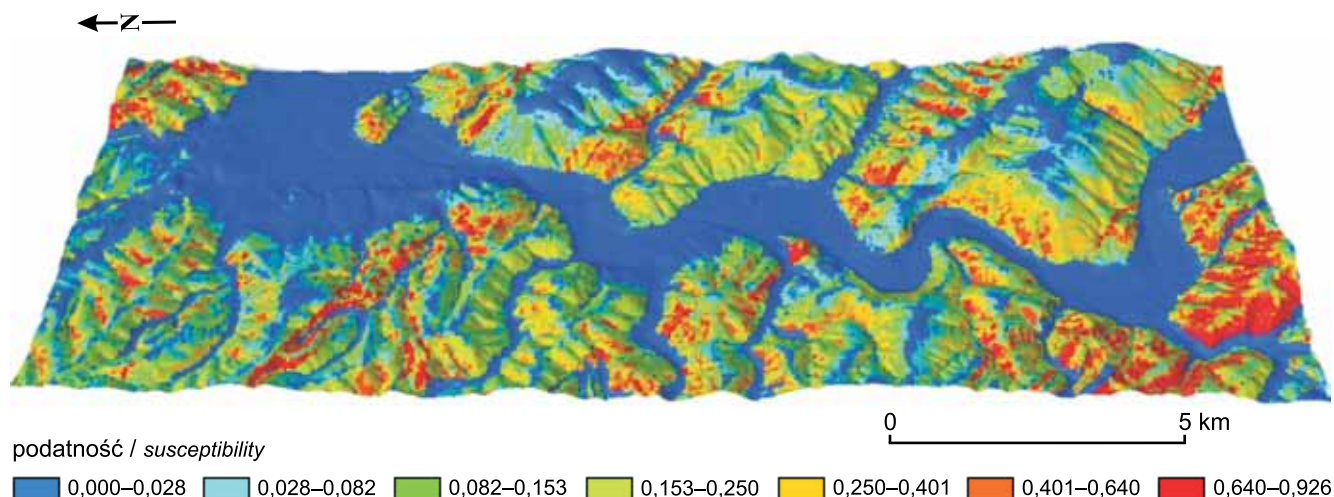


Fig. 4. Mapa podatności osuwiskowej, widok 2.5D

Landslide susceptibility map, 2.5D view

stywana do planowania przestrzennego w skali gminy. Po drugie, należałoby przetestować wpływ innych czynników biernych na podatność np. pierwszego poziomu wodonośnego. Po trzecie, modelowanie podatności powinno się przeprowadzić jeszcze innymi metodami statystycznymi, np. sieci neuronowych, w celu weryfikacji wyników otrzymanych metodą WoE.

Należy również zwrócić uwagę na fakt, że dolina Sanu jest obszarem niezwykle atrakcyjnym turystycznie. W związku z czym rozwija się tu budownictwo domków działkowych i innych budowli. Jest to także obszar intensywnie eksploatowany pod kątem wydobycia złóż żwirów. Zwiększył się też ruch samochodowy (ciężarowy) na drogach, będący również czynnikiem powodującym zwiększenie niestabilności gruntu.

WNIOSKI

1. Opracowana mapa podatności osuwiskowej przedstawia przestrzenne rozmieszczenie obszarów o różnym stopniu podatności na osuwanie. W zasięgu bardzo dużego zagrożenia znalazły się drogi, budynki mieszkalne oraz lasy.

2. Mapy podatności osuwiskowej w skalach regionalnych (np. 1:25 000) powinny być wykonywane pod kątem planowania przestrzennego w powiatach czy województwach.

3. Metoda Weights of Evidence (WoE), użyta do modelowania obszarów podatnych osuwiskowo w dolinie Sanu, otwiera dalsze możliwości badań, np. uwzględnienie innych czynników biernych do modelowania (pierwszy poziom wodonośny).

4. Otrzymana mapa podatności osuwiskowej jest podstawą do oceny ryzyka osuwiskowego w skali 1:25 000, jak również opracowania stopnia wrażliwości. Stopień strat (*vulnerability*) odnosi się do zniszczeń spowodowanych osuwaniem się. Przyjmuje się brak zniszczeń jako 0, a całkowite zniszczenie jako 1. Przy ocenianiu wrażliwości należy uwzględniać zarówno same elementy potencjalnie podlegające procesowi destrukcyjnemu, jak również dane ekonomiczne.

5. W przyszłości planuje się wykorzystanie danych z lotniczego skaningu laserowego do automatycznej inwentaryzacji osuwisk i do szacowania ryzyka osuwiskowego.

LITERATURA

- ARMAS I., 2011 — Weights of Evidence method for landslide susceptibility mapping. Prahova Subcarpathians, Romania. *Nat. hazard*, **6**: 31–38.
- BOBER L., 1984 — Rejony osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych i ich związek z budową geologiczną regionu. *Biul. Inst. Geol.*, **340**: 115–162.
- BOBER L., ZABUSKI L., 1993 — Flysch slope classification from viewpoint of the landslide prediction. Proc. Int. Symp. on Geotechnical Engineering of Hard Soil-Soft Rock. Rotterdam-Brookfield. AA. Balkema, vol. 2: 1065–1072.
- BONHAM-CARTER G.F., 1994 — Geographic information system for geoscientists: modeling with GIS. Computer methods in the geoscience, vol. 13. Pergamon press.
- BONHAM-CARTER G.F., AGTBERG F.P., WRIGHT D.F., 1988 — Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **54**, 11: 1585–1592.
- BONHAM-CARTER G.F., AGTBERG F.P., WRIGHT D.F., 1989 — Weight of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential. *W: Statistical applications in the earth sci-*

- ces (red. F.P. Agterberg, G.F. Bonham-Carter). Geological Survey of Canada, Paper 89-9: 171–183.
- CHUNG-JO F.C.H., FABBRI A., 2003 — Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazard*, **30**: 451–472.
- GLADE T., 2003 — Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Die Erde*, **134**: 123–146.
- HENKIEL A., 1977 — Zależność rzeźby Karpat zewnętrznych od budowy geologicznej jednostek fliszowych i ich głębokiego podłoża (na przykładzie wschodniej części Karpat polskich). UMCS, Lublin.
- KAMIŃSKI M., 2006 — Analiza Gis osuwisk dla wybranego obszaru Pogórza Dynowskiego. *Arch. Fotogr., Kartogr. Teledet.*, **16**: 279–287.
- KAMIŃSKI M., 2007 — Mapa podatności osuwiskowej – studium z rejonu Jodłówki (Pogórze Dynowskie). *Prz. Geol.*, **55**, 9: 779–784.
- KAMIŃSKI M., PIOTROWSKA K., 2003 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Kańczuga wraz z objaśnieniami. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- KAMIŃSKI M., PIOTROWSKA K., 2009 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Dynów wraz z objaśnieniami. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- KEMP L.D., BONHAM-CARTER G.F., RAINES G.L., 1999 — Arc-WofE: Arcview extension for weights of evidence mapping. Ottawa, Canada. <http://ntserv.gis.nrcan.gc.ca/wofe>
- KEMP L.D., BONHAM-CARTER G.F., RAINES G.L., LOONEY C.G., 2001 — Arcview extension for spatial data modeling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural analysis. <http://ntserv.gis.nrcan.gc.ca/sdm/>.
- KLIMASZEWSKI M., 1965 — Views on the geomorphological development of the Polish West Carpathians in Tertiary times. *W: Geomorphological problems of Carpathians*, vol. I: 91–121. VEDA, Bratislava.
- LEE S., CHOI J., MIN K., 2002 — Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. *Environ. Geol.*, **43**: 1–2.
- MROZEK T., POLI S., STERLASCCHINI S., ZABUSKI L., 2004a — Landslide susceptibility assessment. A case study from the Beskid Niski Mts., Carpathians. Poland International Conference Risks Caused by the Geodynamic Phenomena in Europe. *Pol. Geol. Inst. Spec. Pap.*, **15**: 10.
- MROZEK T., WÓJCIK A., GRANOSZEWSKI W., 2004b — Lithological conditioning of landsliding with examples from Beskid Mts., Western Carpathians, Poland (abstract) 32. International Geological Congress: 885. Florence.
- RAJCHEL J., 1989 — Budowa geologiczna doliny Sanu w rejonie Dynów–Dubiecko. *Biul. Inst. Geol.*, **361**: 11–53.
- RAUCH M., SOKOŁOWSKI T., 2009 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Błazowa wraz z objaśnieniami. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- RAUCH M., ZUCHIEWICZ W., 2009 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Bircza wraz z objaśnieniami. Centr. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- RĄCZKOWSKI W., MROZEK T., 2002 — Activating of landsliding in the Polish Flysch Carpathians by the end of the 20th century. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcanica*, **36**: 91–111.
- REMONDO J., GONZALES A., de TERAN J.R.D., FABBRI A., CHUNG C.J., 2003 — Validation of landslide susceptibility maps; examples and applications from a case study in northern Spain. *Natural Hazards*, **1**: 1–13.
- STARKEL L., 1972 — Karpaty zewnętrzne. *W: Geomorfologia Polski* (red. M. Klimaszewski), T. 1: 52–115. PWN, Warszawa.
- van WESTEN C.J., RENGERS N., SOETERS R., 2003 — Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, **30**: 399–419.
- WDOWIARZ S., 1939 — Budowa geologiczna Karpat w okolicy Dynowa. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **10**: 1–24.
- WÓJCIK A., ZIMNAL Z., 1996 — Osuwiska wzdłuż doliny Sanu między Bachórczem a Reczpołem. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **374**: 77–91.
- ZABUSKI L., THIEL K., BOBER L., 1999 — Osuwiska we fliszu Karpat polskich. Geologia, modelowanie, obliczenia stateczności. IBW PAN, Gdańsk.

SUMMARY

In this article showed using the statistical methodology known as “weights of evidence” to create landslide susceptibility maps. The study area is located on the Dynów foothills in the valley of the San in the south-eastern part of the Polish. Dynów Foothills is a part of area the Carpathians where landslides are phenomena commonly occurring. For this reason landslide susceptibility maps are important for spatial planning in communities and counties, and landslide risk assessment.

Landslide hazard mapping is often performed through the identification and analysis of hillslope instability factors, usually managed as thematic data within geographic information system (GIS). In heuristic approaches, these factors are rated by the attribution of scores based on the assumed role played by each of them in controlling the development of a sliding process. Other more refined methods, based on the principle that the present and the past are keys to the future, have also been developed, thus allowing less subjective

analyses in which landslide susceptibility is assessed by the statistical relationships between past landslide events and hillslope instability factors.

The weights of evidence method has been implemented by means of the ArcGis10 software and the ArcSDM extension (Spatial Data Modeller). Like all the statistical methodologies, this method requires to identify and to locate on a map all the instability phenomena which affected the studied area. On the basis of territorial distribution of the past and present landslides the method calculates the weights to be assigned to the single classes of every considered parameter. GIS was used to model passive five factors: lithology, tectonic, slope, exposure and altitude.

Two subsets have been so created: the training set and the Validation set. Then a statistical analysis of different parameters has been carried out, using the weights of evidence method, and the weights to be attributed to each class single parameter have been then obtained.

