PRACE
PAŃSTWOWEGO
INSTYTUTU
GEOLOGICZNEGO

Teresa Mrozek

Zagrożenie i ryzyko osuwiskowe w rejonie Szymbarku (Beskid Niski)

Landslide hazard and risk for a case-study of Szymbark region (Beskid Niski Mts)

Tom 199

Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2013

Niniejsza publikacja jest skrótem pracy doktorskiej autorki pt. „Ocena zagrożenia osuwiskowego i związanego z nim ryzyka przy wykorzystaniu metod GIS, na przykładzie okolic Szymbarku, Beskid Niski", obronionej w Państwowym Instytucie Geologicznym – Państwowym Instytucie Badawczym. W pracy doktorskiej (2008 r.) zawarto pełen opis zastosowanych metod obliczeniowych, w tym metody **Weights of Evidence (WoE)** oraz **Empirical Likelihooh Ratio (ELR)** oraz przedstawiono **pionierskie w Polsce wykorzystanie tych metod** w zakresie wyznaczania podatności na osuwanie i zagrożenia osuwiskowego. Również po raz pierwszy przedstawiono ilościową ocenę ryzyka osuwiskowego w skali zlewni. Niniejsza publikacja syntetyzuje te zagadnienia, a ze względu na cykl redakcyjny ukazuje się dopiero w 2013 roku.

SPIS TREŚCI

Wstęp 5

Materiały i zarys metod badań 6

Charakterystyka obszaru badań 8

- Lokalizacja obszaru badań 8
- Uwarunkowania geologiczne 8
  - Jednostka magurska 8
  - Jednostka śląska 11
- Uwarunkowania geomorfologiczne 11
- Warunki hydrometeorologiczne 11
- Użytkowanie terenu i funkcje ekonomiczne obszaru badań 12

Charakterystyka osuwisk na obszarze badań 12

- Rozmieszczenie osuwisk 12
- Główne typy osuwisk, ich liczebność i wielkość 13
- Relacja osuwisk do nachylenia stoków i utworów podłoża 14
- Współczesne ruchy osuwiskowe 16

Analiza podatności na osuwanie i zagrożenia w rejonie Szymbarku 17

- Zastosowane metody 17
- ELR – zasada modelowania 19
- Analiza i sporządzenie mapy zagrożeń metodą ELR 22
- Porównanie wyników 26
  - Mapy podatności osuwiskowej 26
  - Mapy zagrożenia osuwiskowego 26

Ryzyko osuwiskowe na obszarze badań 27

- Elementy eksponowane na oddziaływanie ruchów masowych, ich identyfikacja i wartość odtworzeniowa 27
- Wrażliwość (*vulnerability*), czyli stopień strat lub stopień uszkodzenia – sposób oszacowania na obszarze badań 28
- Mapa ryzyka – dyskusja wyników 30
- Analiza scenariuszy ryzyka na obszarze badań 30

Uwagi końcowe 32

Literatura 34

Summary 38

Teresa MROZEK
Państwowy Instytut Geologiczny –
Państwowy Instytut Badawczy
Oddział Karpacki
ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków
e-mail: teresa.mrozek@pgi.gov.pl

Abstrakt. W pracy przedstawiono ilościową ocenę zagrożenia osuwiskowego i związanego z nim ryzyka w testowym rejonie Karpat fliszowych (okolice Szymbarku w Beskidzie Niskim). Wykorzystano równanie Varnesa i schemat metodyczny, pokazujący etapy takiej oceny: od inwentaryzacji osuwisk, przez wyznaczenie podatności na osuwanie i zagrożenia, aż po oszacowanie ryzyka na badanym obszarze. W ten sposób po raz pierwszy w polskiej literaturze dokonano oceny ryzyka osuwiskowego w sposób kompleksowy. Do wyznaczenia podatności na osuwanie i zagrożenia wykorzystano techniki GIS i metodę ELR (*Empirical Likelihood Ratio*) należącą do klasy funkcji sprzyjania (*Favouribility Function*). Przeprowadzone modelowanie wykazało przydatność zastosowanych metod do przewidywania zagrożeń w skali obszaru badań (modelowanie w dużej skali – 1:10 0000). Wrażliwość (*vulnerability*) oszacowano na podstawie wskaźnika odnoszącego koszt napraw do kosztów odtworzenia obiektu. Z kompilacji map zagrożenia i potencjalnych strat powstała mapa ryzyka osuwiskowego dla obszaru badań. Przeprowadzona analiza strat i korzyści w przypadku zagrożenia osuwiskowego wykazała duży (nawet 20%) udział strat pośrednich w stosunku do strat bezpośrednich. Wynika z tego, że straty pośrednie nie mogą być pomijane przy oszacowaniu ryzyka osuwiskowego i powinny by uwzględniane w planowaniu przestrzennym.

Słowa kluczowe: podatność na osuwanie i zagrożenie, modelowanie prognostyczne, ELR – funkcja empirycznego ilorazu wiarygodności, stopień strat i oszacowanie ryzyka, okolice Szymbarku w Beskidzie Niskim.

WSTĘP

Ruchy masowe są współcześnie zachodzącymi procesami morfogenetycznymi, a w wielu rejonach przypisuje się im nawet dominujące znaczenie rzeźbotwórcze (m.in. Starkel, 1960; Kotarba, 1986; Pasuto, Soldati, 1999). Należy je jednak rozważać nie tylko w kategoriach transformacji rzeźby, ale również jako geozagrożenia (m.in. Varnes, 1984; Brabb, Harrod, 1989; Starkel, 2006). Ma to szczególne znaczenie zwłaszcza w takich miejscach, gdzie prowadzą one do degradacji zasobów środowiskowych oraz dewastacji dóbr, z których korzysta człowiek. Niestety w odróżnieniu od np. powodzi czy trzęsień ziemi niebezpieczeństwo wynikające z procesów osuwania było często niedostrzegane lub ignorowane, chociaż już pod koniec XX wieku Brabb i Harrod (1989) wskazywali, że straty wywołane przez procesy osuwiskowe są porównywalne lub nawet mogą być większe niż w przypadku innych geozagrożeń.

W Polsce na występowanie ruchów masowych duży wpływ ma zróżnicowanie warunków geośrodowiskowych i czynników sprawczych (Ostaficzuk, 1999), przy czym koncentrują się one przede wszystkim w Karpatach fliszowych (Mrozek i in., 2000; Poprawa, Rączkowski, 2003; Rączkowski, 2003). W tym też rejonie skutki tych procesów są najbardziej odczuwalne.

Chociaż istnieją liczne prace dotyczące rożnych aspektów problematyki osuwiskowej w Karpatach (m.in. Starkel, 1960, 1996, 2006; Ziętara, 1969, 1988; Oszczypko, 1971; Bober, 1984; Wójcik, 1997; Zabuski i in., 1999; Margielewski, 2001, 2004, 2009; Poprawa, Rączkowski, 2003; Rączkowski, 2003), to zagrożenie osuwiskowe i destruktywne skutki ruchów masowych były rozważane sporadycznie (Zuber, Blauth, 1907; Pitułko, 1913; Poprawa, Rączkowski, 1999; Bajgier-Kowalska, 2006). Przez wiele lat problematyka ruchów masowych i ich skutków stanowiła bowiem odrębny przedmiot zainteresowania specjalistów z dziedziny nauk przyrodniczych lub inżynierskich (Pulinowa, 1972), którzy albo koncentrowali się na badaniach zmian geo-

środowiskowych albo na analizie mechanizmu osuwania i możliwości zastosowania zabezpieczenia geotechnicznego konkretnego obiektu poddanego oddziaływaniu osuwisk.

Punkt zwrotny nastąpił dopiero w 1997 r., kiedy to po obfitych i intensywnych lipcowych opadach deszczu nasiliły się procesy osuwiskowe o znacznym zasięgu terytorialnym (dawne woj. nowosądeckie i tarnowskie). Doszło wówczas do bardzo dużej dewastacji elementów środowiska oraz zagospodarowania terenu (Poprawa, Rączkowski, 1999). Zauważono wtedy problemy wynikające z potrzeby ograniczania strat z jednej strony oraz konieczności zamieszkiwania i gospodarowania na terenach podatnych na osuwanie z drugiej strony, a także dostrzeżono potrzebę rzetelnej oceny ryzyka osuwiskowego.

Dążenie do ograniczania strat spowodowanych ruchami masowymi wymaga zarówno zrozumienia przyczyn (wskazania czynników), które mogą prowadzić do potencjalnie niszczących ruchów masowych, jak i szczegółowej wiedzy na temat gęstości zaludnienia, zabudowy, infrastruktury, działalności gospodarczej itp. oraz informacji o efektach oddziaływania poszczególnych ruchów masowych na te elementy. W międzynarodowej literaturze osuwiskowej jest to zwykle oparte na zależności funkcyjnej Varnesa (1984), która łączy ryzyko osuwiskowe z zagrożeniem oraz z elementami, na które to zagrożenie oddziałuje. Punktem wyjścia jest identyfikacja (rejestracja) osuwisk i sporządzenie mapy pokazującej obszary szczególnie podatne na osuwanie (Brabb, 1984). Mapy te, w odróżnieniu od map zagrożenia, nie zawierają informacji dotyczących czasu lub wielkości przewidywanych wydarzeń osuwiskowych (Carrara i in., 1995, 1999; Guzzetti i in., 2005). Stosowane są różne sposoby opracowania takich map, obejmujące metody bezpośrednie (eksperckie), statystyczne i deterministyczne (m.in. van Westen, 1993; Carrara i in., 1995, 1999; Soeters, van Westen, 1996; Aleotti, Chowdhury, 1999; Guzzetti i in., 2005; Haubin i in., 2005). Kolejne etapy procedury oceny ryzyka koncentrują się na określeniu elementów i ich wrażliwości na destrukcyjne oddziaływanie ruchów masowych (m.in. Glade, 2003; Remondo i in., 2004, 2005). W polskiej literaturze przedmiotu nacisk jest kładziony głównie na wyznaczanie stref podatności na osuwanie (np. Kamiński, 2007; Długosz, 2009), natomiast kwestie dotyczące zagrożenia i ryzyka są pomijane.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie ilościowej oceny zagrożenia osuwiskowego i związanego z nim ryzyka na obszarze testowym w masywie fliszu karpackiego (rejon Szymbarku w Beskidzie Niskim). Za wyborem obszaru badań w okolicach Szymbarku przemawia jego reprezentatywność jako terenu osuwiskowego (Zabuski i in., 1999) oraz dostępność różnorodnych danych źródłowych potrzebnych do modelowania statystycznego i ocen ilościowych.

W pracy pokazano również przydatność stosowania metod statystycznych i technik GIS do ilościowej oceny zagrożenia i ryzyka nawet w przypadku stosunkowo niewielkiego obszaru badań i przy wykorzystaniu map w dużej skali (1:10 000). W przypadku omawianego obszaru wykorzystano opracowaną przez Chunga i Fabbriego (1999, 2003, 2005) metodę statystyczną, należącą do grupy technik wielowymiarowych.

Opracowanie mapy podatności na osuwanie i zagrożenia osuwiskowego stanowi podstawę do oceny ryzyka osuwiskowego, włącznie z analizą scenariuszy. Zastosowana procedura przedstawia etapy procesu prowadzącego do oceny ryzyka, co może być wykorzystane przy wypracowywaniu przedsięwzięć ograniczających potencjalne straty oraz do wspomagania procesu podejmowania decyzji z zakresu planowania przestrzennego.

Jest to pierwsze w polskiej literaturze osuwiskowej kompleksowe opracowanie pokazujące powiązania między zagrożeniem a ryzykiem osuwiskowym zgodnie ze schematem:

inwentaryzacja osuwisk → podatność na osuwanie → zagrożenie → ryzyko

MATERIAŁY I ZARYS METOD BADAŃ

W niniejszej pracy w odniesieniu do zagrożenia i ryzyka osuwiskowego przyjęto terminologię opartą na koncepcji Varnesa (1984) i powszechnie używaną w anglojęzycznej literaturze przedmiotu (Brabb, 1984; Einstein, 1988; Aleotti, Chowdhury, 1999; AGS, 2000; Glade, 2003; van Westen, 2004; Crozier, Glade, 2005). Ponieważ stosowane terminy bywają często mylone lub używane zamiennie, poniżej przypomniano ich znaczenie:

- ***H* – zagrożenie** (*hazard*) – prawdopodobieństwo wystąpienia potencjalnie destruktywnego zjawiska (osuwania) na danym obszarze i w danym przedziale czasu.
- ***HS* – podatność na osuwanie** (*susceptibility*) – możliwość wystąpienia destruktywnego zjawiska (ruchu masowego) na danym obszarze ze względu na istniejące tam specyficzne warunki środowiskowe; podatność na osuwanie nie uwzględnia prawdopodobieństwa zajścia wydarzenia, które zależy także od powtarzalności czynników sprawczych (*triggering factors*), takich jak np. opady lub impuls sejsmiczny.
- ***V* – wrażliwość** (*vulnerability*) czyli **stopień uszkodzenia lub procent strat** – w literaturze dotyczącej zagadnień ruchów masowych oznacza stopień (procent) uszkodzenia (zakres potencjalnej straty), wynikający z wystąpienia danego destruktywnego zjawiska o określonej wielkości (sile oddziaływania) oraz z odporności elementu na oddziaływanie tego zjawiska; jest wyrażany liczbą z przedziału 0–1, gdzie 1 oznacza całkowite zniszczenie, a 0 oznacza, że dany obiekt pozostał nienaruszony.
- ***E* – element podlegający ryzyku** lub **element eksponowany, narażony na destrukcję bądź zniszczenie** (*element at risk*) – oznacza ludność, parcele, zabudowania

prywatne i publiczne, infrastrukturę, działalność gospodarczą z włączeniem w to usług i transportu, które są narażone na oddziaływanie niebezpiecznego wydarzenia na danym obszarze.

- R_s **– ryzyko specyficzne lub składowe (cząstkowe)** (*specific risk*) – oznacza przewidywaną wielkość strat w wyniku zajścia konkretnego destruktywnego zjawiska naturalnego (np. zsuwu, spływu gruzowego itp.) – zawiera się tu kompilacja analizy częstości i analizy konsekwencji.
- R_t **– ryzyko całkowite** – oznacza przewidywaną liczbę ofiar śmiertelnych lub osób z uszczerbkiem zdrowia oraz wielkość zniszczenia dóbr i zaburzenia działalności gospodarczej w wyniku wystąpienia destruktywnego zjawiska.

Ogólnie ryzyko może być wyrażone wzorem:

$$Ryzyko = \sum_i \left(H_i \sum_j \left(V_{i,j} \cdot E_j \right) \right), \qquad [1]$$

gdzie H_i oznacza zagrożenie przez *i*-ty niszczący proces, a iloczyn $V_{i,j} \cdot E_j$ oznacza konsekwencje wynikające z potencjalnego zajścia niebezpiecznego wydarzenia *i* dla obiektu *j*, przy czym E_j odnosi się zwykle do kosztów poszczególnych eksponowanych obiektów *j*, a $V_{i,j}$ to wrażliwość (*vulnerability*) obiektu *j* na niszczący proces *i*.

Równanie [1] jest złożone, ponieważ każdy z wyrazów równania stanowi odrębne zagadnienie do rozwiązania. Ze względu na tę złożoność (van Westen i in., 2006, 2008) stosuje się i wykorzystuje etapową procedurę wyznaczenia ryzyka osuwiskowego, która obejmuje:

– analizę dotychczasowych ruchów masowych, ich inwentaryzację i opracowanie mapy rozmieszczenia osuwisk (*occurence map*);
– analizę i ocenę parametrów środowiskowych, czyli czynników pasywnych (*causative factors*), oraz ich opracowanie w postaci map tematycznych (mapy: spadków, geologiczne, użytkowania terenu itp.);
– ocenę podatności na osuwanie i zagrożenia oraz wyznaczenie stref zagrożeń;
– ocenę stopnia uszkodzenia zasobów danego obszaru (gruntu, dóbr materialnych itp.) na skutek oddziaływania ruchów masowych;
– obliczenie lub oszacowanie (ocenę skali) ryzyka.

Taka procedura wyznaczenia ryzyka na obszarze badawczym stanowi podstawy metodyczne tej publikacji.

Niniejsza monografia streszcza najważniejsze rezultaty pracy doktorskiej autorki (Mrozek, 2008), wykonanej na podstawie badań statutowych i w ramach projektu ALARM.

Wykorzystane materiały i dane wyjściowe pochodzą z prac badawczych zespołu Oddziału Karpackiego Państwowego Instytutu Geologicznego – PIB (OK PIG-PIB), przeprowadzonych wraz z zespołami Stacji Naukowej Instytutu Geografii Przestrzennego Zagospodarowania PAN (IGiPZ PAN) w Szymbarku oraz Instytutu Budownictwa Wodnego Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku (IBW PAN) w ramach projektu „ALARM – Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas" w Piątym Programie Ramowym Unii Europejskiej (V PR UE), a także przy współudziale WGiSR Uniwersytetu Warszawskiego i Akademii Ekonomicznej w Krakowie. Badania te były prowadzone w latach 2001–2004.

Sporządzenie aktualnej mapy rozmieszczenia osuwisk na badanym obszarze wymagało weryfikacji wcześniejszej mapy tego rejonu (Kotarba, 1970, 1986), a w przypadku niektórych części obszaru – opracowania kartograficznego od podstaw. Szczegółowe kartowanie terenowe osuwisk w skali 1:5000 przeprowadzone na obszarze badań umożliwiło opracowanie mapy inwentaryzacyjnej, przedstawiającej rozkład przestrzenny osuwisk wraz z ich klasyfikacją.

Mapa litostratygraficzna powstała na podstawie terenowego zdjęcia geologicznego wykonanego w skali 1:5000, a także reinterpretacji istniejących dla tego regionu map geologicznych w mniejszych skalach. Podobnie opracowano mapę utworów powierzchniowych.

Wykorzystana w pracy mapa użytkowania terenu została sporządzona przez zespół Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego.

W celu zachowania spójności opracowania wszystkie mapy autorskie zgeneralizowano do skali 1:10 000, a następnie zdigitalizowano, przyjmując jako referencyjny układ 1992.

Parametry geometrii stoków, rozumiane jako wysokość i nachylenie, a także ekspozycję stoków, uzyskano z cyfrowego modelu terenu (NMT) o rozdzielczości 10 m.

Materiały kartograficzne i odpowiadające im dane atrybutowe wprowadzono do systemu zarządzania danymi (GIS-DBMS) i przetwarzano, wykorzystując możliwości systemu wektorowego ArcInfo/ArcView® oraz systemu rastrowego ILWIS®. Opracowane mapy stanowią warstwy monotematyczne, wykorzystane następnie w analizach podatności na osuwanie i zagrożenia. Przy wyznaczaniu zagrożenia osuwiskowego na obszarze badań zastosowano wielowymiarową metodę modelowania przestrzennego z pakietu SPMS (*Spatial Prediction Modelling System*), wykorzystującą funkcję empirycznego ilorazu wiarygodności (*Empirical Likelihood Ratio ELR*).

Ze względu na złożoność zagadnienia założenia i opis zastosowanych procedur obliczeniowych podatności na osuwanie i zagrożenia przedstawiono w dalszych częściach monografii, bezpośrednio przy omawianiu poszczególnych etapów przedstawionego wyżej schematu wyznaczania ryzyka osuwiskowego.

Warto zaznaczyć, że elementy eksponowane przedstawiono także jako warstwy tematyczne, opracowane osobno dla poszczególnych kategorii (np. drogi stanowią niezależną warstwę w stosunku do wodociągów czy zabudowań). Każda z warstw zawierała dane kategoryzowane wraz z przypisanymi im tabelami atrybutów, które uwzględniają cechy obiektów (np. drogi podzielono według kryterium ich ważności oraz rodzaju nawierzchni, gazociągi – według znaczenia magistrali i rodzaju materiału itd.). Do ich przetwarzania wykorzystano program ILWIS 3.2® .

Informacje o częstości ruchów masowych oraz dane hydrometeorologiczne pochodzą z obserwacji prowadzonych przez Stację Naukową IGiPZ PAN w Szymbarku koło Gorlic. Dane te obejmują lata 1969–2003. O ile dane hydrometeorologiczne stanowią ciąg wyników pomiarów instrumentalnych prowadzonych przez tę stację, to aktywność i ruch osuwisk zestawiono na podstawie obserwacji.

Dane dotyczące zagospodarowania regionu pochodzą z materiałów GUS (w tym ze spisu powszechnego w 2002 r.), opracowań specjalistów Akademii Ekonomicznej w Krakowie (K. Mendys, S. Mendys, informacja ustna, 2004) oraz z udostępnionych zasobów Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego (M. Soja, informacja ustna, 2004). Szczegółowe dane o zabudowie mieszkaniowej i gospodarczej oraz zniszczeniach osuwiskowych na obszarze badań zebrano podczas ankietowania przeprowadzonego w ramach projektu ALARM w 2003 r. Wykorzystano w tym celu specjalnie ułożony kwestionariusz autorstwa W. Bochenka i T. Mrozek. Dane o lokalizacji infrastruktury liniowej oraz o kosztach napraw uzyskano od służb komunalnych, natomiast dane o zakresie zniszczeń związanych z ruchami masowymi odtworzono na podstawie informacji przekazanych przez pracowników Stacji Badawczej IGiPZ PAN i służb komunalnych.

W celu uzyskania wyników przedstawionych w niniejszej monografii korzystano z licencjonowanych programów: ArcView v. 3.2 (licencja dla Uniwersytetu Biccoca w Mediolanie współuczestniczącego w projekcie ALARM) i ArcInfo v. 8.2 firmy ESRI (licencja dla OK PIG-PIB), ILWIS v. 3.1 i 3.2 (licencja dla OK PIG) oraz SPMS i SRA v. 1.1 firmy SpatialModels Inc. (licencja na lata 2004–2006 dla OK PIG-PIB).

CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

LOKALIZACJA OBSZARU BADAŃ

Obszar badań znajduje się w Karpatach fliszowych na granicy Beskidów i Pogórza Karpackiego (Starkel, 1972), pomiędzy Grybowem a Gorlicami, w pobliżu miejscowości Szymbark. Obejmuje zlewnie potoków Bystrzanki i Biczysk oraz znajdujące się między nimi przyrzecze Ropy, a tym samym należy do północno-zachodniej części Beskidu Niskiego oraz graniczy z Dołami Jasielsko-Sanockimi (Obniżenie Gorlickie). Badany obszar zajmuje powierzchnię ok. 17,5 km^2 (fig. 1).

Pod względem administracyjnym badany obszar należy do gminy wiejskiej Gorlice i obejmuje znaczną część wsi Szymbark, Bystra i Ropica Polska. W stosunku do szlaków komunikacyjnych jest on położony na północ od drogi krajowej nr 28, przy odcinku Grybów–Gorlice, a swym zasięgiem pokrywa tereny położone na południowy zachód i północny wschód od drogi powiatowej Szymbark–Bystra–Szalowa (fig. 2).

UWARUNKOWANIA GEOLOGICZNE

Zwięzłe opisy budowy geologicznej można znaleźć w opracowaniach dotyczących środowiska naturalnego okolic Szymbarku (m.in. Kotarba, 1970; Gil, 1979, 1994b), natomiast syntetyczny obraz geologii tego terenu zawiera arkusz Jasło *Mapy Geologicznej Polski w skali 1:200 000* (Nescieruk i in., 1995; Rączkowski i in., 1995), a także arkusze Gorlice (Kopciowski i in., 1997) i Rzepiennik (Jankowski, 1997) *Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1:50 000*. Przedstawiony poniżej zarys budowy geologicznej obszaru badań dodatkowo uwzględnia materiały zebrane podczas przeprowadzonego kartowania geologicznego.

Obszar badań znajduje się w strefie, w której czoło jednostki magurskiej tworzy wysunięty ku północy fragment, znany jako półwysep Łużnej. Złuskowane fałdy fliszu znajdujące się na północny zachód od doliny Ropy są pocięte uskokami i wtórnie sfałdowane. W rejonie Gorlic płaszczowina magurska nasuwa się płasko na niższą jednostkę – płaszczowinę śląską (Kozikowski, 1956; Sikora, 1970; Świdziński, 1973). Utwory płaszczowiny śląskiej pojawiają się w oknach tektonicznych w okolicach wsi Bystra w zlewni Bystrzanki oraz przed czołem nasunięcia. Do jednostki magurskiej (obejmującej prawie 93% obszaru badań) zalicza się utwory kredowe i paleogeńskie, które są reprezentowane przez warstwy inoceramowe, warstwy przejściowe, łupki pstre z piaskowcami ciężkowickimi, łupki podmagurskie i piaskowce magurskie. Na jednostkę śląską składają się natomiast paleogeńsko-oligoceńskie piaskowce i łupki warstw krośnieńskich (fig. 3).

Jednostka magurska

Warstwy inoceramowe stanowią tu najstarsze utwory (mastrycht–paleocen) odsłaniające się na powierzchni. Są one wykształcone w postaci cienko- i średnioławicowych piaskowców z wkładkami łupków i niekiedy margli. Ponieważ udział piaskowców i łupków w budowie tego ogniwa jest zbliżony, warstwy inoceramowe zaliczono do tzw. fliszu normalnego (Bober, 1984; Bober, Zabuski, 1993). Trzeba jednak zaznaczyć, że czasami w obrębie tej serii skalnej, zwłaszcza w górnej części profilu, występują przeławicenia o miąższości od kilku do kilkunastu metrów, w których przeważają piaskowce. Wychodnie tego ogniwa litostratygraficznego na badanym obszarze zajmują znaczną powierzchnię (ok. 61%) i budują zachodnie i częściowo wschodnie zbocza doliny Bystrzanki oraz fragment grzbietu Jeleniej Góry i Maślanej Góry, a w środkowej części zlewni Biczysk – północno-wschodnie stoki Taborówki.

Łupki pstre (eocen) oraz **łupki podmagurskie** (górny eocen) stanowią ogniwa, w których wyraźnie przeważają łupki, a piaskowce występują podrzędnie. Miąższość poszczególnych ławic piaskowcowych przeważnie wynosi

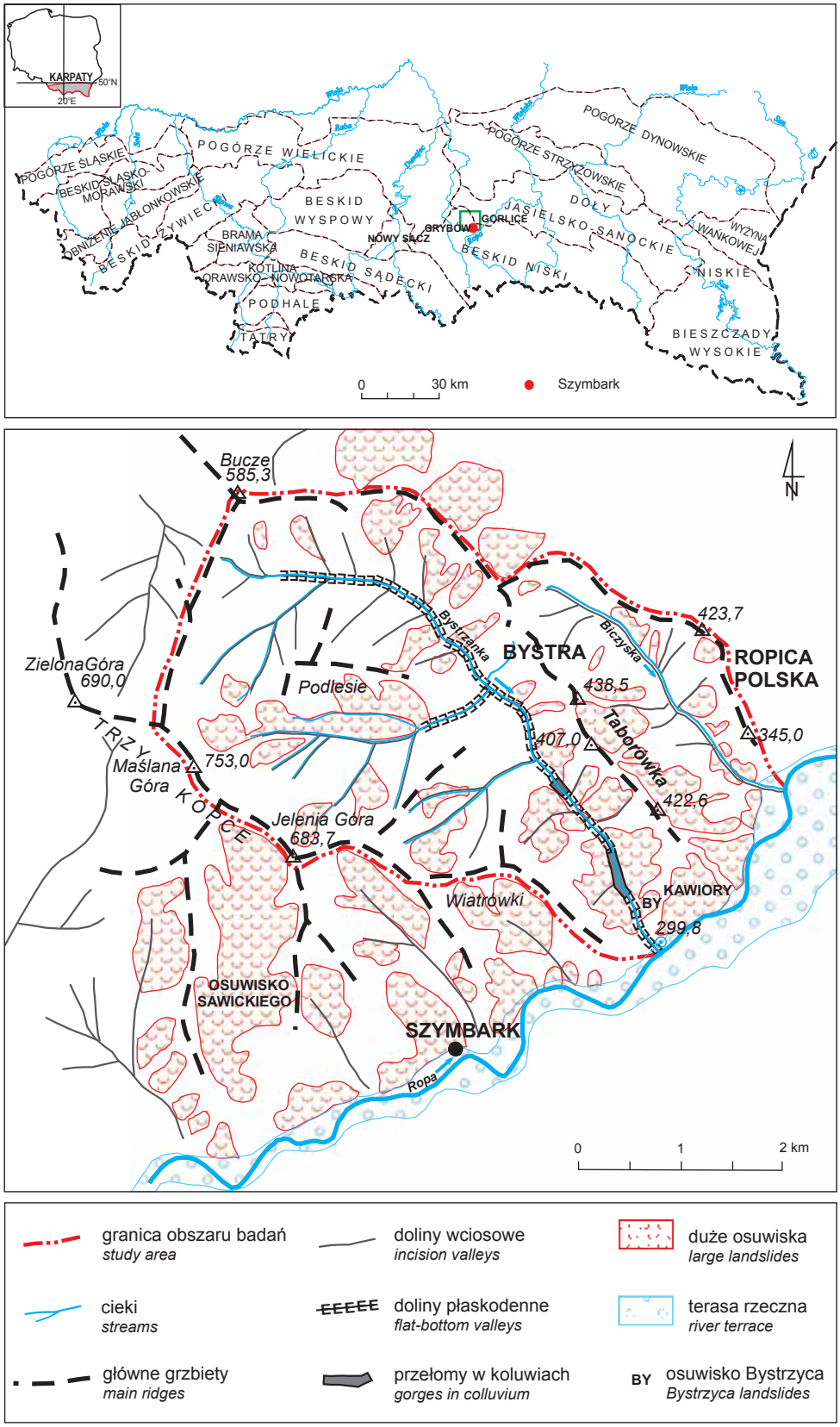


Fig. 1. Obszar badań i jego położenie na tle podziału geomorfologicznego Karpat

Study area and its location relative to geomorphologic units of the Carpathians

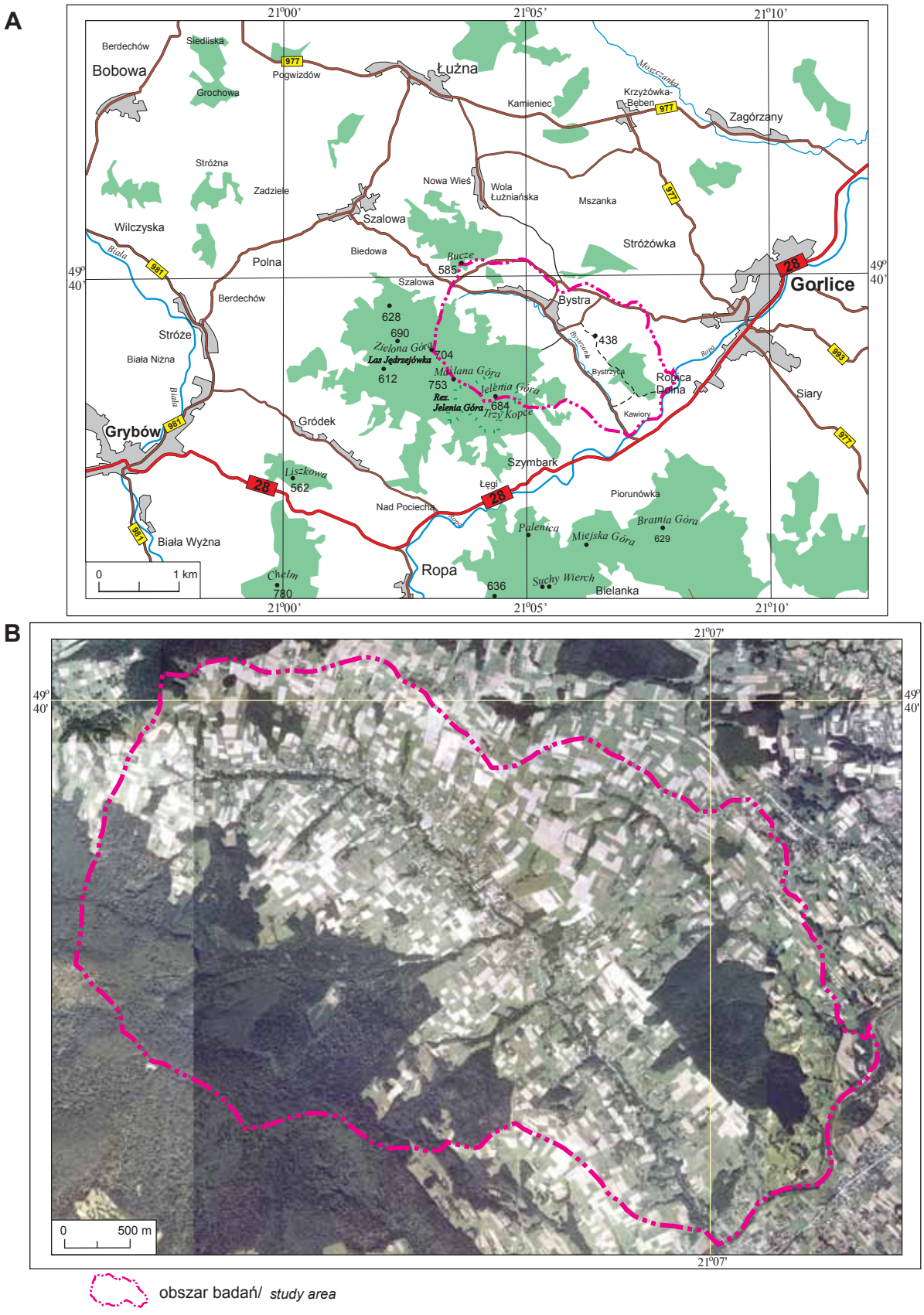


Fig. 2. Położenie obszaru badań w stosunku do większych miejscowości regionu (A) oraz charakter zagospodarowania terenu (B)

Study area location relative to larger cities of the region (**A**) and landuse pattern (**B**)

1–10 cm. Łupki pstre reprezentują flisz ilasto-łupkowy, uznawany za mało odporny na czynniki degradujące, a bardzo podatny na osuwanie (Bober, 1984). Na obszarze badań utwory te w strefie brzeżnej budują południowe stoki Taborówki (przyrzecze Ropy), a na jej grzbiecie podścielają warstwy krośnieńskie i sięgają na zachodnie stoki. Tworzą też wschodnie stoki grzbietu Bucza.

Piaskowce ciężkowickie (dolny eocen) są wykształcone jako gruboławicowe piaskowce i niekiedy zlepieńce przeławicone cienkimi wkładkami łupków, w tym łupków pstrych. Tworzą one flisz piaskowcowy, zaliczany co prawda do utworów bardziej odpornych, ale także łatwo ulegający przemieszczeniom, szczególnie przy niekorzystnym układzie warstw w stosunku do nachylenia stoku (Bober, Zabuski, 1993). Piaskowce te wypełniają synkliny i budują północno-wschodnie stoki Maślanej Góry.

Piaskowce (warstwy) magurskie stanowią najmłodsze ogniwo płaszczowiny magurskiej (górny eocen–oligocen), w którym zaznacza się wyraźna przewaga piaskowców nad łupkami. Wypełniają one synkliny na obszarze płaszczowiny magurskiej, a wykształcone jako piaskowce glaukonitowe budują partie szczytowe i częściowo północno-wschodnie stoki grzbietu Jeleniej Góry i Maślanej Góry.

Jednostka śląska

Jednostka śląska jest reprezentowana przez najmłodsze warstwy krośnieńskie, w których obrębie wyróżniono łupki krośnieńskie oraz piaskowce i łupki krośnieńskie.

Łupki krośnieńskie (oligocen–dolny miocen) reprezentują flisz łupkowy również podatny na osuwanie i ukazują się w oknie tektonicznym w rejonie Bystrej oraz przed czołem nasunięcia w dolinie potoku Biczyska.

Piaskowce i łupki krośnieńskie (oligocen) są włączane do tzw. fliszu normalnego (Bober, Zabuski, 1993; Zabuski i in., 1999), a na obszarze badań występują w strefie brzeżnej i w dolnej części zlewni Biczysk, schodzą na terasę doliny Ropy.

Należy podkreślić, że występują tu silnie zaburzenia tektonicznie związane z bliskością strefy kontaktu płaszczowin. Jedną z ważniejszych dyslokacji jest system uskokowy Ropy. Liczne mniejsze dyslokacje (uskoki zrzutowo-przesuwcze o biegu NE–SW) przecinają strefę synklinalną grzbietu Jeleniej Góry i Maślanej Góry. Te uwarunkowania tektoniczne oraz zróżnicowana litologia wpływają na cechy rzeźby.

UWARUNKOWANIA GEOMORFOLOGICZNE

Pod względem morfologicznym na obszarze badań można wyróżnić dwa poziomy wyniesień zorientowanych prawie równolegle względem siebie, a przebiegających z północnego zachodu na południowy wschód (fig. 1). Wyższy poziom jest utworzony przez grzbiet zwany niekiedy grzbietem Trzech Kopców z kulminacjami Jeleniej Góry (684 m n.p.m.), Maślanej Góry (753 m n.p.m.) i Zielonej Góry (690 m n.p.m.) – ta ostatnia znajduje się już poza granicami obszaru badań omawianego w tej pracy. Według Kotarby (1970) jest to grzbiet górski reprezentujący rzeźbę beskidzką. Wierzchowina tego grzbietu jest falista z niewielkimi deniwelacjami, natomiast stoki są strome (nachylenie przekracza nawet 25°), co jest związane z obecnością piaskowców magurskich. Niższy poziom, zaliczany przez Kotarbę (1970) do elementów rzeźby pogórskiej, obejmuje: garb Wiatrówek–Podlesia (465–510 m n.p.m.) w zlewni Bystrzanki, pagóry Taborówki (422,6–438,5 m n.p.m.) i Bucza (585 m n.p.m.) w strefie wododziałowej Bystrzanki i Biczysk oraz przeciwległe wzniesienie wododziałowe zlewni Biczysk (od 423,7 m n.p.m. w Ropicy Polskiej do 345 m n.p.m. na południowo-wschodnim krańcu), zamykające obszar badań od północnego wschodu. Garby pogórskie są w większości połogie i łagodne (nachylenie 7–14°), ale niekiedy ich stoki bywają strome i nachylenie dochodzi nawet do 20°, jak ma to miejsce w przypadku Bucza. Środkową część obszaru badań, w rejonie wsi Bystra, zajmuje dość rozległe obniżenie, związane z występowaniem łupków warstw krośnieńskich.

Teren badań odwadniają dwa potoki: Bystrzanka i Biczyska, które uchodzą do doliny Ropy. Potok Biczyska (ujście do Ropy na wysokości ok. 295 m n.p.m.) ma dolinę stosunkowo wąską i charakteryzuje się niewielką liczbą dopływów. Bystrzanka, wpadająca do Ropy na wysokości ok. 300 m n.p.m., ma więcej dopływów i wraz z nimi tworzy dendrytyczną, asymetryczną sieć potoków. Dopływy prawostronne mają doliny wciosowe i nawiązują do przebiegu stref uskokowych. Stosunkowo wąska dolina Bystrzanki w środkowym biegu staje się doliną płaskodenną, a terasy zachowały się fragmentarycznie w miejscach rozszerzeń, gdzie osiągają do kilkudziesięciu metrów szerokości. Są to fragmenty terasy młodoplejstoceńskiej.

Na obszarze badań dolina Ropy zajmuje tylko niewielki fragment u podnóży południowych stoków Taborówki. Koryta Ropy towarzyszy terasa nadzalewowa, zbudowana z osadów żwirowych z piaskiem, gliną, a nawet głazami. Samo koryto rzeki (297,5 m n.p.m.) ulegało wielokrotnemu pogłębianiu (Soja, 1977), co ma wpływ na siłę transportową, a także oddziałuje na równowagę stokowo-fluwialną i dynamikę pobliskiego osuwiska Kawiory (Dauksza, Kotarba, 1973; Gil, Kotarba, 1977).

Deniwelacje terenu osiągające ok. 300–400 m w części beskidzkiej i 50–200 m w części pogórskiej, wraz ze zróżnicowanym nachyleniem stoków i zboczy, stwarzają dogodne warunki wyjściowe (*preparatory conditions*) do potencjalnego osuwania (niestabilności stoków).

WARUNKI HYDROMETEOROLOGICZNE

Pod względem klimatycznym obszar badań jest zaliczany do pięter klimatu umiarkowanie chłodnego i umiarkowanie ciepłego (Obrębska-Starklowa, 1973; Hess i in., 1977). Za piętro umiarkowanie chłodne uważa się obszary położone powyżej wysokości 570 m n.p.m. ze średnią temperaturą powietrza między 4 a 6°C. Piętro to obejmuje niewielką część obszaru badań, głównie o rzeźbie beskidzkiej, czyli kulminacyjne partie zlewni Bystrzanki i Biczysk, natomiast większość obszaru badań (partie o rzeźbie pogórskiej i doliny cieków) należy do piętra umiarkowanie ciepłego.

Beskid Niski znajduje się w tzw. cieniu opadowym, przez co roczne sumy opadów są niższe niż w innych beskidzkich częściach Karpat fliszowych, ale w wieloleciu przekraczają 800 mm. Gradient opadowy wynosi 60 mm na 100 m wysokości (Gil, Bochenek, 1998). Opady w tym rejonie zależą od sytuacji synoptycznej związanej z ogólną cyrkulacją mas powietrza nad Polską, głównie z układami niżowymi. Według Niedźwiedzia (inf. ustna, 2007) największe opady w tym rejonie, zwłaszcza w sezonie letnim, występują przy sytuacji północnej cyklonalnej (Nc) oraz przy sytuacji północno-wschodniej cyklonalnej (NEc), bruździe cyklonalnej (Bc) oraz w sytuacji cyrkulacji centralnej (Cc), a jesienią i zimą także w sytuacji wschodniej cyklonalnej.

Najcieplejszym miesiącem jest lipiec, a najchłodniejszym styczeń. Zaznacza się jednak oddziaływanie ciepłych mas powietrza napływających z sektora południowego, co przekłada się na cieplejsze okresy zimowe w stosunku do innych części Beskidu Niskiego (Gil, 1994c).

Zmienność warunków hydrometeorologicznych charakteryzują następujące dane: średnia roczna temperatura powietrza z okresu 1968–2003 wynosiła 7,8°C, z wahaniami w przedziale od 6,5 do 9,2°C, a średnia suma opadów w tym samym okresie – 816 mm. Minimalne opady osiągnęły 535 mm (zarejestrowane w 1982 r.), a maksymalne – 1164 mm (w 1974 r.). Opady znacznie niższe od średniej zarejestrowano w 1984 r. (603 mm) oraz w 2003 r. (614 mm). Wyjątkowo wysokie opady roczne, przekraczające nawet 1000 mm, zarejestrowano natomiast w latach: 1970 (1022 mm), 1974 (1164 mm), 1980 (1140 mm) i 1985 (1052 mm).

Pokrywa śnieżna może się utrzymywać przez ponad 100 dni w roku. Zwykle pojawia się pod koniec listopada lub na początku grudnia, a zanika w pierwszej lub drugiej dekadzie marca. Cechą charakterystyczną tego obszaru, podobnie jak i innych rejonów pogórskich, są roztopy śródzimowe. Warunki opadowe i śniegowe determinują parametry wilgotnościowe gruntu i podłoża.

UŻYTKOWANIE TERENU I FUNKCJE EKONOMICZNE OBSZARU BADAŃ

Pokrycie terenu szatą roślinną oraz użytkowanie terenu mają istotne znaczenie dla występowania osuwisk i związanego z nimi ryzyka. Występowanie lasów, użytków zielonych i gruntów ornych ma wpływ na wielkość spływu powierzchniowego, infiltracji oraz retencji wody, a zatem oddziałuje na stosunki wodne. Zarówno wzrost ciśnienia porowego, jak i wahania zwierciadła wody powodują obniżenie właściwości wytrzymałościowych materiału (gruntu i podłoża), co prowadzi do uaktywnienia ruchów masowych.

Sposób zagospodarowania terenu stanowi podstawę do oceny zasobów (dóbr) obszaru badań. Ponadto ma wpływ na relacje ekonomiczne i powiązania obszaru badań z większym regionem, co jest bardzo istotne dla oceny ryzyka spowodowanego potencjalnymi osunięciami.

Charakter użytkowania terenu obrazuje ortofotomapa przedstawiona na figurze 2B. Na obszarze badań sumaryczny udział gruntów ornych i użytków zielonych przekracza 51%, natomiast lasy stanowią ok. 33% powierzchni. Lasy są zbiorowiskami iglasto-liściastymi, ze stosunkowo młodym drzewostanem. Grunty orne zajmują znaczną powierzchnię (ok. 29%) i znajdują się głównie na obszarze z rzeźbą o charakterze pogórskim. Najmniejszą powierzchnię zajmują sady przydomowe.

Poza zasobami naturalnymi środowiska, elementami eksponowanymi na zagrożenie osuwiskowe są zabudowania oraz szeroko rozumiana infrastruktura. Na obszarze badań brak jest zakładów przemysłowych lub dużych przedsiębiorstw, działają natomiast warsztaty usługowe i małe sklepy.

Infrastrukturę liniową stanowią gazociągi, linie elektryczne, telefoniczne i wodociągi, tzw. wiejski i lokalne (obsługujące grupy gospodarstw domowych), oraz sieć dróg kołowych. Poza drogami lokalnymi, zapewniającymi dojazd do posesji, przez obszar badań przebiega droga powiatowa oraz tzw. zbiorcze drogi gminne, umożliwiające połączenie z Gorlicami. Dane o natężeniu ruchu wskazują, że główny szlak komunikacyjny biegnie wzdłuż osi badanego obszaru, drogą Szalowa–Szymbark–Gorlice, a druga ważna droga krzyżuje się z nią prostopadle we wsi Bystra. Szlak komunikacyjny wzdłuż osi omawianego obszaru umożliwia mieszkańcom dojazd do Gorlic lub Nowego Sącza, ale służy także innym użytkownikom do skracania połączenia z Ciężkowicami i Tarnowem. Zatem funkcja komunikacyjna ma duże znaczenie, również ze względu na odsetek ludności zawodowo czynnej i młodzieży dojeżdżającej do miejsc pracy i nauki.

Pod względem gęstości zaludnienia wsie Szymbark, Bystra i Ropica Polska należą do średnio zaludnionych, ale nie odnotowano tendencji do opuszczania regionu (Mendys i in., 2006). To sprawia, że na badanym obszarze funkcja mieszkalna jest istotna.

Charakterystyka zagospodarowania obszaru badań oraz jego funkcji ekonomicznych stanowi podstawę do identyfikacji elementów eksponowanych na zagrożenie osuwiskowe oraz oceny związanych z nimi strat bezpośrednich i pośrednich.

CHARAKTERYSTYKA OSUWISK NA OBSZARZE BADAŃ

ROZMIESZCZENIE OSUWISK

Osuwiska zarejestrowane na badanym obszarze zajmują łącznie 5,1 km^2, co stanowi ok. 30% jego całej powierzchni. Zatem jest to rejon o wysokim wskaźniku osuwiskowości powierzchniowej (Bober, 1984). Analizując rozmieszczenie osuwisk na obszarze badań (fig. 4), można zauważyć, że znajdują się one zarówno na stokach grzbietu Trzech Kopców (Jeleniej Góry–Maślanej Góry), zaliczanego do elementów rzeźby o charakterze beskidzkim, jak i na niższych sto-

kach Wiatrówek–Podlesia, Taborówki–Bucza oraz garbu wododziałowego Biczysk, tj. garbów uważanych za elementy rzeźby pogórskiej. Z jednej strony obecność osuwisk nawiązuje więc do tych części badanego terenu, gdzie energia rzeźby jest większa, a odporne skały są pocięte przez serie dyslokacji tektonicznych (warstwy magurskie i podmagurskie w południowo-zachodniej części). Z drugiej strony ich obecność na względnie pologich i łagodnych stokach, w terenie o mniejszych wysokościach względnych, należy łączyć z obecnością w podłożu utworów ilastych, zwłaszcza łupków eoceńskich.

Wiele osuwisk na obszarze badań rozciąga się od górnych partii stoków i schodzi do współczesnych den dolin obu głównych potoków – Bystrzanki i Biczysk. W polskiej literaturze przedmiotu tego typu osuwiska są zaliczane do stokowo-zboczowych (Wójcik, 1997; Wójcik, Zimnal, 1996). Spośród nich większe formy znajdują się w dolnej części zlewni Bystrzanki (np. osuwiska nr 6, 7, 167, 171, 180 – fig. 4). W zlewni potoku Biczyska, wzdłuż cieku, występują głównie mniejsze osuwiska (np. nr 204, 207, 257, 258, 261 – fig. 4). W dolinach potoków, będących ciekami pierwszego, drugiego i trzeciego rzędu według klasyfikacji Strahlera, a stanowiących dopływy Bystrzanki lub Biczysk, wiele osuwisk zajmuje wyłącznie dolne fragmenty zboczy. Można je zatem zaliczyć do osuwisk zboczowych (np. osuwiska nr 34, 104, 105, 119, 121, 238 – fig. 4).

W przyrzeczu Ropy położonym na badanym obszarze znajduje się duża, złożona forma osuwiskowa znana jako osuwisko Kawiory, a także rozległy zespół osuwisk, który oznaczono numerami 193–194, oraz kilka mniejszych osuwisk (fig. 4).

Osuwiska zarejestrowane na omawianym obszarze należą zarówno do płytkich zwietrzelinowych (ziemnych), jak i do głębokich, strukturalnych, obejmujących fliszowe skały podłoża, a niektóre są osuwiskami skalno-zwietrzelinowymi. Górne części wielu osuwisk mają kształt amfiteatralny z wyraźnymi skarpami o wysokości nawet do kilkunastu metrów, np. wysokość skarpy osuwiska Kawiory (nr 187) wynosi 20 m, osuwiska na północno-wschodnich stokach Maślanej Góry (nr 77) — 15–20 m, osuwiska Bystrzyca (nr 184–185) — 5–11 m. W przypadku osuwisk płytszych skarpy są zwykle niższe, a często nawet zdenudowane. Poniżej stref oderwania przetransportowany materiał koluwialny tworzy obszar akumulacyjny osuwiska, nazywany też obszarem złożenia (Kleczkowski, 1955). Jęzory i czoła osuwisk nasuwają się na niżej położone fragmenty stoków, terasy rzeczne, a miejscami schodzą do koryt cieków. Morfologia powierzchni i skład koluwiów zależą od materiału wyjściowego oraz dynamiki procesu osuwania. Dlatego wiele osuwisk ma pofałdowaną powierzchnię z poprzecznymi garbami, z zagłębieniami często wypełnionymi wodą, a w przypadku form starszych – osadami organicznymi. Widoczne są też wypłaszczenia oraz szczeliny o zróżnicowanym przebiegu. W przypadku osuwisk schodzących do cieków siła transportowa płynącej wody może być na tyle duża, że dochodzi do erozji dostarczanego materiału koluwialnego. Można wówczas mówić o związku pomiędzy zachodzącymi procesami stokowymi i fluwialnymi. Tak jest w przypadku osuwiska Kawiory, którego czoło jest erodowane przez Ropę (Dauksza, Kotarba, 1973). Osuwiska występujące na obszarze badań rozwijają się także na skutek cofania się skarpy głównej, poszerzając tym samym strefę oderwania.

GŁÓWNE TYPY OSUWISK, ICH LICZEBNOŚĆ I WIELKOŚĆ

Przeprowadzone prace terenowe pokazały, że inwentaryzacja osuwisk jest zadaniem trudnym, a wydzielenie poszczególnych obiektów może być niejednoznaczne. Omawiany obszar był silnie przekształcany przez działalność rolniczą, dlatego często granice morfologiczne osuwisk uległy spłaszczeniu lub zatarciu. W wielu przypadkach zaburzenia równowagi stokowej zachodziły kilkakrotnie, co przejawia się często nie tyle powstaniem nowego osuwiska, ale odmłodzeniem fragmentów starszej formy, której współczesny kształt i zasięg jest wypadkową różnych typów osuwania. Istnieją też miejsca, gdzie w strefach (obszarach) oderwania można zidentyfikować kilka skarp łączących się ze sobą i tworzących linię o przebiegu falistym. W takich przypadkach materiał koluwialny może pochodzić z kilku obszarów źródłowych, ale w wyniku transportu w dół stoku łączy się i tworzy jedną strefę akumulacyjną czy wspólny jęzor (np. zespół osuwisk 135–141 na stokach Bucza lub zespół osuwisk nr 200 na wschodnich stokach Taborówki w zlewni Biczysk). W takich sytuacjach wyróżniano zespoły osuwiskowe, a nie indywidualne osuwiska. Mimo że większość form zidentyfikowano z dużym stopniem pewności, w niektórych przypadkach zasięg osuwisk zaznaczono jako przypuszczalny ze względu na brak wyrazistych form morfologicznych.

Rozpoznane, proste (tj. jednoznaczne pod względem morfologicznym i genetycznym) osuwiska przedstawiono w formie pojedynczych poligonów, natomiast osuwiska złożone lub kilkakrotnie odmładzane – przy pomocy kilku poligonów. Takie założenie w podobnych sytuacjach przyjmowali m.in. Carrara i in. (1991) oraz Pasuto i Soldati (1999). Procedura ta pozwoliła na zarejestrowanie 348 poligonów osuwiskowych (odpowiadających najczęściej niezależnym osunięciom) lub 279 zespołów osuwiskowych.

Zarejestrowane osuwiska poklasyfikowano w nawiązaniu do zmodyfikowanej typologii Varnesa (Varnes, 1978; Cruden, Varnes, 1996; Dikau i in., 1996; Margielewski, 2004, 2009).

Większość rozpoznanych form (74%), ze względu na sposób przemieszczania, zaliczono do grupy **osuwisk złożonych** (*compound* lub *complex*). Należą tu osuwiska powstałe w wyniku ruchu rotacyjnego w górnej części oraz ruchów translacyjnych lub nawet spływów w dolnej części. W grupie tej mieszczą się także osuwiska powstałe w wyniku różnych rodzajów ruchu występujących równolegle obok siebie oraz takie, dla których kolejne przemieszczenie jest efektem odmładzania. Spośród mniejszych, prostych, względnie homogenicznych osuwisk płytkie **zsuwy translacyjne** stanowią tylko ok. 23% wszystkich osuwisk, natomiast spływy

błotne lub rumoszowo-błotne (*earthflow slides* lub *debris flow slides*) mniej niż 3%. Wyróżnione typy osuwisk przedstawiono na figurze 4. Obrywy i obwały oraz klasyczne spływy gruzowe (*confined channel debris flow* i *slope debris flow*) w tym rejonie nie występują, co wiąże się z energią rzeźby na obszarze badań.

Spośród osuwisk wyróżnionych na omawianym obszarze formy złożone zajmują powierzchnię 4,3 km^2, natomiast osuwiska translacyjne i spływowe – tylko 0,23 i 0,58 km^2. Cechą charakterystyczną tego obszaru jest dominacja osuwisk małych, o powierzchni do 2,5 ha. Niewiele osuwisk ma powierzchnię między 5 a 10 ha, a tylko kilka przekracza 10 ha. Wszystkie osuwiska translacyjne należą do form małych, natomiast pozostałe typy są bardziej zróżnicowane pod względem powierzchni.

Do dużych form zalicza się osuwisko Kawiory o łącznej powierzchni 25,97 ha, które należy do lepiej rozpoznanych na tym terenie. Jest to osuwisko skalno-zwietrzelinowe, o kilku powierzchniach poślizgu, po których zachodziły sukcesywne przemieszczenia. Jest ono dobrym przykładem osuwiska złożonego – mieszanego (*compound*).

Wyjątkowo duże (36,46 ha) jest również osuwisko znajdujące się na północno-wschodnim stoku Maślanej Góry. Jego najstarsze osady są datowane na 2625 ±30 BP. Jest to forma łącząca w sobie elementy zsuwu i spływu (Wójcik i in., 2006), ale jego dolna część była wcześniej interpretowana jako *glacis* (Kotarba, 1970).

Do dużych form, których powierzchnie przekraczają 10 ha, należą także osuwiska nr 200 i 215 położone na stokach Taborówki o ekspozycji północno-wschodniej oraz osuwiska nr 115 i 66 znajdujące się na stokach Jeleniej Góry i Maślanej Góry o ekspozycji północno-wschodniej i wschodniej (fig. 4).

Osuwiska duże znajdują się głównie na terenach zalesionych. Można zatem przypuszczać, że ich ewentualna aktywność będzie niszczyć jedynie zasoby leśne. Pozostałe osuwiska, mniejsze lecz zdecydowanie liczniejsze, są rozmieszczone dość równomiernie na całym obszarze badań, a z ich aktywnością mogą się wiązać znacznie bardziej dotkliwe zniszczenia.

Przedstawiona powyżej charakterystyka typów osuwisk oraz ich powierzchni jest informacją wykorzystaną w modelowaniu statystycznym zmierzającym do opracowania mapy podatności na osuwanie i zagrożenia.

RELACJA OSUWISK DO NACHYLENIA STOKÓW I UTWORÓW PODŁOŻA

W większości prac dotyczących osuwisk zwraca się uwagę na relacje pomiędzy ich występowaniem a nachyleniem stoku. Biorąc pod uwagę wszystkie typy wydzielonych osuwisk, największe powierzchnie zajęte przez osuwiska stwierdzono przede wszystkim na stokach o nachyleniach 7–13°, natomiast udział powierzchni osuwisk w powierzchni stoków o danym nachyleniu dominuje przy spadkach 13–15° (tab. 1).

Można uznać, że są to wartości typowe. Graniczny i in. (2001) dla większego obszaru w rejonie Gorlic podają, że większość osuwisk znajduje się w obrębie spadków 8–10°, a także wskazują na silne powiązanie występowania osuwisk ze stokami o spadkach 11–14°. Statystyki uzyskane dla obszaru badań nie odbiegają też istotnie od analogicznych danych dotyczących innych rejonów Karpat polskich, gdzie np. w przypadku zlewni Koszarawy wysoką koncentrację osuwisk stwierdzono przy nachyleniach 10–17° (Wójcik,

Tabela 1

Powierzchnia osuwisk względem nachylenia stoków na obszarze badań

Area of landslides in particular classes of slope gradients in the study area

Nachylenie stoku	Powierzchnia osuwisk [ha]	Procent powierzchni osuwisk o danym nachyleniu [Bi/Σ Bi · 00] [%]	Powierzchnia stoków o danym nachyleniu [ha]	Wskaźnik osuwiskowości powierzchniowej w odniesieniu do stoków o danym nachyleniu [(Bi/Di) · 100] [%]
A	B	C	D	E
0–3°	6,7	1,3	65,6	10,2
3–5°	19,7	3,9	117,0	16,8
5–7°	60,0	11,8	279,3	21,5
7–9°	108,6	21,3	399,0	27,2
9–11°	130,2	25,5	375,9	34,6
11–13°	80,4	15,8	214,8	37,4
13–15°	46,4	9,1	115,3	40,2
Powyżej 15°	58,4	11,4	181,0	32,3
Łącznie	510,4	100,0	1747,9	

1997), a w dolinie Sanu pomiędzy Bachórzcem a Reczpolem (na Pogórzu Dynowskim) – przy nachyleniach 7–17° (Wójcik, Zimnal, 1996).

Analizując uwarunkowania geologiczne występowania osuwisk na obszarze badań, prześledzono występowanie wszystkich typów osuwisk na wyróżnionych jednostkach litostratygraficznych. Stwierdzono, że największy obszar osuwiska zajmują na utworach warstw inoceramowych (ok. 17% powierzchni terenu badań), co nie jest zaskakujące przy największej powierzchni (ok. 61%) zajętej przez tę jednostkę litostratygraficzną na badanym obszarze (tab. 2). Podobne wyniki otrzymali Wójcik i Zimnal (1996) w przypadku doliny Sanu. Także Bober (1984) oraz Bober i Zabuski (1993) uznają warstwy inoceramowe za podatne na osuwanie. Znaczną powierzchnię (7,3%) na omawianym obszarze zajmują osuwiska występujące na eoceńskich łupkach pstrych, uważanych za najbardziej podatne na osuwanie. Analiza współczynnika osuwiskowości powierzchniowej (Bober, 1984), rozumianego jako stosunek powierzchni osuwiskowej do powierzchni danej jednostki litostratygraficznej, wskazuje, że eoceńskie łupki pstre mają najwyższe wartości tego wskaźnika, a w przypadku pozostałych jednostek rozkład jest raczej równomierny (tab. 2).

Zarówno strefy uskokowe, jak i strefy nasunięć oraz ułożenie warstw utworów geologicznych w stosunku do nachylenia stoków mają wpływ na rozwój osuwisk na badanym obszarze. W strefie nasunięcia jednostki magurskiej na śląską skupiają się osuwiska mniejsze, a duże formy wykazują związek z dyslokacjami o biegu NE–SW, zwłaszcza w obrębie piaskowców magurskich.

Przedstawioną tutaj charakterystykę osuwisk oparto na tzw. statystykach opisowych, które sprowadzały się tylko do analizy jednowymiarowej. Nie pokazuje ona jednak wzajemnych relacji i łącznego oddziaływania czynników wpływających na procesy osuwania. Zagadnienie znaczenia czynników pasywnych przedstawiono dokładniej w dalszej części niniejszej monografii, przy omawianiu sposobu wyznaczania zagrożenia osuwiskowego.

Tabela 2

Występowanie osuwisk na różnych seriach skalnych i wskaźnik osuwiskowości powierzchniowej na obszarze badań

Distribution of landslides in particular lithologic series and index of landslide area in the study area

Wydzielenie litostratygraficzne	Powierzchnia całkowita danej serii skalnej [ha]	Procent powierzchni zajmowanej przez serię skalną $[B_i/\Sigma B_i \cdot 100]$ [%]	Powierzchnia całkowita osuwisk na danej serii skalnej [ha]	Wskaźnik osuwiskowości powierzchniowej dla całkowitej powierzchni osuwisk na danej serii skalnej $[D_i/ B_i \cdot 100]$ [%]	Procent powierzchni osuwiskowej na danej serii skalnej w stosunku do powierzchni obszaru badań $[(D_i/\Sigma B_i) \cdot 100]$ [%]
A	B	C	D	E	F
Łupki – warstwy krośnieńskie dolne	106,7	6,1	21,2	19,9	1,2
Piaskowce i łupki – warstwy krośnieńskie dolne	12,5	0,7	0,4	3,2	0,02
Piaskowce i łupki – warstwy magurskie	192,3	11,0	37,0	19,2	2,1
Łupki – warstwy podmagurskie (z Szymbarku)	12,4	0,7	3,5	28,2	0,2
Łupki pstre	285,8	16,4	127,3	44,5	7,3
Piaskowce ciężkowickie	70,9	4,1	18,2	25,7	1,0
Piaskowce i łupki – warstwy inoceramowe	1067,3	61,1	302,8	28,4	17,3
Łącznie	1747,9	100,0	510,4		29,2

WSPÓŁCZESNE RUCHY OSUWISKOWE

Przy ocenie zagrożenia osuwiskowego istotne jest poznanie dynamiki osuwisk, przy czym powinno się rozpatrywać zarówno tempo ruchów masowych, jak i częstość ich występowania. W tym zakresie w odniesieniu do osuwisk używane jest określenie „aktywność", które bywa niejednoznaczne. Syntetycznie zagadnienie to przedstawił Falgeollet (1996), a stosowane podziały uzupełnił o kryterium, jakim jest okres ostatniej aktywności.

Kotarba (1989), charakteryzując dynamikę osuwisk w rejonie Szymbarku, przyjął rozróżnienie na osuwiska ustabilizowane lub nieaktywne (formy stare czy dojrzałe, które powstały w wyniku jednorazowej niestabilności stoku, a po powrocie do stanu równowagi nie podlegały dalszym deformacjom), aktywne okresowo (gdzie przerwanie równowagi zachodzi rekurencyjnie pod wpływem silnego impulsu sprawczego, a momenty aktywności są poprzedzielane dłuższymi okresami stabilności) i ciągle aktywne (podlegające stałej transformacji od momentu ich powstania). Powyższy podział, mimo że nie operuje ewidentnie sprecyzowanymi przedziałami czasowymi, daje się dość łatwo dopasować do kategorii zaproponowanych w zmodyfikowanej klasyfikacji Flageolleta (1996).

Biorąc pod uwagę, że obserwowanym ruchom osuwiskowym oprócz transformacji rzeźby towarzyszyło także zniszczenie posadowionych dóbr materialnych, można się pokusić o nieco inny podział, lepiej ilustrujący wydarzenia zachodzące na badanym obszarze oraz ich konsekwencje. Dlatego wprowadzono podział osuwisk na aktywne w okresie systematycznych obserwacji prowadzonych na Stacji Naukowej IGiPZ PAN (tj. od 1969 r.) oraz nieaktywne w tym okresie. Podział ten wykorzystano przy ocenie zagrożenia osuwiskowego do obliczenia okresu powtarzalności ruchów masowych w powiązaniu z opadem, jako czynnikiem inicjującym, oraz w modelowaniu statystycznym bazującym na funkcji sprzyjania (*favourability function*).

Należy jednak zaznaczyć, że znajomość zasięgu przestrzennego aktywności osuwisk w rozważanym okresie (1969–2003) nie zawsze jest dokładna, a szczegółowe dane monitoringowe są dostępne tylko w odniesieniu do wybranych osuwisk (Gil, Bochenek, 1998).

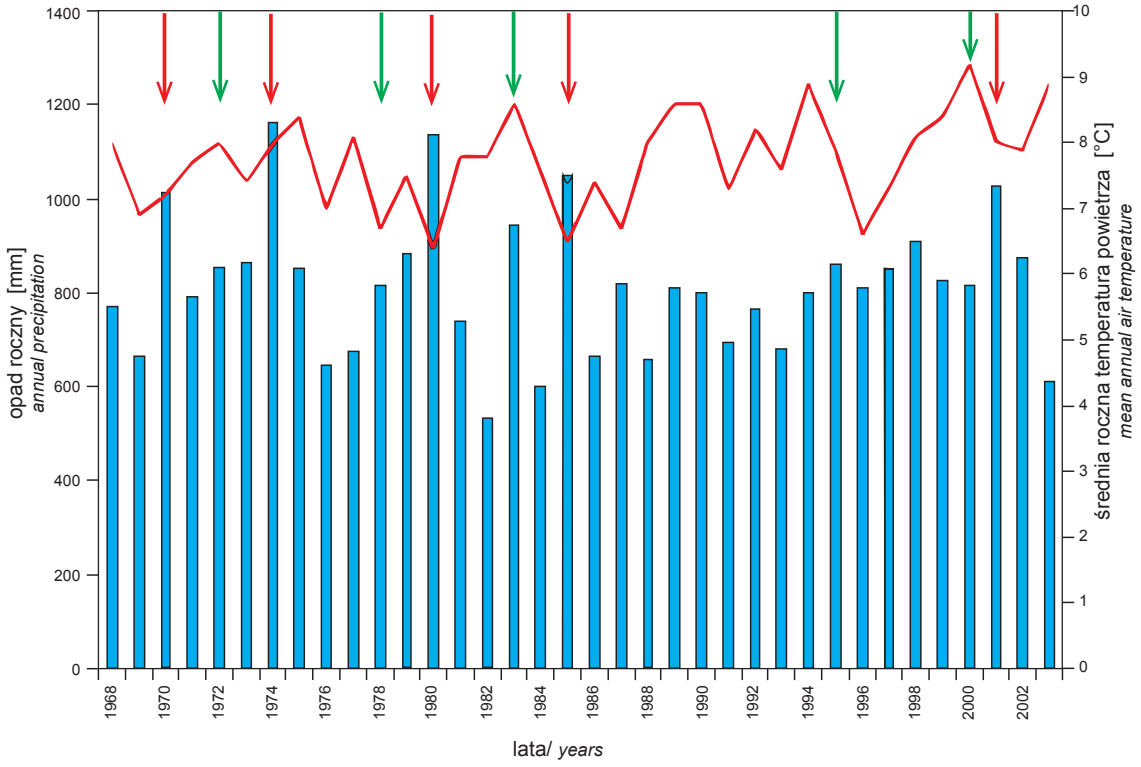


Fig. 5. Sumy opadów rocznych na stacji IGiPZ PAN w Szymbarku a obserwowane ruchy masowe na obszarze badań (wg Gila, 2004)

Strzałki czerwone – stwierdzone ruchy masowe przy sumach opadów miesięcznych ponad 200 mm i opadach rocznych przekraczających 1000 mm; strzałki zielone – stwierdzone ruchy masowe (reaktywacja) przy sumach opadów miesięcznych przekraczających 160 mm

Annual precipitation totals recorded at Research Station in Szymbark and observed mass movements in the study area (acc. to Gil, 2004)

Red arrows – mass movements registered at monthly precipitation exceeding 200 mm and annual precipitation exceeding 1000 mm; green arrows – mass movements (reactivation) at monthly precipitation exceeding 160 mm

Aktywność osuwisk na obszarze badań na tle sumy opadów rocznych pokazano na figurze 5, jednak jest to tylko bardzo zgeneralizowany obraz. Caine (1980) jako pierwszy obliczył zależność pomiędzy minimalnym czasem trwania opadów i jego intensywnością, koniecznymi do zainicjowana płytkich zsuwów i spływów ziemnych. Od tego czasu proponowano różne warianty wyznaczania wartości progowych, a ich krytyczne zestawienie przedstawili Guzetti i in. (2008). Wartości progowe opadów dla rejonu Szymbarku zawierają prace Gila i Starkla (1979), Gila (1994a, 1997) oraz Gila i Długosza (2006). Często przyjmuje się, że okres powtarzalności progów opadów jest równoważny z okresem powtarzalności osuwisk, a tym sam pozwala na określenie prawdopodobieństwa ich wystąpienia. Prawdopodobieństwo występowania ruchów masowych jest wykorzystywane przy wyznaczaniu przewidywanego zagrożenia. Próbę wyznaczenia okresów powtarzalności opadów inicjujących osuwanie (RP) podjęto także na badanym obszarze. Zastosowana metoda Gumbela (rozkład wartości ekstremalnych) dała wyniki bardzo odbiegające od faktycznie obserwowanych i dlatego zastąpiono ją metodą empiryczną (Zabuski i in., 2003). W przypadku omawianego obszaru obliczone okresy powtarzalności wynoszą: 7,08 lat w odniesieniu do krótkotrwałych, intensywnych opadów (co odpowiada prawdopodobieństwu ok. 14%) oraz 4,38 lat w przypadku opadów rozlewnych (co odpowiada prawdopodobieństwu ok. 25%).

ANALIZA PODATNOŚCI NA OSUWANIE I ZAGROŻENIA W REJONIE SZYMBARKU

ZASTOSOWANE METODY

Przy opracowywaniu map podatności na osuwanie zastosowano podejście metodyczne, które zilustrowano schematem pokazanym na figurze 6. Przyjęty model koncepcyjny zakłada zależność ruchów masowych od czynników pasywnych, charakteryzujących dany obszar badań oraz czynników aktywnych, sprawczych, którymi są tutaj przede wszystkim opady. Model ten jest oparty na danych geologiczno-geomorfologicznych i innych środowiskowych oraz na informacjach o osuwiskach wraz z ich typologią i aktywnością procesu osuwania. Tak zebrane informacje służą do zbudowania warstw tematycznych, przetwarzanych i analizowanych następnie za pomocą narzędzi GIS. Mapa występowania osuwisk (*occurrences*) stanowi informacyjną warstwę odniesienia, w stosunku do której prowadzi się analizę. W przypadku omawianego obszaru (zlewnia Bystrzanki, Biczysk i przyrzecze Ropy) model predykcyjny opracowano na podstawie analizy 258 osuwisk złożonych. Osuwiska te zajmują powierzchnię 4,3 km^2, czyli 25% obszaru badań, i stanowią 84% (4,3 km^2/5,1 km^2) terenu niestabilnego, są więc reprezentatywne dla tego obszaru.

Przyjęte do analizy czynniki pasywne stanowią warstwy monotematyczne przestrzennej bazy danych. Obejmują one warstwy wektorowe opracowane bezpośrednio oraz warstwy rastrowe opracowane jako pochodne cyfrowego modelu terenu. Są to odpowiednio: litologia, linie głównych dyslokacji tektonicznych, domeny tektoniczne, sieć rzeczna, użytkowanie terenu, utwory powierzchniowe, rozmieszczenie osuwisk według typu oraz nachylenie i orientacja stoków w stosunku do stron świata (fig. 7).

Do oceny podatności na osuwanie i zagrożenia osuwiskowego wykorzystano narzędzia należące do grupy metod opartych na tzw. *favourability functions* (funkcjach sprzyja-

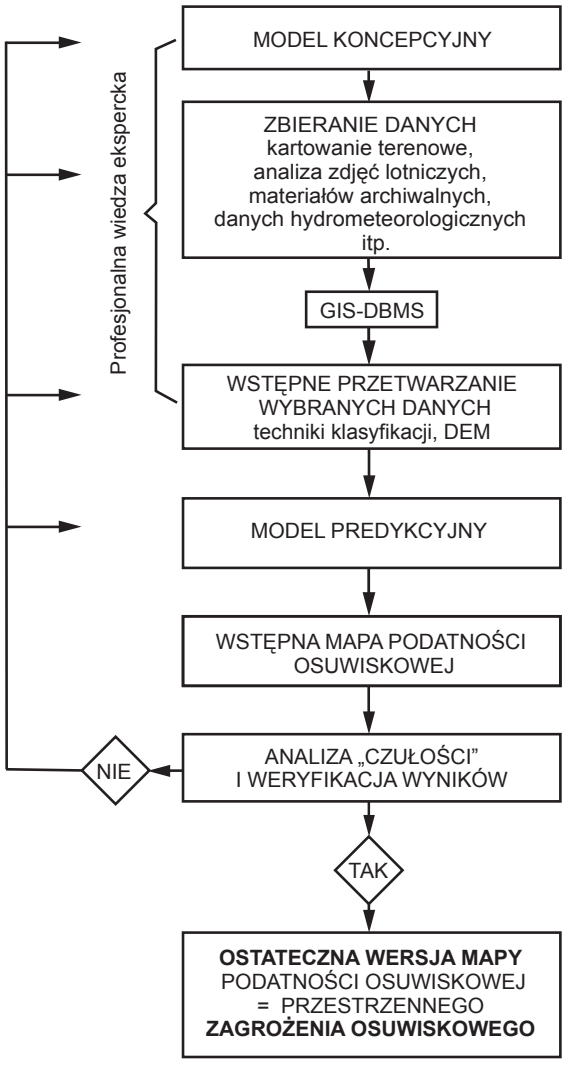


Fig. 6. Schemat blokowy – opracowanie mapy podatności na osuwanie

Flow diagram for landslide susceptibility modelling

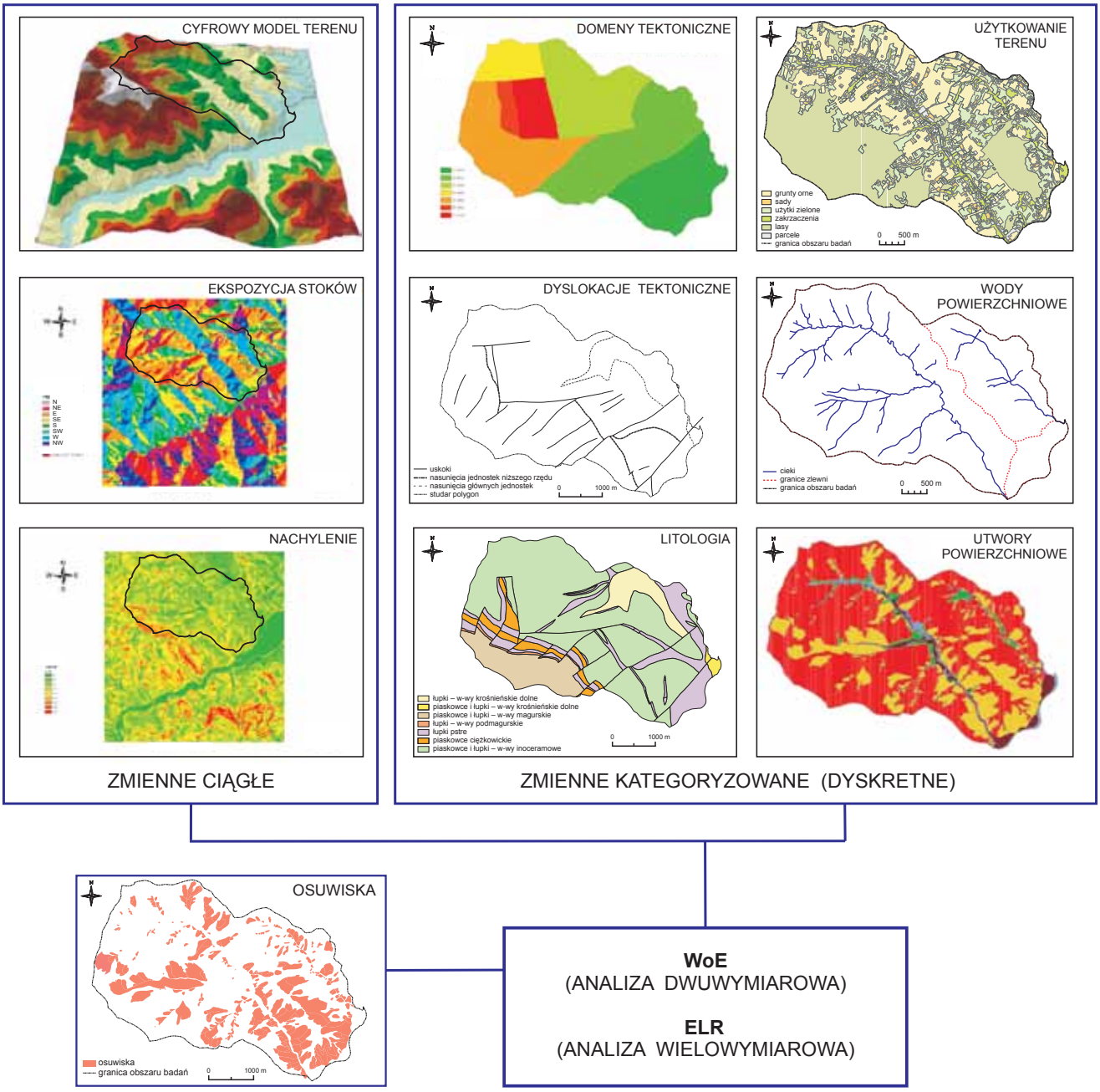


Fig. 7. Warstwy monotematyczne (zmienne ciągłe i dyskretne) odpowiadające czynnikom pasywnym wykorzystanym w modelowaniu

Thematic layers (continuous and discrete data) illustrating causative factors used in modelling

nia). Pierwszą z zastosowanych metod była metoda statystyki dwuwymiarowej, tj. metoda *Weights of Evidence* (metoda wagi przesłanek) – w skrócie **WoE** (Bonham-Carter i in., 1989; Bonham-Carter, 1994; Poli, Sterlacchini, 2007). Uzyskane wyniki wraz z interpretacją mapy podatności na osuwanie na badanym obszarze omówiono we wcześniejszych pracach (Mrozek i in., 2004; Mrozek, 2008). W niniejszym rozdziale skoncentrowano się na omówieniu opracowania mapy zagrożeń tego samego obszaru przy wykorzystaniu jednej z metod statystyki wielowymiarowej, tj. empirycznej funkcji ilorazu wiarygodności — **ELR** (*Empirical Likelihood Ratio*), zaproponowanej i rozwijanej przez Chunga i Fabbriego (1999, 2002, 2005) oraz Chunga (2006).

W metodzie WoE mapa zagrożenia osuwiskowego powstaje w drodze transformacji wartości z mapy podatności na osuwanie przez wymnożenie ich przez prawdopodobieństwo czasowe wystąpienia czynników sprawczych (na obszarze badań w tym celu wykorzystano omówione już okresy powta-

rzalności opadów), natomiast metoda Chunga i Fabbriego oferuje znacznie bardziej zaawansowany sposób oceny podatności i zagrożenia osuwiskowego. Weryfikację poprawności wyników uzyskanych w obu metodach (WoE i ELR) przeprowadzono zgodnie z zaleceniami Rainesa (1999), Chunga i Fabbriego (2005) oraz Chunga (2006).

W polskiej literaturze osuwiskowej metoda ELR nie była dotąd omawiana, praktycznie nie była także wykorzystywana. Ze względu na jakość i obiektywizm uzyskiwanych przy jej użyciu wyników zdecydowano się na szersze omówienie podstaw matematycznych i zasad jej stosowania.

ELR – ZASADA MODELOWANIA

Przestrzenne modelowanie predykcyjne (*Spatial Prediction Modelling*) – SPM (Chung, Fabbri, 1993, 1999, 2005; Chung, 2006) określa związki między występowaniem osuwiska w danym punkcie obszaru badań (w przypadku wymaganych map rastrowych – pikselu siatki) a występowaniem (lub niewystępowaniem) kombinacji czynników pasywnych w tym samym pikselu. Czynniki te stanowią zbiór $m = k + h$ danych, gdzie k jest liczbą warstw zawierających dane kategoryzowane (nieciągłe), takie jak np. litologia, natomiast h jest liczbą warstw opisujących przestrzenny rozkład danych ciągłych, np. nachylenie stoku (tab. 3). Wszystkie te warstwy są reprezentowane przez odpowiednie mapy. Po wykonaniu analizy statystycznej takiego związku dla osuwisk, które wystąpiły w przeszłości, metoda pozwala na wyznaczenie dla poszczególnych punktów na mapie obszaru badań wartości prawdopodobieństwa wystąpienia osuwiska w przyszłości, dla z góry zadanego przedziału czasu.

Podstawę matematyczną SPM stanowi pojęcie funkcji sprzyjania (*Favourability Function*), w dalszej części tej pracy oznaczonej jako FF. W przypadku SPM większość prezentowanych tutaj wyników uzyskano z zastosowaniem uproszczonej postaci funkcji empirycznego ilorazu wiarygodności (*Empirical Likelihood Ratio* – ELR), funkcji należącej do klasy FF. Jak stwierdza Chung (2006), przy założeniu, że dysponujemy wielowymiarowymi funkcjami $f\{x_1,...,x_m|L\}$ i $f\{x_1,...,x_m|\widetilde{L}\}$ będącymi rozkładami częstości pikseli osuwiskowych L i nieosuwiskowych $\widetilde{L}$ dla różnych kombinacji wartości czynników pasywnych z m warstw (map) można zbudować model predykcyjny, posługując się funkcją λ, będącą ilorazem tych dwóch funkcji. Dla dowolnego piksela x obszaru badań można znaleźć zbiór odpowiadających mu wartości z warstw reprezentujących czynniki $(x_1,..., x_m)$, co pozwala obliczyć iloraz:

$$\lambda(x : x_1,...,x_m) = \frac{f\{x_1,...,x_m|L\}}{f\{x_1,...,x_m|\widetilde{L}\}} . \qquad [2]$$

Po wyznaczeniu wartości λ dla każdego piksela uzyskuje się ciągły rozkład względnego zagrożenia na całym obszarze. Zgodnie z założeniami modelu piksel o największej wartości funkcji λ odpowiada miejscu najbardziej zagrożonemu osuwiskami.

Korzystanie jednocześnie z danych reprezentujących zmienne kategoryzowane $(x_1,...,x_k)$ i zmienne o rozkładach ciągłych $(y_1,..., y_h)$, gdzie $k + h = m$, wymaga przyjęcia założenia o niezależności warunkowej danych z obu zbiorów:

Tabela 3

Dane wejściowe użyte w modelowaniu jako czynniki warunkujące osuwanie (czynniki pasywne)

Input data used as conditioning parameters (*causative factors*) in the modelling

Zmienna	Jednostka	Typ zmiennej	Pochodzenie
Elewacja	m	ciągła	NMT
Nachylenie stoku	stopnie	ciągła	NMT
Orientacja stoku	stopnie	ciągła	NMT
Użytkowanie terenu	kategoria	dyskretna	ortofotomapa, kartowanie terenowe
Litologia	kategoria	dyskretna	mapa geologiczna i kartowanie terenowe
Odległość od linii dyslokacji tektonicznych	m	ciągła	mapa litologiczna
Utwory powierzchniowe	kategoria	dyskretna	mapa geologiczna i kartowanie terenowe
Odległość od najbliższego cieku	m	ciągła	NMT, mapa topograficzna

$$\lambda(x:x_1,...,x_k,y_1,...,y_h) = \frac{f\{x_1,...,x_k,y_1,...,y_h|L\}}{f\{x_1,...,x_k,y_1,...,y_h|\widetilde{L}\}} \quad [3]$$

$$= \frac{f\{x_1,...,x_k|L\}\cdot f\{y_1,...,y_h|L\}}{f\{x_1,...,x_k|\widetilde{L}\}\cdot f\{y_1,...,y_h|\widetilde{L}\}} .$$

Przy tym założeniu funkcja ilorazu wiarygodności wyraża się przez iloczyn dwóch funkcji: jednej reprezentującej iloraz dla zmiennych dyskretnych, drugiej – dla zmiennych o rozkładach ciągłych:

$$\lambda(x:x_1,...,x_k,y_1,...,y_h) = \\ = \lambda(x:x_1,...,x_k)\cdot\lambda(x:y_1,...,y_h). \quad [4]$$

W przypadku zmiennych nominalnych (dyskretnych) są stosowane dwie alternatywne metody wyznaczania wartości funkcji λ. Pierwsza zakłada, że nie istnieje zależność warunkowa pomiędzy *k* czynnikami dyskretnymi, co prowadzi do bardzo prostej postaci funkcji:

$$\lambda(x:x_1,...,x_k) = \\ = \lambda(x:x_1)\cdot\lambda(x:x_2)...\cdot\lambda(x:x_k), \quad [5]$$

która jest iloczynem funkcji ilorazu wiarygodności obliczanych oddzielnie dla kolejnych zmiennych dyskretnych. Oszacowanie wartości dla poszczególnych funkcji jednej zmiennej, np. x_i, otrzymuje się z prostej relacji:

$$\hat{\lambda}(x:x_i) = \frac{Npix(L\cap x_i)}{Npix(\widetilde{L}\cap x_i)}, \quad [6]$$

gdzie $Npix(L\cap x_i)$ to liczba pikseli, dla których osuwiska pokrywają się z zasięgiem czynnika x_i, natomiast $Npix(\widetilde{L}\cap x_i)$ to liczba pikseli, w których występuje czynnik x_i, a nie występują osuwiska. Po wstawieniu funkcji [6] po prawej stronie równania [5] uzyskuje się przybliżenie $\hat{\lambda}(x:x_1,...,x_k)$ funkcji $\lambda(x:x_1,...,x_k)$.

Druga z metod obliczania wartości funkcji λ wymaga wyznaczenia funkcji rozkładów częstości standardowymi technikami statystycznymi dla wielu zmiennych, tj. zgenerowania tablicy wielodzielczej (*contingency table*). Aby obliczyć wartość funkcji λ w pikselu *x*, należy zastosować wzór:

$$\overline{\lambda}(x:x_1,...,x_k) = \frac{Npix(L\cap U_{x_1,...,x_k})}{Npix(\widetilde{L}\cap U_{x_1,...,x_k})}, \quad [7]$$

gdzie $Npix(L\cap U_{x_1,...,x_k})$ oznacza liczbę wszystkich pikseli z osuwiskami przypadającą na taką kombinację wartości czynników $(x_1,...,x_k)_x$, jaka wystąpiła dla piksela *x*, natomiast $Npix(\widetilde{L}\cap U_{x_1,...,x_k})$ odpowiada liczbie pikseli, dla których ta sama kombinacja czynników nie pokrywa się z wystąpieniami osuwisk. Odpowiednie liczby pikseli znajduje się w tabeli wielodzielczej. Prowadzenie obliczeń według tego drugiego schematu powinno dać dokładniejsze wyniki, jednak jest nieporównanie bardziej pracochłonne i kłopotliwe pod względem obliczeniowym, dlatego autorzy SPM zalecają stosowanie pierwszej metody (SPMS, 2004; Chung, Fabbri, 2005; Chung, 2006).

Należy podkreślić, że metoda ELR, w odróżnieniu od metody WoE, wykazuje bardzo niewielką wrażliwość na niespełnienie wymagania, żeby rozkłady czynników wykazywały niezależność warunkową. Chung (2006) podał przykłady testów, w których świadomie naruszono to wymaganie: w pierwszym przypadku dla zmiennych ciągłych (nachylenie stoków), w drugim – dla zmiennej dyskretnej (litologia). Oba testy polegały na wprowadzeniu do zbioru czynników dwóch identycznych map (pod różnymi nazwami). Stwierdzono, że obecność danych warunkowo zależnych zmieniła wyniki w bardzo niewielkim stopniu. Powielenie danych o kącie nachylenia stoku, w przypadku najbardziej narażonych na osuwanie klas obejmujących 10% obszaru badań, pozostawiło 94% wyników bez zmian. W jeszcze mniejszym stopniu zmieniły się wyniki w przypadku wprowadzenia nadmiarowej informacji o litologii podłoża – 98% wyników nie uległo zmianie w przypadku tej samej grupy klas reprezentujących największe zagrożenie osuwaniem. Zatem stosowanie pierwszego wariantu obliczania funkcji λ jest jak najbardziej uzasadnione.

Sposoby oszacowania funkcji ilorazu wiarygodności dla zmiennych ciągłych również można znaleźć w pracy Chunga (2006). W najprostszej wersji, przy założeniu o niezależności warunkowej warstw o rozkładzie ciągłym, pełna funkcja ilorazów wiarygodności (drugi wyraz z prawej strony równania [4]) jest dana wzorem podobnym do wzoru [5]:

$$\lambda(x:y_1,...,y_h) = \\ = \lambda(x:y_1)\cdot\lambda(x:y_2)...\cdot\lambda(x:y_h). \quad [8]$$

Zamiast stosowania *h*-wymiarowej funkcji rozkładu dla wielu zmiennych, funkcja λ jest szacowana jako iloczyn *h* funkcji jednej zmiennej, z których każda jest przybliżana jako:

$$\ddot{\lambda}(x:y_i) = \frac{\ddot{f}(y_i|L)}{\ddot{f}(y_i|\widetilde{L})}. \quad [9]$$

W liczniku oraz mianowniku prawej strony powyższego wzoru występują dwie empiryczne funkcje rozkładu częstości, obliczane z nałożenia wartości *i*-tego czynnika (mapy) o rozkładzie ciągłym i mapy osuwisk. Iloczyn tych przybliżonych funkcji stanowi oszacowanie $\ddot{\lambda}$ funkcji λ z lewej strony równania [8].

Po obliczeniu wartości funkcji $\hat{\lambda}(x:x_1,...,x_k,y_1,...,y_h)$ stanowiącej przybliżenie wzoru [4] dla każdego piksela

mapy obszaru badań uzyskuje się mapę przedstawiającą względną podatność na osuwanie. Wyznaczone wartości funkcji mogą zmieniać się w zakresie od 0 do nieskończoności. Te skrajne wartości odpowiadają sytuacjom, w których dla danego piksela konkretna kombinacja czynników nigdy nie pojawiła się w koniunkcji z wystąpieniem osuwiska na całym obszarze badań (otrzymamy wtedy wartość $\hat{\lambda}(x) = 0$) lub dana kombinacja czynników z piksela x pojawiała się wyłącznie na obszarach osuwisk (co daje $\hat{\lambda}(x) = \infty$, jako wynik dzielenia przez zerową liczbę pikseli bez osuwisk dla tej kombinacji). Dla wygody rachunkowej otrzymane wartości zwykle są porządkowane w kolejności malejącej i zastąpione numerami porządkowymi (rangami). Po podzieleniu każdej z rang przez łączną liczbę pikseli N na tworzonej mapie otrzymuje się standaryzowany ciąg wartości od $1/N$ do 1. W ciągu tym 1 odpowiada pikselowi o najwyższej wartości ocenianej podatności osuwiskowej, natomiast $1/N$ – o najniższej wartości.

W kolejnym kroku procedury dokonywany jest podział zbioru wartości podatności na osuwanie (lub rang) na klasy. W przypadku rang algorytm metody (SPMS, 2004) standardowo dzieli je na n (zwykle $n = 200$) półotwartych przedziałów $(0,1/n]$, $(1/n, 2/n]$,..., $((n-1)/n, 1]$. Jeżeli ranga piksela mieści się w przedziale $((n-i-1)/n, (n-i)/n]$ to dany piksel należy do klasy i. Uzyskana w ten sposób klasyfikacja pikseli według stopnia podatności ma liczne zalety:

- każda z n klas zawiera identyczną liczbę pikseli (zajmuje taką samą część powierzchni obszaru badań);
- ostatnia, n-ta klasa to obszar o największej podatności na osuwanie;
- umożliwia prostą interpretację klas zagrożeń.

Opisany system podziału na klasy, zdaniem autorów SPM (Chung, Fabbri, 2003), ma przewagę nad alternatywnym podziałem na klasy łączące piksele o jednakowych przedziałach wartości. Jeżeli używa się rozmaitych przybliżeń funkcji sprzyjania (*FF*), to praktycznie niemożliwe jest sensowne porównywanie otrzymanych wyników, ze względu na ich różny charakter i różne liczby pikseli w poszczególnych klasach. Natomiast podział z użyciem rankingu wartości, a następnie utworzenie klas o jednakowej liczbie pikseli, znacznie ułatwia takie porównania. W pierwszej klasie zawsze znajdują się obszary o największych wartościach *FF*, w drugiej o kolejnych niższych itd. Jeżeli porównujemy mapy podatności na osuwanie uzyskane z kilku różnych modeli matematycznych, to analiza różnic wyników może się koncentrować wyłącznie na rozkładach przestrzennych poszczególnych klas. Wartości liczbowe funkcji *FF* (lub jej odpowiedników) mogą być różne, ale sens logiczny przynależności pikseli do danej klasy jest taki sam, niezależnie od użytej metody.

Kolejnym krokiem jest dokonanie weryfikacji otrzymanego modelu matematycznego. W tym celu wszystkie piksele osuwiskowe, które były użyte do uzyskania mapy podatności na osuwanie, są dzielone na dwie grupy. Jako kryterium podziału Chung i Fabbri (1993, 1999) zalecają podział czasowy: osuwiska zarejestrowane przed konkretną datą (rok) tworzą tzw. zbiór do predykcji (*estimation set*), a pozostałe, które zarejestrowano po tej dacie, stanowią zbiór do weryfikacji modelu (*validation set*). Nie jest wymagane, żeby obie grupy były równie liczne. Metoda weryfikacji jest oparta na założeniu, że czynniki, które spowodowały powstanie (lub uruchomienie) osuwisk, nie zmieniały się zasadniczo w długich przedziałach czasu. W sytuacji, gdy nie jest znany czas poszczególnych ruchów masowych, jest dopuszczany podział przestrzenny osuwisk na dwa zbiory. Podział osuwisk wyłącznie według kryterium przestrzennego pozwala uzyskać jedynie mapy podatności na osuwanie, a nie mapy zagrożenia. Taki podział jest więc mniej użyteczny.

Przy wykorzystaniu tylko zbioru starszych osuwisk generuje się mapę podatności na osuwanie według opisanej wyżej procedury, dzieloną na n klas o równej liczbie pikseli. Następnie na tę mapę nakłada się poligony reprezentujące osuwiska ze zbioru służącego do weryfikacji modelu (młodsze) i oblicza liczbę poligonów przypadających na każdą z n klas. Chung i Fabbri (2003) sugerują, żeby „zaliczyć" poligon do danej klasy, jeżeli co najmniej 50% pikseli danego osuwiska nakłada się na piksele tej klasy. Te zliczenia dla poszczególnych klas i poligonów są „ważone" przez liczbę pikseli w poligonach.

Zebrane w ten sposób informacje służą do opracowania tzw. krzywej efektywności predykcji (*prediction rate curve*), którą wykorzystuje się do oceny jakości modelu (Chung, Fabbri, 1999; Fabbri i in., 2002). Dla kolejnych klas zagrożenia osuwiskowego, wyznaczonych z modelu zbudowanego na zbiorze do predykcji, należy stablicować udział całkowitej powierzchni osuwisk (ułamek, procent) ze zbioru weryfikacyjnego przypadającej na daną klasę. Jeżeli model ma zdolność predykcyjną, to największy udział osuwisk ze zbioru weryfikacyjnego powinien przypaść na klasę o najwyższym przewidywanym zagrożeniu i powinien sukcesywnie maleć dla kolejnych klas. Narysowana na podstawie takiej tabeli krzywa efektywności predykcji powinna być krzywą monotonicznie rosnącą (Fabbri i in., 2002). Zdaniem Chunga i Fabbriego (2003, 2005) specjalną uwagę należy zwrócić na sytuacje, gdy występują odchylenia od monotoniczności krzywej efektywności predykcji. W takich przypadkach w pierwszej kolejności zalecana jest próba redukcji liczby klas zagrożenia poprzez grupowanie klas sąsiadujących w rankingu. Jeżeli kolejne próby takiego grupowania nie dają skutku, to oznacza to, że przyjęty sposób obliczania funkcji sprzyjania nie jest właściwie dobrany dla danego przypadku, albo że zestaw danych użytych do modelowania nie wystarcza do predykcji.

Jeżeli opisany powyżej proces weryfikacji modelu zostanie pomyślnie zakończony, można przystąpić do wyznaczenia wartości prawdopodobieństwa wystąpienia osuwisk dla poszczególnych pikseli obszaru badań. Wyniki analiz krzywych efektywności predykcyjnej, które opierały się wyłącznie na modelu zbudowanym na podstawie testowego podzbioru osuwisk z przeszłości (zbiór do testowania predykcji – *estimation set*), teraz są wykorzystywane do interpretacji wyników z pierwszego etapu obliczeń, gdzie model budo-

wano z wykorzystaniem pełnego zbioru wszystkich osuwisk. Jeżeli w skład zbioru przeznaczonego do weryfikacji modelu (*validation set*) wchodziły ruchy osuwiskowe zarejestrowane w pewnym przedziale czasu, np. w ciągu czterdziestu lat, to wyniki przewidywań na przyszłość można odnieść do podobnego przedziału czasu, czyli następnych 30–40 lat (Chung, Fabbri, 2005).

Następnym ważnym krokiem w ocenie tego prawdopodobieństwa jest oszacowanie łącznej powierzchni osuwisk, które mogą wystąpić na badanym terenie w przyszłości w przedziale czasu, którego dotyczy ocena. W tym przypadku naturalną konsekwencją założenia o równomiernym rozłożeniu w czasie (dla dłuższych okresów) występowania czynników aktywnych, takich jak opady, rozmarzanie itp., jest przyjęcie, że rozmiar przyszłych osuwisk powinien, w przybliżeniu, odpowiadać łącznej powierzchni osuwisk wchodzących w skład zbioru „do weryfikacji". Za Chungiem (2006) załóżmy, że przewidywana powierzchnia nowych osuwisk to α km^2. Interesuje nas obszar mapy podatności osuwiskowej zawarty w klasie R, o łącznej powierzchni r km^2, natomiast całkowita powierzchnia obszaru badań T wynosi t km^2. Jeżeli spośród α km^2 przyszłych osuwisk na obszar rozważanej klasy R przypadnie q km^2 osuwisk, to prawdopodobieństwo wystąpienia osuwiska na powierzchni dowolnego piksela z klasy R wyniesie $p_R = q/r$. Dla dowolnego piksela z całego obszaru badań prawdopodobieństwo wystąpienia osuwiska wynosi $p_T = \alpha/t$.

Prawdopodobieństwo warunkowe wystąpienia osuwiska w pikselu $\boldsymbol{x}$ należącym do klasy R jest dane wzorem:

$$\hat{p}_x = p_R \cdot p_T = \frac{q \cdot \alpha}{r \cdot t}. \qquad [10]$$

W przypadku, gdy przedmiotem zainteresowania jest prawdopodobieństwo wystąpienia osuwiska na obszarze k pikseli zajętych przez pewien obiekt (np. budynek) leżący w klasie R, odpowiednie prawdopodobieństwo może być oszacowane na podstawie wyrażenia:

$$\hat{p}_k = 1 - [1 - \hat{p}_x]^k. \qquad [11]$$

Opisany wyżej schemat postępowania wydaje się i jest w rzeczywistości dość skomplikowany, jednak samo wykonanie obliczeń przy użyciu oprogramowania *Spatial Prediction Modeling System* wytworzonego przez Spatial-Models Inc. (SPMS, 2004) jest w znacznej mierze ułatwione przez fakt zautomatyzowania najbardziej uciążliwych etapów obliczeń. Program ma stosunkowo niewielkie wymagania jeśli chodzi o postać map rastrowych stanowiących dane do obliczeń, jak np. wymóg, żeby granica pomiędzy poszczególnymi osuwiskami miała szerokość co najmniej 1 piksela. Najtrudniejszą część obliczeń stanowi analiza krzywych efektywności predykcji i dobór właściwej liczby klas na mapie podatności na osuwanie – te etapy obliczeń nie są i nie mogą być w prosty sposób zautomatyzowane i wymagają pewnego doświadczenia oraz staranności osoby dokonującej tych analiz.

ANALIZA I SPORZĄDZENIE MAPY ZAGROŻEŃ METODĄ ELR

Ze względu na specyfikę obszaru badań zasadniczą analizę zagrożenia osuwiskowego metodą ELR wykonano z zastosowaniem zmodyfikowanego kryterium doboru obszaru osuwisk. Modelowanie przeprowadzono z uwzględnieniem całej powierzchni osuwisk, obejmującej zarówno obszary oderwania (*rupture zones*, *depletion zones*, *scars*), jak i obszary złożenia (akumulacji). W przypadku rozważanego obszaru, a zwłaszcza w odniesieniu do osuwisk złożonych, obszary zasięgu skarp mogą być niewystarczające do wyznaczenia strefy generowania ruchu masowego. Obszar oderwania przy ruchach sukcesywnych ma zwykle większy zasięg. Odmładzanie istniejących osuwisk może być skutkiem niestabilności stoku zarówno w partiach w pobliżu ich korony, jak i w niżej położonych częściach.

Ponadto zniszczenia związane z ruchami masowymi są wynikiem nie tylko retrogresji skarpy głównej czy propagacji zsuwu na tereny położone poniżej, ale również postępującej deformacji terenu w obrębie istniejącej formy osuwiskowej (*landslide body*), co jest typowe dla osuwisk stale aktywnych, jak też dla przeważających na badanym obszarze tzw. powolnych ruchów osuwiskowych (*slow mass movements*). Co więcej w przypadku rozważanych osuwisk dysponujemy niepełną wiedzą na temat zmian ich zasięgu przestrzennego w wyniku aktywności w poszczególnych latach, co podkreślono w rozdziale dotyczącym aktywności osuwisk. W tej sytuacji wybór całego zasięgu osuwisk był dla obszaru Szymbarku rozwiązaniem najbardziej odpowiednim, zwłaszcza że w literaturze można znaleźć wskazówki, że ograniczenie się do stref oderwania prowadzi do zaniżenia oceny zagrożenia niektórych obszarów (Leroi, 1996).

Modelowanie przeprowadzono na podstawie następujących czynników pasywnych: litostratygrafii, użytkowania terenu, elewacji, nachylenia i ekspozycji stoków oraz odległości od głównych linii tektonicznych. Rozszerza to listę czynników przyjętych do obliczeń w stosunku do metody WoE (Mrozek i in., 2004) o wyniesienie terenu nad poziom morza, a przez to pozwala lepiej uwzględnić warunki naturalne obszaru badań.

Wszystkie tzw. mapy wejściowe (warstwy tematyczne) wykorzystane do modelowania wykonano w tej samej skali (1:10 000). Pozwoliło to uniknąć problemów obliczeniowych, które sygnalizował Chung (2006), a które pojawiają się przy korzystaniu z danych ciągłych i dyskretnych pochodzących z opracowań sporządzanych w różnych skalach.

Sporządzenie mapy zagrożeń dla obszaru badań w rejonie Szymbarku wymagało, w pierwszym etapie, wyznaczenia wartości funkcji sprzyjania (*FF*) dla wszystkich pikseli obszaru badań. Posłużono się w tym celu funkcją ELR, przybliżaną wzorami [5] i [8], odpowiednio dla czynników dyskretnych i ciągłych. Przybliżenia te sprowadzają się do wyrażenia funkcji ELR, zależnej od wielu parametrów (czynników pasywnych) poprzez iloczyny „cząstkowych" funkcji ELR, zależnych od poszczególnych czynników. W tym etapie do wyznaczenia wartości funkcji ELR wykorzystano zbiór obejmujący wszystkie analizowane osuwiska złożone.

Wyniki analiz statystycznych zależności między występowaniem osuwisk a poszczególnymi czynnikami pasywnymi zestawiono na figurach 8 i 9. Pierwsza z nich przedstawia wyniki dla wydzieleń litologicznych i użytkowania terenu, natomiast druga – dla nachylenia stoku i jego ekspozycji, odległości danego piksela od linii dyslokacji tektonicznych, a także elewacji terenu. Biorąc pod uwagę histogram występowania osuwisk na wydzieleniach litologicznych (fig. 8A), można zauważyć, że dominujące występowanie osuwisk wiąże się z obecnością warstw inoceramowych (60,3%) i łupków pstrych (25,5%). Na pozostałych utworach częstość występowania osuwisk nie przekracza 4%. Ograniczenie się jedynie do informacji o występowaniu osuwisk (stosowane w niektórych wariantach metod indeksowych) daje jednak zafałszowany obraz roli poszczególnych wydzieleń. Jeżeli uwzględni się informację o niewystępowaniu osuwisk na tych samych wydzieleniach litologicznych, to okazuje się, że np. warstwy inoceramowe nie mogą być traktowane jako wydzielenie litologiczne, będące istotnym czynnikiem determinującym predyspozycje do osuwania. W ich przypadku częstość niewystępowania osuwisk (61,4% na badanym obszarze) jest praktycznie taka sama jak częstość ich występowania. Faktyczna rola poszczególnych czynników jest wyraźnie odzwierciedlona na wykresach funkcji ELR. Zgodnie z powyższym w przypadku wydzieleń litologicznych (fig. 8B) widać wyraźnie dominujące znaczenie łupków pstrych jako czynnika pasywnego, wpływającego na występowanie osuwisk. Podobne wnioski można wyciągnąć w odniesieniu do użytkowania terenu (fig. 8C, D). Na podstawie przebiegu funkcji ELR (fig. 8D) widać dominującą rolę użytków zielonych oraz zakrzaczeń.

W wyniku przeprowadzania analogicznej analizy w odniesieniu do zmiennych ciągłych (fig. 9A–H) funkcja ELR pozwala wyodrębnić zakresy ich wartości sprzyjające występowaniu osuwisk. Jest to szczególnie użyteczne, gdy krzywe gęstości występowania pikseli osuwiskowych i nieosuwiskowych mają bardzo zbliżony przebieg (fig. 9A, E). Kształt funkcji ELR w zależności od nachylenia stoku wskazuje na dominującą rolę stoków o nachyleniu mieszczącym się w przedziale od 8 do 18° (fig. 9B). Bimodalny rozkład maksimów ELR dla ekspozycji stoków (ENE i WSW) odzwierciedla fakt, że większość osuwisk na badanym obszarze jest zlokalizowana na stokach schodzących ortogonalnie do osi dolin Bystrzanki i Biczysk, które przebiegają niemal równolegle z północnego zachodu na południowy wschód. W przypadku wyniesienia terenu można zauważyć, że maksima rozkładów gęstości występują w przedziale 320–400 m n.p.m.

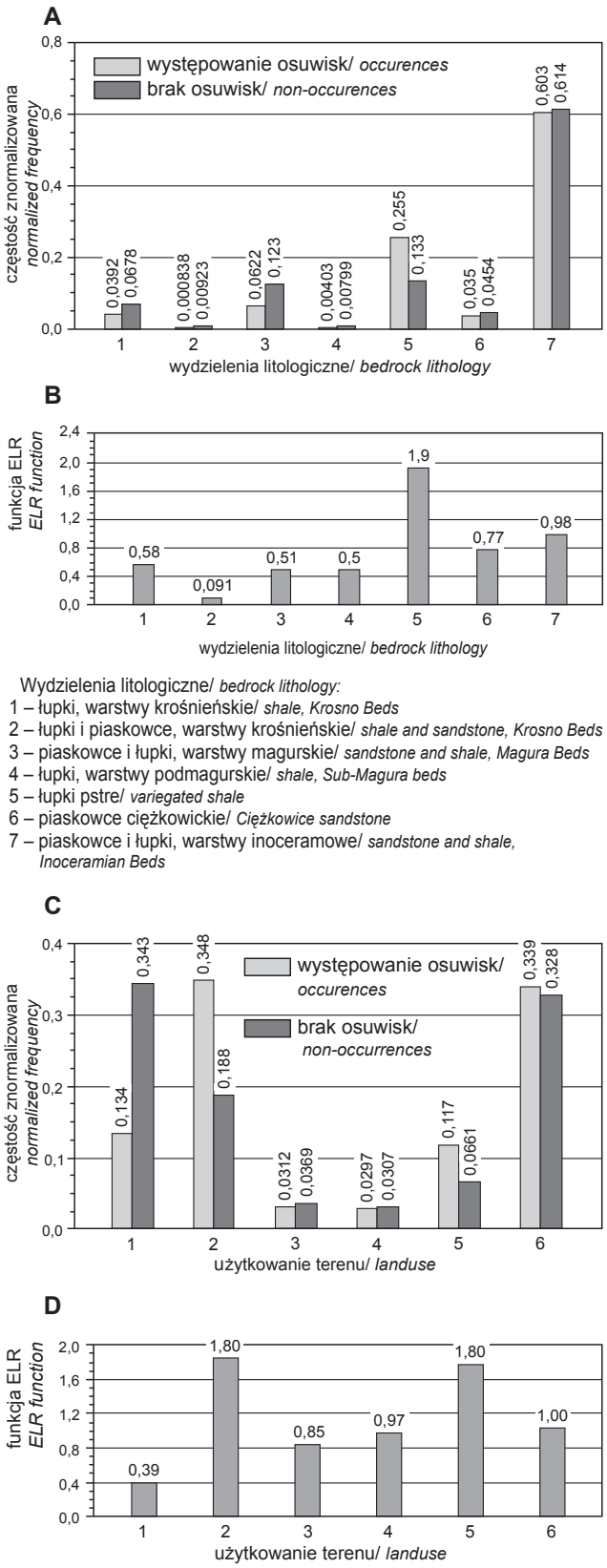


Fig. 8. Rozkłady częstości znormalizowanych występowania pikseli osuwiskowych i nieosuwiskowych dla zmiennych kategoryzowanych oraz odpowiadające im empiryczne funkcje ilorazu wiarygodności (ELR) dla obszaru badań

Frequency distributions of landslide and non-landslide pixels for categorized (discrete) data and corresponding ELR functions for the study area

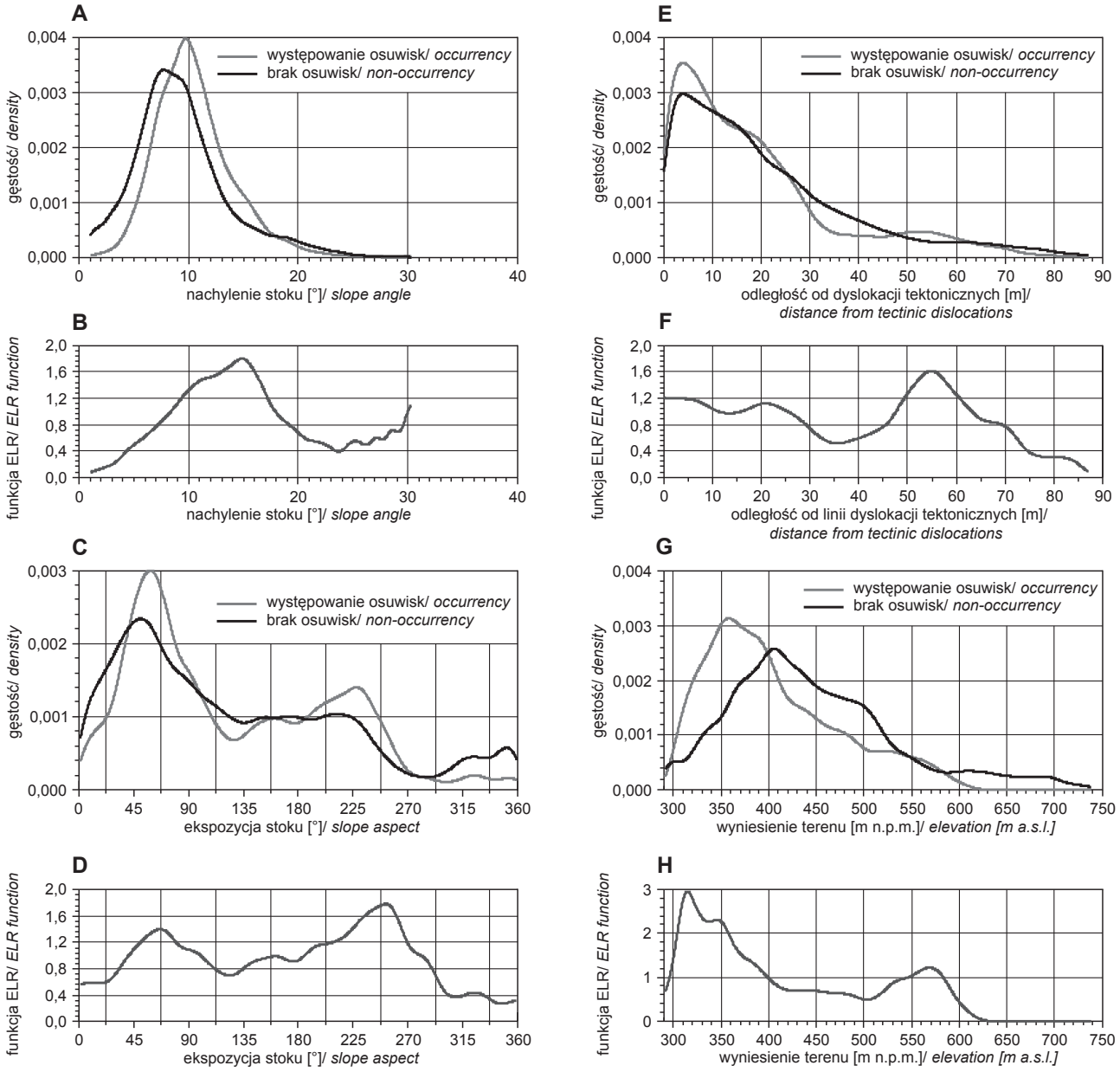


Fig. 9. Rozkład występowania pikseli osuwiskowych i nieosuwiskowych w funkcji zmiennych ciągłych oraz odpowiadające im empiryczne funkcje ilorazu prawdopodobieństwa (ELR)

Density distributions of landslide and non-landslide pixels for continuous data and corresponding ELR functions

dla pikseli osuwiskowych, natomiast maksima wartości funkcji ELR (fig. 9G–H) – w przedziale 300–400 m n.p.m. oraz pomiędzy 550–580 m n.p.m. Jest to zgodne z rozmieszczeniem osuwisk złożonych na obszarze badań. Pierwsze maksimum funkcji ELR odpowiada występowaniu osuwisk na elementach rzeźby pogórskiej, a drugie maksimum – znacznie mniej licznym osuwiskom na elementach rzeźby beskidzkiej.

Do podobnych wniosków skłania analiza roli tych samych czynników dla zbioru osuwisk, których aktywność obserwowano w latach 1969–2003. W stosunku do zbioru wszystkich osuwisk współczesne ruchy masowe w nieznacznie mniejszym stopniu są związane z podłożem łupków pstrych (spadek wartości ELR z 1,9 do 1,6). Widoczne jest także, że ruchy te następowały w większości na niżej położonych stokach, w pobliżu siedzib ludzkich, co znajduje potwierdzenie we wzroście wartości funkcji ELR dla parcel i sadów. Tak więc w przypadku osuwisk aktywnych po 1969 r. nie występują znaczące zmiany względnych ról czynników pasywnych, wpływających na ruchy masowe na badanym obszarze w stosunku do osuwisk znanych z okresu wcześniejszego.

Mnożąc wartości cząstkowych funkcji ELR przedstawionych na figurach 8 i 9 dla każdego piksela obszaru badań, otrzymujemy wartość łącznej funkcji ELR dla wszystkich czynników. Obliczone w ten sposób wartości funkcji reprezentują prognozowany względny poziom podatności na osuwanie w skali ciągłej w każdym punkcie obszaru badań, a ich wizualizacją jest mapa podatności na osuwanie. Mapa ta zawiera 200 stref, z których każda obejmuje 0,5% całego obszaru. Najwyższe numery stref odpowiadają rejonom najwyższej podatności na osuwanie. Strefy te koncentrują się w dolnej i środkowej części zlewni Bystrzanki – po obu stronach doliny potoku, na północno-wschodnich stokach Taborówki oraz na zboczach doliny Biczysk, a także w najwyżej położonych rejonach obszaru badań na północno-wschodnich zboczach garbu Jeleniej Góry i Maślanej Góry.

Jak można ocenić z analizy rozkładu stref najbardziej podatnych na osuwanie i zasięgu osuwisk, model zapewnia bardzo dobrą predykcję, adekwatnie uwzględniając wpływ czynników geośrodowiskowych.

W drugim etapie modelowania przeprowadzono ocenę zdolności predykcyjnej modelu opartą na czasowym podziale zbioru osuwisk na dwa podzbiory. W jednym podzbiorze znalazły się osuwiska, których aktywność (w tym wielokrotną) obserwowano po 1969 r., aż do końca okresu badań, czyli do 2004 r., tj. w ciągu 35 lat. W drugim zbiorze znalazły się pozostałe osuwiska, znane z okresu wcześniejszego, które nie były aktywne po 1969 r. Taki podział na zbiory, odpowiednio do weryfikacji modelu i testowania predykcji, umożliwia sporządzenie prognozy na następny okres o podobnej długości, jak sugerują to Chung i Fabbri (2005). Na podstawie porównania uzyskanych map można wnioskować, że rozmieszczenie osuwisk ze zbioru weryfikującego jest zgodne z lokalizacją stref wyznaczonych na podstawie zbioru osuwisk do testowania predykcji, a odpowiadających największym wartościom podatności na osuwanie. Jednak ilościowa weryfikacja poprawności modelu polega na sporządzeniu wykresu krzywej efektywności predykcji (fig. 10). Analiza tego wykresu (czarna linia) jednoznacznie potwierdza dobrą jakość modelu predykcyjnego i poprawny dobór czynników pasywnych. Krzywa jest monotonicznie rosnąca. Po uwzględnieniu 20% obszaru uznanego za podatny na osuwanie model odtwarza 50% prognozowanych osuwisk, natomiast do odtworzenia 80% osuwisk zbioru weryfikacyjnego wystarczy 60% powierzchni obszaru uznanego za podatny na osuwanie. Do obliczenia prawdopodobieństwa wystąpienia osuwiska w pikselu obszaru badań (tj. na powierzchni 1 ara) zgodnie ze wzorem [10] potrzebne wartości krzywej efektywności predykcyjnej obliczono na podstawie dwuparametrowej funkcji:

$$f(x) = 1 - \exp(\alpha + \beta \cdot x) \qquad [12]$$

dopasowanej do rozkładu empirycznego metodą algorytmów genetycznych (funkcja *genoud* z pakietu rgenoud) z systemu obliczeń statystycznych *R*. Optymalne parametry krzywej [12] wynoszą: $\alpha = 0{,}0500$ i $\beta = -3{,}2129$.

Sporządzona na podstawie tych obliczeń mapa stanowi wynikową **mapę zagrożenia** (fig. 11), ponieważ przedstawia

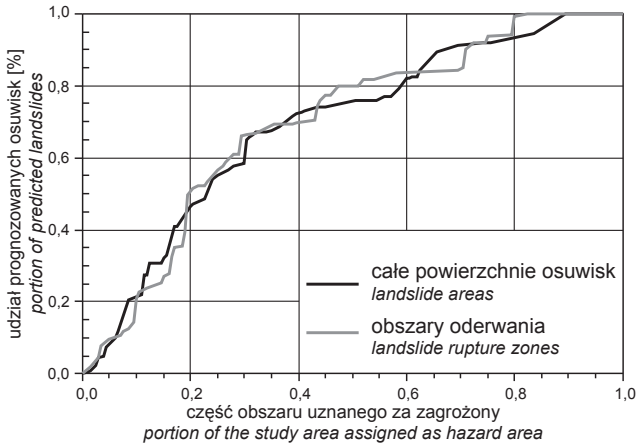


Fig. 10. Krzywe efektywności predykcyjnej modeli opartych na empirycznej funkcji ilorazu wiarygodności ELR

Predictive rate curves for ELR models

wartości prawdopodobieństwa wystąpienia osunięć w przedziale czasu odpowiadającym długości okresu przyjętego do predykcji – w tym przypadku 35 lat.

Nie mogąc zignorować faktu, że przy wyznaczaniu obszarów podatnych na osuwanie często uwzględnia się tylko obszary oderwania (m.in. Chung, Fabbri, 1999, 2002, 2005; Disperati i in., 2002; Zêzere, 2002), uznano za niezbędne wykonanie obliczeń pozwalających na porównanie predykcji uzyskiwanych przy zastosowaniu tego właśnie podejścia i modyfikacji przyjętej w tej pracy (tj. modelowaniu z uwzględnieniem całej powierzchni osuwisk).

Przy przyjęciu za warstwę referencyjną (*occurrences*) obszarów oderwania ponownie przeprowadzono całą procedurę modelowania. Wyznaczono odpowiednie funkcje ELR dla zmiennych kategoryzowanych i ciągłych. Przyjęte do modelowania obszary oderwania zajmują mniejszą powierzchnię i są zlokalizowane w najwyżej położonych częściach osuwisk, co istotnie zmienia rozkłady częstości i gęstości w poszczególnych kategoriach zmiennych dyskretnych i zakresach wartości zmiennych ciągłych (Mrozek, 2008). W przypadku rozważanego modelu, opartego na analizie obszarów oderwania, drastycznie obniżyło się znaczenie łupków pstrych jako czynnika wpływającego na procesy osuwiskowe (wartość funkcji ELR zmalała z 1,90 do 0,98), natomiast zwiększyło się znaczenie piaskowców ciężkowickich. W tym drugim przypadku wartość funkcji ELR wzrosła z 0,77 do 1,50, jednak przy niewielkiej częstości występowania osuwisk na utworach tego wydzielenia. Zasadniczej zmianie uległa względna rola sposobów użytkowania terenu, co szczególnie wyraźnie widać na przykładzie użytków zielonych i zakrzaczeń oraz lasów. Wartość funkcji ELR zmalała piętnastokrotnie i prawie dwukrotnie odpowiednio dla użytków zielonych i zakrzaczeń, a wzrosła z 0,93 do 1,50 dla lasów. Porównanie rozkładów gęstości oraz funkcji ELR w odniesieniu do zmiennych ciągłych pozwala stwierdzić, że najwyraźniejsze zmiany nastąpiły dla odległo-

ści od dyslokacji tektonicznych i elewacji terenu. Pierwsze maksimum funkcji ELR dla elewacji terenu przesunęło się z 320 do około 400 m n.p.m., natomiast w przypadku drugiego maksimum dla pikseli odpowiadających wyżej położonym częściom terenu (zakres wysokości ok. 580 m n.p.m.) wartość funkcji ELR wzrosła dwukrotnie.

Przy zastosowaniu procedur analogicznych do tych, które użyto w przypadku całych osuwisk, otrzymano mapę podatności na osuwanie.

W przypadku obszarów oderwania, podobnie jak miało to miejsce przy rozważaniu całych powierzchni osuwisk, kolejnym etapem modelowania było wyznaczenie krzywej efektywności predykcji oraz obliczenie wartości prawdopodobieństwa. Konsekwentnie zachowano analogiczny podział czasowy analizowanych pikseli obszarów oderwania na zbiór służący do testowania predykcji (piksele z osuwisk znanych przed 1969 r.) i zbiór do weryfikacji modelu (piksele z osuwisk aktywnych po 1969 r.). Krzywa efektywności predykcji wykazuje słabszą monotoniczność (fig. 10 – szara linia). Posługując się funkcją *genoud* systemu *R*, dopasowano funkcję opisującą tę krzywą:

$$f(x) = 1 - \exp(0{,}0811 - 3{,}411 \cdot x)\,, \qquad [13]$$

co z kolei pozwoliło na wyznaczenie wartości prawdopodobieństwa wystąpienia osunięć dla pikseli poszczególnych klas i sporządzenie mapy zagrożenia (fig. 12), dla okresu 35 lat. Tak wyznaczone wartości prawdopodobieństwa są niemal trzykrotnie niższe niż wynika to z modelu wykorzystującego całą powierzchnię osuwisk. Jest to efekt ograniczenia analizy do obszarów oderwania, zajmujących znacznie mniejszą powierzchnię na badanym obszarze.

PORÓWNANIE WYNIKÓW

Mapy podatności osuwiskowej

W modelu opartym na obszarach oderwania zdecydowanie większa podatność na osuwanie jest przewidywana na elementach rzeźby beskidzkiej (pas na stokach garbu Maślanej Góry i Jeleniej Góry na wysokości ok. 600 m n.p.m.) i na wyższych partiach rzeźby podgórskiej (garb Wiatrówek i częściowo Taborówki). Z kolei model oparty na całej powierzchni osuwisk wyraźnie podkreśla znaczenie serii łupków pstrych i częściowo łupków warstw krośnieńskich dolnych. Skutkuje to przewidywaniem większej podatności na osuwanie w zlewni potoku Biczyska na stokach po obu stronach tego cieku oraz w przyrzeczu Ropy, a także w dolnej części doliny Bystrzanki. Model ten przewiduje również wyższą podatność na osuwanie tylko na stosunkowo niewielkich obszarach zlokalizowanych na północno-wschodnich stokach garbu Maślanej Góry. Na pozostałej części badanego obszaru nie występują aż tak wyraźne różnice w rozkładzie klas podatności na osuwanie według obydwu modeli.

Wyniki obliczeń podatności na osuwanie z obydwu wariantów modelowania ELR oraz opisane we wcześniejszych pracach (Mrozek i in., 2004; Mrozek, 2008) wyniki uzyskane metodą wag przesłanek (WoE) wskazują lokalizację obszarów najbardziej podatnych na osuwanie w dolnej części zlewni Bystrzanki, na grzbietach pogórskich w górnej i środkowej części zlewni Biczysk we wsi Ropica Polska oraz w przyrzeczu Ropy w rejonie osuwiska Kawiory. Zasięg obszarów najbardziej podatnych na osuwanie (przewidywanych wyłącznie na podstawie obszarów oderwania) jest bardziej zwarty i koncentruje się w górnych partiach południowo-wschodnich stoków Taborówki. Z kolei model ELR oparty na całej powierzchni osuwisk wskazuje tereny najbardziej podatne na osuwanie przede wszystkim we wschodniej części obszaru badań, natomiast partie wierzchowinowe przyjmuje jako mało podatne.

Najlepsze wyniki oceny podatności na osuwanie dla obszaru przyrzecza Ropy uzyskuje się na podstawie przewidywań modelu uwzględniającego obszary oderwania, który w odróżnieniu od WoE nie wskazuje na podwyższoną podatność w rejonie niemal płaskiej terasy zalewowej Ropy.

Mapy zagrożenia osuwiskowego

Obydwa testowane warianty modelowania ELR przedstawiają zagrożenie w kategoriach prawdopodobieństwa. Omówiony wcześniej sposób obliczania tego prawdopodobieństwa (wzory [10–11]) wprowadza zmiany w rozmieszczeniu obszarów zagrożonych w stosunku do przestrzennych rozkładów podatności na osuwanie.

Model oparty na obszarach oderwania przewiduje znacznie mniejszy zasięg obszarów zagrożonych. Skupiają się one we wschodniej części obszaru badań (przede wszystkim na stokach Taborówki i Wiatrówek zapadających w kierunku Bystrzanki) oraz na północno-wschodnim stoku garbu Jeleniej Góry i Maślanej Góry (fig. 12). W tym ostatnim przypadku jest to strefa kontaktu warstw magurskich z łupkami warstw podmagurskich.

Zagrożenie przewidywane przez model oparty na całej powierzchni osuwisk ma znacznie większy zasięg terytorialny. Strefy wysokiego zagrożenia wyznaczone przez ten model pozostają w wyraźnym związku z rozmieszczeniem łupków pstrych na kontakcie z warstwami inoceramowymi w zlewni Bystrzanki i Biczysk. Co więcej w zlewni Biczysk model ten przewiduje kilkunastokrotnie wyższe prawdopodobieństwo wystąpienia osuwisk niż model uwzględniający wyłącznie obszary oderwania. Ponadto eksponowane jest także zagrożenie na stokach Maślanej Góry, a nawet jego zasięg jest większy (fig. 11) niż w przewidywaniach modelu uwzględniającego obszary oderwania. Rozciąga to strefę zagrożenia na rejon występowania łupków pstrych i warstw podmagurskich (łupki z Szymbarku). Większe zagrożenie osuwiskowe jest przewidywane również w środkowej części obszaru badań w rejonie Bystrej.

W przypadku stoków Taborówki schodzących ku przyrzeczu Ropy model oparty na strefach oderwania przewiduje zagrożenie osuwiskowe jedynie na wąskim obszarze w wyżej położonych partiach stoków. Wariant modelu wykorzy-

stujący pełną powierzchnię osuwisk przewiduje rozległy obszar bardzo dużego zagrożenia obejmujący również niżej położone partie stoków. Słuszność tych ostatnich przewidywań potwierdzają prowadzone pomiary inklinometryczne (Zabuski, 2004), które śledzą tempo przemieszczeń osuwiska Kawiory.

W świetle tych wyników użycie modelu ELR opartego na całej powierzchni osuwisk wydaje się być słusznym wyborem dla badanego obszaru.

Wszystkie zastosowane metody, zarówno wcześniejsze obliczenia WoE, jak i oba warianty ELR, wykazują silną zależność zasięgu stref zagrożenia od rozmieszczenia linii głównych dyslokacji tektonicznych.

Trzy wymienione sposoby modelowania nie przewidują istnienia strefy bardzo dużego zagrożenia w środkowej części eksponowanego ku północy i północnemu wschodowi stoku Jeleniej Góry, zbudowanego z piaskowców warstw magurskich. Tymczasem w tej części stoku znajduje się duże (blisko 9-hektarowe) osuwisko nr 66 (fig. 4). Fakt, że niezależne analizy statystyczne dają na tym obszarze niemal identyczne wyniki, pozwala sądzić, że powstanie osuwiska nr 66 było związane z oddziaływaniem czynników pasywnych nieuwzględnionych w stosowanych modelach. Jako rozszerzenie listy czynników biernych można rozważać np. spękania piaskowców magurskich lub inne uwarunkowania strukturalne, jednak parametry tego typu rzadko są dostępne.

RYZYKO OSUWISKOWE NA OBSZARZE BADAŃ

Ocena ryzyka osuwiskowego sprowadza się do powiązania zagrożenia z oceną potencjalnych strat oraz powinna prowadzić do sporządzenia mapy ryzyka (Varnes, 1984; Einstein, 1997; van Westen i in., 2006). Takie ujęcie problemu wymaga, żeby zagrożenie i przewidywane konsekwencje zostały zdefiniowane jako niezależne prawdopodobieństwa. Dotychczas przedyskutowano przestrzenne zróżnicowanie zagrożenia osuwiskowego na obszarze badań, co ilustruje figura 11. Poniżej zostanie omówiony sposób oszacowania strat spowodowanych osuwaniem na obszarze badań. Straty te szacuje się z uwzględnieniem elementów eksponowanych na oddziaływanie ruchów masowych oraz stopnia (procentu) ich uszkodzenia (*vulnerability*). Oszacowanie to zawężono do strat związanych z destrukcją zasobów materialnych, natomiast pominięto aspekty związane z możliwością utraty życia bądź uszczerbku na zdrowiu.

ELEMENTY EKSPONOWANE NA ODDZIAŁYWANIE RUCHÓW MASOWYCH, ICH IDENTYFIKACJA I WARTOŚĆ ODTWORZENIOWA

Przez elementy eksponowane (*elements at risk*) rozumie się wszystkie obiekty, które mogą ulec całkowitemu zniszczeniu lub częściowemu uszkodzeniu w wyniku oddziaływania różnych typów ruchów masowych. Należą do nich zabudowania, parcele, użytkowane grunty, infrastruktura itp., a także działalność ekonomiczna, w tym usługi (UN-ISDR, 2004; Hufschmidt i in., 2005). Chociaż w klasycznym równaniu Varnesa (1984) wyrażono je za pomocą liczebności (np. liczbą zniszczonych domów, liczbą ofiar itp.), to w późniejszych pracach znacznie częściej stosowano wartość finansową (m.in. Leone i in., 1996; Glade, 2003). Taki wariant został przyjęty w przypadku omawianego tutaj obszaru badań.

Ponieważ z ekonomicznego punktu widzenia ryzyko wiąże się z możliwością podjęcia różnorodnych decyzji, muszą się one opierać na pewnym ujednoliconym kryterium, tak aby alokacja zawsze ograniczonych zasobów finansowych była optymalna. Dlatego przy obliczaniu ryzyka należy posługiwać się tzw. wartością odtworzeniową dóbr[1] (Giacomelli, 2003), przez którą rozumie się nakłady finansowe potrzebne do przywrócenia stanu sprzed zaistniałego wydarzenia niszczącego (w tym przypadku sprzed zniszczenia przez ruchy masowe).

Uwzględnienie w obliczeniach ryzyka elementów eksponowanych na destrukcyjne oddziaływanie osuwisk sprowadzało się zatem do identyfikacji tych elementów oraz do wyznaczenia ich wartości odtworzeniowej.

Na badanym obszarze w ocenie ryzyka uwzględniono następujące elementy, które są narażone na oddziaływanie ruchów masowych:

- główne typy użytkowania terenu (lasów, gruntów ornych, łąk, sadów przydomowych, działek przydomowych czyli parcel);
- zabudowania (domy, budynki gospodarcze, kościół, budynki użyteczności publicznej itp.);
- drogi o różnej kategorii (asfaltowa droga powiatowa, utwardzone drogi gminne, nieutwardzone drogi dojazdowe itp.);
- infrastruktura liniowa (linie elektryczne, gazociągi, wodociągi, linii telefoniczne).

Jak dotąd nie istnieje ani standardowa procedura określania wartości odtworzeniowej elementów eksponowanych ani gromadzenia danych, potrzebnych do jej wyznaczenia, zatem celowe wydaje się przedstawienie, jak takie dane uzyskano w przypadku elementów eksponowanych na rozpatrywanym obszarze.

Wartości odtworzeniowe dróg i pozostałej infrastruktury liniowej określono na podstawie informacji pochodzącej od lokalnych przedsiębiorstw odpowiedzialnych za utrzymanie, konserwację i naprawy awaryjne.

[1] Przyjęta tu definicja wartości odtworzeniowej jest najbliższa definicji stosowanej w Polsce w ubezpieczeniach na wartość odtworzeniową stosowaną w odniesieniu do dóbr ruchomych

Wartości odtworzeniowe gruntów użytkowanych rolniczo pochodziły z analizy danych statystycznych zamieszczanych w komunikatach GUS, a wartość lasów przyjęto według oszacowania omówionego w pracy Mendys i in. (2005, 2006).

Wartość odtworzeniowa budynków była bardzo trudna do określenia. Biura nieruchomości i indywidualni oferenci rynkowi nie posługują się taką wielkością, a przedstawiane przez te podmioty do publicznej wiadomości wartości transakcji kupna–sprzedaży też nie zawsze odzwierciedlają faktyczną wartość budynków. W niniejszej monografii wykorzystano dane, które uzyskano podczas realizacji projektu ALARM. Wówczas na badanym obszarze przeprowadzono ankietę, która pozwoliła na zebranie informacji o wielkości, stanie technicznym budynków w gospodarstwach domowych oraz ich wyposażeniu, a także ich wartości szacowanej przez właścicieli. Na podstawie tych danych i porównania z przeciętnymi transakcjami kupna–sprzedaży w tym rejonie sporządzono zestawienie wartości odtworzeniowej budynków. Posłużyły one do oszacowania ryzyka osuwiskowego w odniesieniu do zabudowy. Ankietą objęto 435 gospodarstw, co pozwoliło na ekstrapolację oszacowań na inne budynki na badanym obszarze, dla których nie zebrano informacji szczegółowej.

WRAŻLIWOŚĆ (*VULNERABILITY*), CZYLI STOPIEŃ STRAT LUB STOPIEŃ USZKODZENIA – SPOSÓB OSZACOWANIA NA OBSZARZE BADAŃ

W koncepcji wrażliwości stosowanej w literaturze osuwiskowej (Varnes, 1984; UN-ISDR, 2004) przyjmuje się, że pod wpływem oddziaływania destrukcyjnego zjawiska dany obiekt ulegnie całkowitemu lub częściowemu zniszczeniu. Miara tego zniszczenia wyraża się liczbą z przedziału 0–1 lub procentowo 0–100%. Przy czym wartość dolnej granicy przedziału oznacza brak zniszczenia, natomiast górnej – całkowitą destrukcję. Zatem określa się, w jakim stopniu dany obiekt może zostać uszkodzony w wyniku oddziaływania procesu osuwiskowego. Sprawia to, że wrażliwość bywa utożsamiana z prawdopodobieństwem strat (Giacomelli, 2003).

W polskich badaniach osuwiskowych problem wrażliwości był dotychczas praktycznie pomijany. Nic więc dziwnego, że dla badanego obszaru nie istnieje standardowa „funkcja wrażliwości" (Leone i in., 1996), określająca stopień strat w powiązaniu z typem i intensywnością konkretnego wydarzenia osuwiskowego. Następstwem tego była konieczność znalezienia rozwiązania, które można by traktować jako sposób określania wrażliwości na podstawie dostępnych danych lokalnych.

Wykorzystano w tym celu przedstawione poniżej koncepcje.

Remondo i in. (2004, 2005) zaproponowali wyznaczenie wrażliwości na podstawie statystyk skutków ruchów masowych obserwowanych w przeszłości oraz kwot wydatkowanych na odtworzenie lub naprawę zniszczonych dóbr, a następnie porównanie wartości finansowej zniszczeń z aktualną wartością obiektu narażonego na destrukcję. Wówczas wrażliwość wyraża stopień potencjalnych strat finansowych i można ją przedstawić przy pomocy wartości z przedziału od 0 do 1 (zgodnie z koncepcją Varnesa).

Wrażliwość zdefiniowaną w ten sposób oblicza się dla każdej klasy obiektów osobno według wzoru:

$$V = \frac{\text{wartość finansowa zniszczeń (w analizowanym okresie)}}{\text{koszt nowego obiektu}} \qquad [14]$$

Na badanym obszarze dostępne dane o zniszczeniach osuwiskowych i nakładach na związane z nimi naprawy dotyczyły przede wszystkim infrastruktury liniowej. W tych przypadkach wrażliwość wyznaczono przy wykorzystaniu metody Remondo i in. (2005). W celu zilustrowania tej procedury poniżej przedstawiono sposób, w jaki wyznaczono wrażliwość w przypadku dróg. Ruchy osuwiska Bystrzyca w 1974 r. spowodowały destrukcję korpusu powiatowej drogi asfaltowej (Szalowa–Gorlice) na odcinku o długości ok. 250 m (potrzebna była odbudowa) oraz deformacje nawierzchni na odcinku ok. 1,5 km. Poza tym ta droga asfaltowa w omawianym okresie (1968–2003) była niszczona jeszcze kilkakrotnie (5–6 razy) w miejscach oddziaływania osuwisk (odcinki 200–500 m). Ze względu na powstałe zniszczenia naprawy ograniczały się przede wszystkim do uzupełniania nawierzchni. Na podstawie informacji uzyskanych od przedsiębiorstwa drogowego (działającego na badanym obszarze), skumulowane koszty przeprowadzonych napraw mieszczą się w kwocie 6 105 000 zł, a wartość drogi wynosi 12 615 000 zł (wg cen z 2004 r.). Na podstawie wzoru [14] obliczono stopień strat, czyli wrażliwość drogi asfaltowej $V = 0{,}484$, a następnie wartość tę zaokrąglono do 0,5. Podobne obliczenia przeprowadzono w przypadku innych dróg utwardzanych i żwirowych. W przypadku nieutwardzonych (lub polnych) dróg dojazdowych ich wrażliwość została określona jako 1 (tab. 3), ze względu na to, że są one niszczone praktycznie co roku, a koszt naprawy jest prawie równy kosztom budowy nowego odcinka.

Podobną procedurę zastosowano również do oceny wrażliwości linii elektrycznych, gazociągów i wodociągów (tab. 3).

W przypadku innych elementów eksponowanych ich wrażliwość określono metodami półilościowymi (AGS, 2000; Hollenstein, 2005).

Wrażliwość budynków na badanym obszarze wyznaczono pośrednio, zgodnie z sugestiami, które sformułował Glade (2003). Do wyznaczenia wrażliwości budynków posłużyło podobieństwo do rejonów, w których zniszczenia spowodowane osuwiskami miały pełniejszy opis. W tym celu wykorzystano dane z inwentaryzacji osuwisk przeprowadzonej przez zespół pracowników OK PIG w 1997 r. (Poprawa i in., 1997). Ponieważ inwentaryzacja z 1997 r. objęła tereny byłego województwa nowosądeckiego i tarnowskiego, a więc obszar Małopolski, na potrzeby tej pracy przyjęto, że sposób budowy i używane materiały nie różnią się zasadniczo od stosowanych na obszarze badań w okolicach Szymbarku. Przeanalizowano 268 przypadków szkód osuwisko-

wych zarejestrowanych podczas inwentaryzacji, informacje o charakterze i stopniu zniszczeń można zatem uznać za statystycznie ważne. Dane i komentarze opisowe dotyczące rodzaju zniszczeń, zawarte w kartach osuwiskowych sporządzonych podczas inwentaryzacji, stały się podstawą do wyznaczenia w niniejszej monografii wrażliwości budynków i gruntów w nawiązaniu do opracowań znanych z literatury (Leone i in., 1996; Glade, 2003). Wyznaczone wartości zamieszczono w tabeli 4.

W przypadku lasów występujących na badanym obszarze na podstawie konsultacji z leśnikami o zakresie strat w drzewostanie, przy uwzględnieniu jego struktury wiekowej, wrażliwość oszacowano na 0,5. Podobnie określono wrażliwość użytków rolnych – wzięto pod uwagę zakres prac polowych i straty plonów. Ze względu na uzyskanie pełniejszej informacji o zakresie szkód, przedstawione w niniejszej monografii wartości wrażliwości różnią się jednak od wartości przyjętych we wcześniejszych opracowaniach (Mendys i in., 2005, 2006).

Na podstawie oszacowanej wrażliwości sporządzono mapy pokazujące rozkład przestrzenny tego parametru dla poszczególnych elementów eksponowanych na całym obszarze badań.

Wrażliwość zmienia się w zależności od odporności elementu na destrukcyjne wydarzenia osuwiskowe o zróżnicowanym natężeniu. Przypisana jej wartość liczbowa jest tylko miarą specyfiki danego obiektu i nie powinna stać się pod-

Tabela 4

Wrażliwość wybranych elementów narażonych na zagrożenie związane z oddziaływaniem osuwisk na obszarze badań i ich wartości odtworzeniowe (w cenach z 2004 roku)

Vulnerability of selected elements at risk and their financial values (costs of 2004) in the study area

Rodzaj eksponowanego elementu	Wrażliwość (*vulnerability*) *V*	Wartość odtworzeniowa* w zł na 1 piksel (ar)
Infrastruktura liniowa		
Drogi		
▪ asfaltowe	0,5	2 500
▪ utwardzane tzw. „smołówki”	0,7	1 200
▪ żwirowe,	0,8	800
▪ dojazdowe/polne	1,0	150
Gazociągi		
▪ główna magistrala	0,4	
▪ średnioprężny (rozprowadzający po wsi, rury sztywne)	0,7	2 000
▪ nitka do indywidualnego odbiorcy	0,8	1 500
Linie elektryczne		
▪ średniego napięcia	0,75	880
▪ niskiego napięcia	0,9	990
Użytki		
▪ parcele (działki siedliskowe)	0,7	300
▪ grunty orne	0,8	11
▪ użytki zielone	0,7	7
▪ sady przydomowe	0,5	11
▪ lasy	0,5	70
▪ zakrzaczenia	0,6	0,1
Zabudowania		
▪ domy drewniane (bale, szalowane)	0,9	80 000*
▪ konstrukcje lekkie	0,8	15 000*
▪ ceglane lub z pustaków, bloczków	0,7	120 000*
▪ konstrukcje cementowe, zbrojone	0,4	b.d.

* przyjęte wartości średnie; w przypadku gospodarstw ankietowanych używano faktyczną wartość odtworzeniową każdego budynku; b.d. – brak danych

stawą do kompilowania w jedną całość map wrażliwości sporządzonych dla różnych obiektów.

Z uwzględnieniem powyższych spostrzeżeń, jako sposób przedstawiania potencjalnych strat zaproponowano, żeby wyrazić je jako iloczyn wrażliwości i wartości odtworzeniowej dla każdego typu elementów eksponowanych osobno $V_i \cdot E_i$ (Mrozek, 2008). Dzięki temu było możliwe sporządzenie mapy przedstawiającej potencjalne straty finansowe (*PS*) przypisane poszczególnym pikselom. Kompilacja poszczególnych warstw rastrowych pozwoliła na obliczenie całkowitych strat finansowych na piksel. Tak powstałą mapę nazwano „Mapą potencjalnych strat finansowych". Przedstawia ona sumę iloczynów

$$PS = \sum_{i=1}^{L_{warstw}} \sum_{j=1}^{L_{wydzieleń}} V_{j,i} \cdot WO_{j,i} \qquad [15]$$

(wrażliwości danego elementu eksponowanego z warstwy j – $V_{j,i}$ i jego wartości odtworzeniowej $WO_{j,i}$), czyli ewentualne straty finansowe związane z zagrożeniem osuwiskowym. Na mapie tej wyraźnie zaznacza się dysproporcja wartości pomiędzy pikselami odpowiadającymi elementom infrastruktury a tymi, które odpowiadają użytkowaniu terenu. Mapa ta jest cennym uzupełnieniem dla map wrażliwości, gdyż może być łatwo interpretowana. Stanowi ona również ważny etap pośredni, pozwalający na ocenę ryzyka w skali całego obszaru badań.

MAPA RYZYKA – DYSKUSJA WYNIKÓW

Oszacowanie ryzyka w skali całego obszaru oznacza powiązanie informacji o prawdopodobieństwie zagrożenia osuwiskowego z potencjalnymi stratami. Obliczenie ryzyka na badanym obszarze sprowadzało się w tym przypadku do przemnożenia prawdopodobieństwa wystąpienia osuwiska w danym pikselu przez odpowiadającą mu wartość potencjalnych strat. Powstała w taki sposób mapa rastrowa (fig. 13) przedstawia rozkład przestrzenny możliwych szkód, wyrażonych finansowo z uwzględnieniem zagrożenia wynikającego z oddziaływania osuwisk złożonych. Zastosowana tu technika sporządzenia mapy ryzyka nawiązuje do rozwiązań, które opisali Chung i Fabbri (2005) oraz Remondo i in. (2004, 2005) czy stosowanych w programie do analizy przestrzennej ryzyka (SRA, 2004). Przedstawiona mapa dotyczy wyłącznie ryzyka związanego ze stratami bezpośrednimi. Uwzględnienie strat pośrednich w skali całego obszaru badań nie jest uzasadnione, gdyż wymagałoby bardzo szczegółowych analiz ekonomicznych, wychodzących poza ramy tej pracy. Porównanie mapy ryzyka (fig. 13) z mapą potencjalnych strat finansowych (Mrozek, 2008) pozwala zauważyć różnicującą rolę prawdopodobieństwa wniesionego przez mapę zagrożenia. Szczególnie wyraźne jest to w przypadku dużych kompleksów pikseli o jednakowej wartości potencjalnych strat. Dobry przykład stanowią tu lasy na zboczach Jeleniej Góry i Maślanej Góry oraz Taborówki, gdzie na mapie ryzyka wyraźnie są eksponowane najbardziej narażone na skutki osunięć partie tych kompleksów. Podobne spostrzeżenia odnoszą się do użytków rolnych.

Duża dysproporcja pomiędzy wartościami zabudowy i elementów infrastruktury oraz działek przydomowych a wartościami obszarów rolnych i leśnych sprawia, że obszary największego ryzyka są związane wyłącznie z pierwszą grupą elementów eksponowanych na zniszczenie. Wartość lasu czy użytków rolnych (przynajmniej wg cen z 2004 r.) była na tyle niska, że nawet w strefach o dużym prawdopodobieństwie osunięć przewidywane szkody (w okresie 35 lat) nie są bardzo dotkliwe. Niskie wartości ryzyka dla użytków rolnych wynikają z tego, że na badanym obszarze rolnictwo nie ma charakteru gospodarki towarowo-komercyjnej, co przekłada się na niską cenę hektara przeliczeniowego gruntu (Mendys i in., 2006). Ze względu na koszt infrastruktury nawet niewielkie jej uszkodzenie ma zdecydowanie poważniejsze skutki finansowe. Znamienną cechą omawianego obszaru jest też stosunkowo niewielkie skupianie się pikseli o podobnych wysokich wartościach ryzyka. Wynika to z rozproszenia zabudowy i towarzyszących jej działek przydomowych. Rozproszenie to w dużej mierze utrudnia wyznaczenie ciągłych stref najwyższego ryzyka. Mimo to można dokonać wyboru miejsc, które są newralgiczne ze względu na funkcjonowanie obszaru badań jako części otaczającego go regionu. Są to miejsca, w których nie tylko występują wysokie wartości ryzyka obliczonego na podstawie oceny strat bezpośrednich, ale także te, w których należy spodziewać się dużych strat pośrednich. Obliczenie tych ostatnich jest bardzo trudne i w praktyce opiera się na analizie wariantów (scenariuszy), w których zakłada się wpływ konkretnych wydarzeń osuwiskowych na działanie infrastruktury w danej lokalizacji i związane z tym rozmaite aspekty życia mieszkańców regionu.

ANALIZA SCENARIUSZY RYZYKA NA OBSZARZE BADAŃ

Negatywne efekty wydarzenia osuwiskowego, występującego w danej lokalizacji, należy rozpatrywać pod kątem jego konsekwencji dla całego obszaru badań, a nawet regionu (Giacomelli, 2003). W tym celu konieczne jest przeprowadzenie analizy ekonomicznej, która obejmuje zagadnienia demograficzne i migrację, zatrudnienie i źródła dochodów, działalność gospodarczą, atrakcyjność turystyczną, warunki transportu i przejazdów. Alokacja środków na zabezpieczenia, naprawy i odtworzenie zasobów powinna trafiać w najbardziej newralgiczne miejsca, istotne dla całej lokalnej społeczności (Giacommelli, 2003). Dlatego prowadzi się analizę scenariuszy (Sterlacchini i in., 2007), w której bierze się pod uwagę, oprócz bezpośrednich destruktywnych efektów osuwania, również efekty pośrednie.

W wyniku analizy mapy ryzyka i kontekstu socjoekonomicznego zlewni Bystrzanki i Biczysk na badanym obszarze zidentyfikowano dwie takie krytyczne lokalizacje. W odniesieniu do nich przeprowadzono rozważania scenariuszowe,

uwzględniające oprócz zniszczeń bezpośrednich straty pośrednie. Z przedstawionej wcześniej charakterystyki socjoekonomicznej wynika, że badany obszar przede wszystkim pełni rolę miejsca zamieszkania, a aktywność zawodowa ludności jest prowadzona głównie poza nim (z wyjątkiem drobnego handlu i usług lokalnych). Rolnictwo sprowadza się praktycznie do działalności mającej na celu zaspokojenie potrzeb własnych i nie ma charakteru gospodarki towarowo-komercyjnej. Ze względu na położenie pomiędzy większymi ośrodkami miejskimi (Gorlice i Grybów) dojazd do miejsc pracy i nauki jest jedną z podstawowych form funkcjonowania rejonu. Dlatego punktami krytycznymi są te lokalizacje, gdzie osuwiska potencjalnie mogą zniszczyć główny trakt komunikacyjny.

Uwzględniając także pozostałe elementy eksponowane, takie lokalizacje na obszarze badań (fig. 13) znajdują się w ujściowym odcinku potoku Bystrzanka oraz w okolicach centrum wsi Bystra w środkowej części obszaru badań.

W przypadku pierwszej lokalizacji zablokowanie drogi przez osunięty materiał będzie odczuwalne praktycznie przez wszystkich mieszkańców badanego obszaru, natomiast podobne zdarzenie w drugiej lokalizacji silniej wpłynie na mieszkańców środkowej i północno-zachodniej części obszaru. Jednak w obydwu przypadkach dotknie to użytkowników ruchu tranzytowego, korzystających z drogi powiatowej w kierunku Bieśnika i Szalowej.

Dla obu tych miejsc przeprowadzono szczegółową analizę scenariuszy. Analiza taka umożliwia uwzględnienie strat

Tabela 5

Ocena strat w krytycznych rejonach obszaru badań na podstawie analizy scenariuszy osuwiskowych

Assessment of finacial losses in the critical sites of the study area based on landslide *scenerio* analysis

	Zagrożenie w ujściowym odcinku Bystrzanki (zasypanie drogi przez osuwiska 181 i 182)	Zagrożenie w środkowej części obszaru badań we wsi Bystra (zasypanie drogi przez osuwisko 150)
	STRATY BEZPOŚREDNIE (w złotych)	
STRATY ZE WZGLĘDU NA		
Budynki mieszkalne	411 200	346 000
Budynki gospodarcze	40 800	20 100
Grunty (użytki rolne i parcele)	37 470	21 200
Infrastrukturę:		
Drogi:		
▪ oczyszczenie drogi i wywóz ziemi	11 400	3 200
▪ rekonstrukcję korpusu i nawierzchni	87 500	55 000
Linie elektryczne	17 600	
Gazociągi	21 050	
Linie telefoniczne	9 100	
Wodociągi indywidualne	1 140	
RAZEM	637 260	445 500
	STRATY POŚREDNIE (w złotych)	
STRATY ZE WZGLĘDU NA		
Zwiększone koszty transportu	przez objazdy (15 km)	przez objazdy
▪ samochody osobowe	123 600	55 800
▪ samochody ciężarowe	13 860	8 100
▪ komunikacja zbiorowa (autobusy, busy)	29 700	
RAZEM	167 160	63 900
ŁĄCZNE STRATY BEZPOŚREDNIE I POŚREDNIE	804 420	509 400

Obliczenia w cenach z 2004 roku

bezpośrednich i pośrednich, choć wymaga to przyjęcia szeregu założeń przedstawionych w pracy Sterlacchini i in. (2007). W rozważanych scenariuszach założono, że osuwisko zniszczy drogę przez zasypanie, a osuwający się materiał spowoduje spękanie ścian w domach, degradację gruntów i zniszczenie infrastruktury liniowej.

Straty bezpośrednie odnoszą się w takim przypadku do kosztów przywrócenia stanu używalności zasobów, które obejmują, np.: w odniesieniu do domów – oczyszczenie i usunięcie naniesionego materiału (rumowiska), naprawę spękanych ścian, odmalowanie itp.; gruntów – usunięcie zniszczonej roślinności, rekultywację i ponowne zasiewy lub nasadzenia; dróg – odczyszczenie dróg i wywóz naniesionego materiału oraz odtworzenie korpusu i położenie nowej nawierzchni,

Straty pośrednie, związane z zaburzeniem funkcjonowania, obejmują koszty, do których należałoby zaliczyć: utratę dochodu wynikającą z konieczności przerwania pracy zawodowej na okres napraw i rekonstrukcji, a w przypadku własnej działalności rolniczej – konieczność reorganizacji prac polowych; nakłady potrzebne na zapewnienie mediów; wzrost kosztów transportu związany z objazdami, z których musieliby korzystać zarówno poszkodowani bezpośrednio, jak i pozostali mieszkańcy rejonu.

W porównywanych w tej monografii scenariuszach skupiono się na dysfunkcjach związanych z objazdami, zgodnie ze wcześniejszą oceną socjoekonomiczną obszaru badań. Wyniki obliczeń scenariuszowych dla obu lokalizacji zestawiono w tabeli 5.

Należy podkreślić, że udział strat pośrednich, zwykle pomijany w polskich pracach dotyczących oceny ryzyka, jest znaczący w łącznych kosztach rozpatrywanych wariantów zniszczeń. Zêzere i in. (2007), analizując ryzyko związane z oddziaływaniem osuwisk na zablokowanie autostrady w Portugalii, wykazują, że dla znacznie intensywniej zagospodarowanych obszarów straty pośrednie mogą być jeszcze istotniejsze. Dlatego uwzględnianie strat pośrednich powinno stanowić dodatkową wskazówkę przy alokacji funduszy na zabezpieczenia przed degradacją przez ruchy masowe i likwidację powstałych szkód.

W przedstawionych wyżej rozważaniach uwzględniono jedynie najważniejsze utrudnienia i zaburzenia normalnego funkcjonowania badanego obszaru. Nie rozważano np. możliwości zatamowania potoku przez osuwisko i zalania terenów w górnej części cieku. Niemniej jednak pokazano istotne aspekty szacowania ryzyka w kontekście tego konkretnego rejonu. Połączenie informacji o rozkładzie zagrożenia z modelowania statystycznego z informacjami o charakterze ekonomicznym pozwala oprzeć na racjonalnych podstawach proces podejmowania decyzji przy zarządzaniu i gospodarowaniu danym terenem.

UWAGI KOŃCOWE

1. Uzyskane wyniki potwierdzają użyteczność metod statystycznych i technik GIS do analizy podatności i zagrożenia osuwiskowego w dużej skali. Przyjęta w monografii skala map 1:10 000 pozwala na ich wykorzystywanie w procesach planistycznych.

2. Zastosowane metody statystyczne wykazały związki pomiędzy występowaniem osuwisk a analizowanymi czynnikami pasywnymi, w tym: litologią, odległością od linii dyslokacji tektonicznych, ekspozycją stoków, ich nachyleniem i użytkowaniem terenu. Jednak zastosowane techniki modelowania przypisują różne znaczenie tym czynnikom:

- Modele ELR, podobnie jak było to w przypadku wyników uzyskanych metodą WoE, uwypuklają znaczenie ekspozycji północnej i wschodniej, uwzględniając dodatkowo orientację południowo-zachodnią, co można przypisać wykorzystaniu pełniejszej informacji o rozkładzie osuwisk w stosunku do metody WoE. Ten wynik jest, w głównej mierze, konsekwencją rusztowego układu grzbietów górskich na badanym obszarze i nie może być uogólniany na inne obszary. Z drugiej strony przez wprowadzenie ekspozycji stoków do modelu dokonuje się pośredniego (zmienna „proxy") uwzględnienia różnic w stosunkach wodnych, prowadzących do zmian w nasyceniu gruntu wodą, a przez to do zmian w ciśnieniu porowym i właściwościach mechanicznych gruntu.
- Zastosowane w pracy metody statystyczne wskazują na silną zależność podatności na osuwanie od odległości od linii głównych dyslokacji tektonicznych. Największa podatność jest przewidywana w zakresie odległości do 60 m od ich wyznaczonego przebiegu. Można to zinterpretować jako wyraz osłabienia wytrzymałości mechanicznej podłoża.
- Modelowanie metodą ELR w odniesieniu do nachylenia stoków wykazało, że najbardziej podatne na osuwanie są stoki o nachyleniu między 7–18°, co jest zgodne z danymi literaturowymi dotyczącymi innych rejonów polskich Karpat fliszowych.
- W modelowaniu wykorzystano użytkowanie terenu jako jeden z czynników determinujących procesy osuwania. Czynnik ten budzi jednak pewne wątpliwości. Wielu autorów uważa, że tempo zmian naturalnych i wywołanych przez człowieka jest zbyt duże, żeby współczesne użytkowanie terenu można było uznać za wiarygodną reprezentację dawnych warunków, w których utworzyły się osuwiska (Clerici i in., 2002). Można się zgodzić z tą opinią w odniesieniu do osuwisk, których powstanie miało miejsce w holocenie lub nawet kilkaset lat temu. W przypadku rozważań dotyczących użytkowania terenu, jako czynnika potencjalnie sprzyjającego generowaniu osuwisk, zachodzi również obawa, że pojawią się trudności z oddzieleniem skutków od przyczyn nawet w krótszych przedziałach czasowych. Sposób użytkowania terenów, na których wystąpiły osuwiska, często ulega zmianie ze względu na niemożność kontynuowania poprzedniej formy działalności na zdegradowanym

terenie. W przypadku rozważanego obszaru następowały istotne zmiany w sposobie użytkowania terenu w przeciągu ostatnich kilkudziesięciu lat. Od zamiany łąk na grunty orne (w latach 60. XX wieku) powrócono do pozostawiania terenów rolnych odłogiem (w związku z zachodzącymi zmianami gospodarczymi w latach 90.) i niejako samoistnego przywrócenia im charakteru użytków zielonych. Optymalne modelowanie wymagałoby dysponowania informacją o stanie użytkowania terenu z różnych okresów i wykorzystania jej zarówno do predykcji, jak i do weryfikacji modelu.

- Modelowanie metodą ELR potwierdziło zależność występowania terenów podatnych na osuwanie i stref zagrożeń od warunków litostratygraficznych. Tereny o wysokiej podatności pokrywają się z zasięgiem eoceńskich łupków pstrych w południowo-wschodniej części badanego obszaru oraz z miejscami kontaktu piaskowców ciężkowickich z łupkami, pociętymi serią uskoków, w części południowo-zachodniej. Strefy wysokiego zagrożenia wyznaczone w tym modelu pozostają w wyraźnym związku z rozmieszczeniem łupków pstrych na kontakcie z warstwami inoceramowymi w zlewniach Bystrzanki i Biczysk.

3. Porównanie wyników uzyskanych metodami ELR z wykorzystaniem całych powierzchni osuwisk i z wykorzystaniem tylko obszarów oderwania wykazuje większą użyteczność pierwszego wariantu w analizie obszaru badań. W przypadku modelu opartego na obszarach oderwania widać wyraźną tendencję do przewidywania występowania osuwisk na jednej serii skalnej i na wyższych elewacjach terenu. Jest to naturalna konsekwencja oparcia budowy tego modelu na informacji pochodzącej z ograniczonych obszarowo i wyżej położonych części osuwisk.

4. Porównanie aspektów użytkowych stosowanych technik statystycznych wskazuje na przewagę metody SPM – obliczenia WoE wymagają bardzo pracochłonnej i czasochłonnej analizy wpływu poszczególnych czynników na podatność na osuwanie. Dodatkowe utrudnienie stanowi duża wrażliwość metody na zależności warunkowe pomiędzy parametrami. Prowadzi to niekiedy do zaskakujących rozstrzygnięć, takich jak np. wyeliminowanie litologii jako czynnika wpływającego na osuwanie (Mrozek i in., 2004). Wyznaczenie zagrożenia z map podatności na osuwanie metodą WoE, w przypadku reprezentacji zdarzenia osuwiskowego przez pojedynczy piksel, daje bardzo niskie, trudne do interpretacji prawdopodobieństwo *a posteriori*, natomiast ocena prawdopodobieństwa w metodzie SPM prowadzi do realnego oszacowania zagrożenia.

Pewnym argumentem przemawiającym za korzystaniem z metody WoE jest jej dostępność jako bezpłatnej aplikacji do programu ArcInfo/ArcGIS®.

Komercyjny program SPMS oferuje jako jedną z opcji możliwość rozszerzenia działań modelu na inny obszar o podobnej charakterystyce. Po zbudowaniu i weryfikacji modelu predykcyjnego na podstawie danych obejmujących znany obszar istnieje możliwość zastosowania go do regionu o zbliżonych cechach.

5. W monografii przedstawiono, po raz pierwszy w Polsce, **ilościową ocenę ryzyka osuwiskowego**. Największą trudność stanowiło oszacowanie wrażliwości elementów narażonych na skutki osunięć. W literaturze przedmiotu dotychczas nie pojawił się standardowy sposób oceny tego parametru. Użyty w niniejszej pracy sposób obliczeń wrażliwości (Remondo i in., 2005) oparty na kosztach napraw też nie zawsze może być stosowany (np. w sytuacjach, gdy sumaryczne koszty napraw przewyższają wartość nowego obiektu w praktyce). W polskich warunkach pojawia się dodatkowa trudność – liczne prace związane z usuwaniem skutków osuwisk nie są ewidencjonowane i wyceniane, gdyż są przeprowadzane tzw. „sposobem gospodarczym" – odnosi się to zwłaszcza do dróg dojazdowych, użytków rolnych czy mniejszych uszkodzeń zabudowy, zwłaszcza na obszarach wiejskich.

W odniesieniu do wyznaczania stref ryzyka konieczne jest także uwzględnianie kosztów pośrednich, analizowanych w powiązaniu z funkcjonowaniem ekonomicznym regionu.

Nawet w przypadku „taniego" w sensie strat osuwiskowych obszaru badań, łączna suma kosztów bezpośrednich i pośrednich dla zdarzenia osuwiskowego w dolnej części tego obszaru (przy ujściu Bystrzanki) prowadzi do łącznej oceny strat w wysokości 0,8 mln zł (wg cen z 2004 r.), przy czym koszty pośrednie stanowią ok. 20% tej sumy. Te ostatnie koszty, dotychczas zwykle ignorowane, powinny być zatem uwzględniane w polityce zarządzania ryzykiem. Ocena strat pośrednich, niezbędnych w analizie scenariuszy, wymaga współpracy z ekonomistami.

6. Uzyskanie rzetelnej oceny zagrożenia i ryzyka wiąże się z koniecznością zebrania wiarygodnych danych obejmujących nie tylko czynniki pasywne warunkujące ruchy masowe, ale co jest znacznie trudniejsze, informacji o czasie wystąpienia i zasięgu przestrzennym poszczególnych wydarzeń osuwiskowych i towarzyszących im czynnikach sprawczych (np. opadach) na analizowanym terenie w okresie wieloletnim. Takie informacje są dostępne tylko w nielicznych przypadkach. Podobnie uzyskanie i zestawienie informacji o uszkodzeniach spowodowanych przez ruchy masowe oraz kosztach związanych z nimi napraw jest bardzo pracochłonne. Dane te są niezwykle cenne i niezbędne do wiarygodnej oceny ryzyka, zatem powinno się je gromadzić i wprowadzać do osuwiskowych baz danych.

Praca była częściowo finansowa z funduszy projektu ALARM — Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas w ramach V PR UE (projekt nr. EVGI-2001-0018; kontrakt nr EVG1-CT-2001-00038).

LITERATURA

AGS: Australian Geomechanics Society and Sub-committee on Landslide Risk Management, 2000 — Landslide risk management concepts and guidelines. *Australian Geomechanics*, **35**, 1: 49–92.

ALEOTTI P., CHOWDHURY R., 1999 — Landslide hazard assessment: summary, review and new perspectives. *Bull. Eng. Geol. Env*., **58**: 21–44.

BAJGIER-KOWALSKA M., 2006 — Destrukcyjny wpływ osuwisk na zabudowę i infrastrukturę techniczną na przykładzie Karpat fliszowych. *Probl. Zagosp. Ziem Górskich*, **53**: 183–196.

BOBER L., 1984 — Rejony osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych i ich związek z budową geologiczną. *Biul. Inst. Geol*., **340**, 23: 115–153.

BOBER L., ZABUSKI L., 1993 — Flysch slope classification from viewpoint of the landslide prediction. *W*: Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks. Proceedings of an International Symposium under the auspices of the International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, the International Association of Engineering Geology and International Society for Rock Mechanics (red. A. Anafnostopoulos i in.), 20–23 September 1993, Athens, Greece: 1065–1072. Balkema, Rotterdam.

BONHAM-CARTER G.F., AGTERBERG F.P., WRIGHT D.F., 1989 — Weight of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. *W*: Statistical Applications in the Earth Sciences (red. F.P. Agterberg, G.F. Bonham-Carter).Geological Survey of Canada, Paper 89-9: 171–183.

BONHAM-CARTER G.F., 1994 — Geographic Information System for Geoscientists: modeling with GIS. Computer Methods in the Geoscience, T. 13. Pergamon Press.

BRABB E.E., 1984 — Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. *W*: Proceedings of the IV International Symposium on Landslides, Toronto, **1**: 307–323.

BRABB E.E., HARROD B.L. (red.), 1989 — Landslides: Extent and economic significance. *W*: Proceedings of the 28 International Geological Congress: Symposium on Landslides, 17 July 1989, Washington D.C. Balkema, Rotterdam.

CAINE N., 1980 — The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*, Ser. A, **62**, 1/2: 23–27.

CARRARA A., CARDINALI M., DETTO R., GUZZETTI F., PASQUID V., REINCHENBACH P., 1991 — GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, **16**, 5: 427–445.

CARRARA A., CARDINALI M., GUZZETTI F., REICHENBACH P., 1995 — GIS technology in mapping landslide hazard. W: Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards (red. A. Carrara, F. Guzzetti): 135–175. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

CARRARA A., GUZZETTI F., CARDINALI M., REICHENBACH P., 1999 — Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scaled, Central Italy. *Geomorphology*, **31**, 1–4: 181–216.

CHUNG C.J., 2006 — Using likelihood ratio functions for modeling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment. *Comput. Geosci*., **32**, 8: 1052–1068.

CHUNG C.J., FABBRI A.G., 1993 — The representation of geoscience information for data integration. *Nonrenewable Resources*, **2**, 2: 122–139.

CHUNG C.J., FABBRI A.G., 1999 — Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering*, *Remote Sens*., **65**, 12: 1389–1399.

CHUNG C.J., FABBRI A.G., 2002 — Landslide risk analysis from prediction of future occurrences based on geomorphology-related spatial data. *W*: The 8th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology, Workshop VI, 15–20 September 2002, Berlin.

CHUNG C.J., FABBRI A.G., 2003 — Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Nat. Hazards*, **30**, 3: 451–472.

CHUNG C.J., FABBRI A.G., 2005 — Systematic procedures of landslide hazard mapping for risk assessment using spatial prediction models. *W*: Landslide Hazard and Risk (red. T. Glade i in.): 139–174. Wiley, Chichester.

CLERICI A., 2002 — GRASS GIS based shell script for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *W*: Proceedings of the Open Source GIS-GRASS Users Conference (red. M. Ciolli, P. Zatelli): 1–17. 11–13 September 2002, Trento, Italy.

CROZIER M.J., GLADE T., 2005 — Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. *W*: Landslide Hazard and Risk (red. T. Glade i in.): 1–40. Wiley, Chichester.

CRUDEN D.M., VARNES D.J., 1996 — Landslides Types and Processes. *W*: Landslides: Investigations and Mitigation (red. A.K. Turner, R. Schuster). Transportation Research Board, NRC Washington D.C., Special Report, **247**: 36–75.

DAUKSZA L., KOTARBA A., 1973 — An analysis of the influence of fluvial erosion in the development of landslide slope. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan*., **7**: 91–104.

DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHROTT L., IBSEN L.M., (red.), 1996 — Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes. Wiley & Sons.

DISPERATI L., GUASTALDI E., CARMIGNAMI L., 2002 — Landslide mapping and hazard prediction in the Pergola area (Marche, Italy). *W*: Proceedings of the 8th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology: 507–512. 15–20 September 2002, Berlin.

DŁUGOSZ M., 2009 — Landslide susceptibility zoning in the Polish Flysch Carpathians, *Z. Geomorph.*, **53**, Suppl. 2: 49–56.

EINSTEIN H.H., 1988 — Special lecture: Landslide risk assessment procedure. *W*: Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides (red. C. Bonnard), 2: 1075–1090. 10–15 July 1988, Lausanne, Switzerland. Balkema, Rotterdam.

EINSTEIN H.H., 1997 — Landslide risk – systematic approaches to assessment and management. *W*: Landslide risk assessment. Proceedings of the International Workshop on Landslide Risk Assessment (red. D. Cruden, R. Fell): 25–50. 19–21 February 1997, Honolulu. Balkema, Rotterdam.

FABBRI A.G., CHUNG C.J., NAPOLITANO P., REMONDO J., ZÊZERE J.L., 2002 — Prediction rate functions of landslide susceptibility applied in the Iberian Peninsula. *W*: Third International Conference on Risk Analysis (red. C.A. Brebbia): 703–718. 19–21 June 2002, Sintra, Portugal.

FLAGEOLLET J.C., 1996 — The time dimension in the study of mass movements. *Geomorphology*, **15**: 185–190.

GIACOMELLI P., 2003 — The economic evaluation of landslide's risk. *W*: Discussion paper for IV ALARM meeting, 26–27 September 2003. Santander.

GIL E., 1979 — Typologia i ocena środowiska naturalnego okolic Szymbarku. *Dokumentacja Geograficzna*, **5**.

GIL E., 1994a — Meteorologiczne i hydrologiczne warunki ruchów osuwiskowych. *Conference Papers*, **20**: 89–102.

GIL E., 1994b — Budowa geologiczna. *W*: Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego, Stacja Bazowa Szymbark (Karpaty fliszowe) (red. L. Starkel, E. Gil): 24–27. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.

GIL E., 1994c — Klimat. *W*: Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego, Stacja Bazowa Szymbark (Karpaty fliszowe) (red. L. Starkel, E. Gil): 34–51. Biblioteka Monitoringu Środowiska.

GIL E., 1997 — Meteorological and hydrological conditioning of landslides. Polish Flysch Carpathians. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan*., **31**: 143–158.

GIL E., 2004 — Warunki opadowe a procesy osuwiskowe. *W*: *5.* raport etapowy IG i PZ PAN w ramach pakietu zadaniowego WP3 za okres 01.12.2003–30.05.2004, Projekt Alarm VPR UE. Narod. Arch. Geol. PIG–PIB, Oddz. Karpacki, Kraków.

GIL E., BOCHENEK W., 1998 — Raport Stacji Bazowej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania polskiej Akademii Nauk w Szymbarku za lata hydrologiczne 1994–1997. *W*: Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego, Stan geoekosystemów Polski w latach 1994–1997 (red. Kostrzewski A.): 211–215. Biblioteka Monitoringu Środowiska, .

GIL E., DŁUGOSZ M., 2006 — Threshold values of rainfalls triggering selected deep-seated landslides in the Polish Flysch Carpathians. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan*., **40**: 21–43.

GIL E., KOTARBA A., 1977 — Model of the slide slope evolution in Flysch mountains (An example drawn from the Polish Carpathians). *Catena*, **4**, 3: 233–248.

GIL E., STARKEL L., 1979 — Long-term rainfalls and their role in the modelling of flysch slopes. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan*., **13**: 207–220.

GLADE T., 2003 — Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Die Erde*, **134**: 123–146.

GRANICZNY M., KOWALSKI Z., RĄCZKOWSKI W., ZIMNAL Z., 2001 — Komputerowa analiza danych przestrzennych w aspekcie zagrożeń osuwiskowych. *Prz. Geol*., **49**, 1: 33–38.

GRITZNER M.L., MARCUS W.A., ASPINALL R., CUSTER S.G., 2001 — Assessing landslide potential using GIS, soil wetness modelling and topographic attributes, Payette River, Idoho. *Geomorphology*, **37**: 149–165.

GUZZETTI F., CARRARA A., CARDINALI M., REICHENBACH P., 1999 — Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in multi-scale study. Central Italy. *Geomorphology*, **31**: 181–216.

GUZZETTI F., PERUCACCI S., ROSSI M., STARK C.P., 2008 — The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: update. *Landslides*, **5**: 3–17.

GUZZETTI F., REICHENBACH, CARDINALI M., GALLI M., ARDIZZONE F., 2005 — Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, **72**: 272–299.

HESS M., NIEDŹWIEDŹ T., OBRĘBSKA-STARKLOWA B., 1977 — Stosunki termiczne Beskidu Niskiego. *Pr. Geogr.*, **123**.

HOLLENSTEIN K., 2005 — Reconsidering the risk assessment concept: standardizing the impact description as a building block for vulnerability assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., **5**: 301–307.

HUABIN W., GANGJUN L., WEIYA X., GONGHUI W., 2005 — GIS-based landslide hazard assessment: an overview. *Prog. Phys. Geog*., **29**, 4: 548–567.

HUFSCHMIDT G., CROZIER M., GLADE T., 2005 — Evolution of natural risk: research framework and perspectives. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., **5**: 375–387.

JANKOWSKI L., 1997 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Rzepiennik. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.

KAMIŃSKI M., 2007 — Mapa podatności osuwiskowej – studium z regionu Jodłówki (Pogórze Dynowskie). *Prz. Geol*., **9**: 779–784.

KLECZKOWSKI A., 1955 — Osuwiska i zjawiska pokrewne. Wyd. Geol., Warszawa.

KOPCIOWSKI R., ZIMNAL Z., CHRZĄSTOWSKI J., SZYMAKOWSKA F., 1997 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Gorlice. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.

KOTARBA A., 1970 — Charakterystyka rzeźby okolic Szymbarku. *Dokument. Geogr.*, **3**: 7–24.

KOTARBA A., 1986 — Rola osuwisk w modelowaniu rzeźby beskidzkiej i pogórskiej. *Prz. Geogr*., **58**, 1/2: 119–129.

KOTARBA A., 1989 — Ewolucja fliszowych stoków górskich pod wpływem ruchów masowych. *W*: Kształtowanie fliszowych stoków karpackich przez ruchy masowe na przykładzie badań stoku bystrzyca w Szymbarku (red. K. Thiel). *Pr. Inst. Budown. Wodnego PAN*, **17**: 3–15.

KOZIKOWSKI H., 1956 — Geologia płaszczowiny magurskiej i jej okien tektonicznych na południowy zachód od Gorlic. *Z badań geologicznych w Karpatach*, **1**: 47–91

LEONE F., ASTÉ J.P., LEROI E., 1996 — Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: working toward a better risk perception. *W*: Landslides, Glissements de terrain (red. K. Sennest). Proceedings of 7th International symposium on Landslides, Trondheim: 263–269. Balkema, Rotterdam.

LEROI E., 1996 — Landslide hazard – risk maps at different scales: objectives, tools and developments. *W*: Landslides, Glissements de terrain (red. K. Sennest). Proceedings of 7th International symposium on Landslides, Trondheim: 35–51. Balkema, Rotterdam.

MARGIELEWSKI W., 2001 — O strukturalnych uwarunkowaniach rozwoju głębokich osuwisk – implikacje dla Karpat fliszowych. *Prz. Geol*., **49**, 6: 515–524.

MARGIELEWSKI W., 2004 — Typy przemieszczeń grawitacyjnych mas skalnych w obrębie form osuwiskowych polskich Karpat fliszowych. *Prz. Geol*., **52**, 7: 603–614.

MARGIELEWSKI W., 2009 — Problematyka osuwisk strukturalnych w Karpatach fliszowych w świetle zunifikowanych kryteriów klasyfikacji ruchów masowych. *Prz. Geol*., **57**, 10: 905–917.

MENDYS K., MENDYS S., MROZEK T., 2005 — Propozycja metody wyceny wartości ryzyka związanego z osuwiskiem. *Ekonomia i Środowisko*, **2** (28): 164–174.

MENDYS K., MENDYS S., MROZEK T., 2006 — Wycena wartości ryzyka spowodowanego osuwiskiem dla obszaru zlewni Bystrzanki gmina Gorlice. *Ekonomia i Środowisko*, **1** (29): 155–174.

MROZEK T., 2008 — Ocena zagrożenia osuwiskowego i związanego z nim ryzyka przy wykorzystaniu metod GIS na przykładzie okolic Szymbarku, Beskid Niski. [pr. doktor.]. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Oddz. Karpacki, Kraków.

MROZEK T., RĄCZKOWSKI W., LIMANÓWKA D., 2000 — Recent landslides and triggering climatic conditions in Laskowa and Pleśna regions, Polish Carpathians. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan*., **34**: 89–112.

MROZEK T., POLI S., STERLACCHINI S., ZABUSKI L., 2004 — Landslide susceptibility assessment: a case study from Beskid Niski Mts., Carpathians, Poland. *W*: Proceedings of the Conference "Risk caused by the geodynamic phenomena in Europe" (red. M. Graniczny i in.). *Polish Geol. Inst. Sp. Papers*, **15**: 13–18.

NESCIERUK P., PAUL Z., RYŁKO W., SZYMAKOWSKA F., WÓJCIK A., ŻYTKO K.,1995 — Mapa Geologiczna Polski w skali 1:200 000, ark. Jasło (B). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

OBRĘBSKA-STARKLOWA, 1973 — Stosunki mezo- i mikroklimatyczne Szymbarku. *Dokument. Geogr.*, **5**.

OSTAFICZUK S., 1999 — Variety of landslides in Poland, and their possible dependence on neogeodynamics. *W*: Landslides, Proceedings of the Ninth International Conference and Field Trip on Landslides (red. J.S. Griffiths i in.), 5–16 September 1999, Bristol, United Kingdom: 111–127.

OSZCZYPKO N., 1971 — Rejony osuwiskowe na tle budowy geologicznej Karpat (skrót referatu). *Kwart. Geol*., **15**, 4: 1035–1037.

PASUTO A., SOLDATI M., 1999 — The use of landslide units in geomorphological mapping: an example in the Italian Dolomites. *Geomorphology*, **30**: 53–64.

PITUŁKO L., 1913 — Usuwiska Szymbarskie koło Gorlic. *Wszechświat*, **32**, 51: 801–806.

POLI S., STERLACCHINI S., 2007 — Landslide strategies in susceptibility studies using Weight of Evidence modelling technique. *Nat. Res. Research*, **16**, 2: 121–134.

POPRAWA D., RĄCZKOWSKI W., 1999 — Geologiczne skutki powodzi w 1997 roku na przykładzie osuwisk województwa nowosądeckiego. *W*: Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 r. (red. L. Starkel, J. Grela): 119–132. Wyd. Oddz. PAN, Kraków.

POPRAWA D., RĄCZKOWSKI W., 2003 — Osuwiska Karpat. *Prz. Geol*., **51**, 8: 685–692.

PULINOWA M.Z., 1972 — Procesy osuwiskowe w środowisku sztucznym i naturalnym. *Dokument. Geogr. IG PAN*, **4**.

RAINES G.L., 1999 — Evaluation of weights of evidence to predict epithermal-gold deposits in the Great Basin of the Western United States. *Nat. Res. Research*, **8**, 4: 257–276.

RĄCZKOWSKI W., 2003 — Landslide hazard in the Carpathians during the recent 10 years. *Global Change*, **10**: 67–77.

RĄCZKOWSKI W., WÓJCIK A., ZIMNAL Z., NESCIERUK P., PAUL Z., RYŁKO W., SZYMAKOWSKA F., ŻYTKO K., 1995 — Mapa Geologiczna Polski w skali 1:200 000, ark. Jasło (A). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

REMONDO J., BONACHEA J., CENDRERO A., 2004 — Probabilistic landslide hazard and risk mapping on the basis of occurrence and damages in the recent past. *W*: Landslides: evaluation and stabilization (red. W.A. Lacerda i in.). Vol. 1: 125–130. Taylor, Francis, London.

REMONDO J., BONACHEA J., CENDRERO A., 2005 — A statistical approach to landslide risk modelling at basin scale: from landslide susceptibility to quantitative risk assessment. *Landslides*, **2**: 231–328.

SIKORA W., 1970 — Budowa geologiczna płaszczowiny magurskiej między Szymbarkiem Ruskim a Nawojową. Z badań geologicznych w Karpatach, Tom XIII. *Biul. Państw. Inst. Geol*., **235**: 5–121.

SOETERS R., van WESTEN C.J., 1996 — Slope instability, recognition, analysis and zonation. *W*: Landslides: Investigations and mitigation (red. A.K. Turner, R. Schuster). Transportation Research Board, NRC Washington, D.C., Special Report, **247**: 129–177.

SOJA R., 1977 — Deepening of channel in the light of the cross profile analysis (Carpathian river as example). *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan*., **11**: 127–139.

SPMS, 2004 — Spatial Prediction Modeling System, Software v. 1.1. User's Guide. SpatialModels Inc., Ottawa.

SRA, 2004 — Spatial Risk Assessment System, Software v 1.1. User's Guide. SpatialModels Inc., Ottawa.

STARKEL L., 1960 – Rozwój rzeźby Karpat fliszowych w holocenie. *Pr. Geogr. IG PAN*, **22**.

STARKEL L., 1972 — Charakterystyka rzeźby polskich Karpat (i jej znaczenie dla gospodarki ludzkiej). *Probl. Zagosp. Ziem Górskich*, **10**: 75–92.

STARKEL L., 1996 — Geomorphic role of extreme rainfall in the Polish Carpathians. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan*., **30**: 21–38.

STARKEL L., 2006 — Geomorphic hazards in the Polish Flysch Carpathians. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan*., **40**: 5–19.

STERLACCHINI S., FRIGERIO S., GIACOMELLI P., BRAMBILLA M., 2007 — Landslide risk analysis: a multi-disciplinary methodological approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., **7**: 657–675.

ŚWIDZIŃSKI H., 1973 — Budowa geologiczna i roponośność rejonu Szymbarku koło Gorlic. *Pr. Geol. PAN*, **80**: 1–63.

UN-ISDR, 2004 — Terminology of disaster risk reduction. UN-International Strategy for Disaster Reduction. html://www.unisdr.org/eng/library/lib-terminology-eng%20home.htm.

van WESTEN C.J., 1993 — Application of Geographic Information Systems to Landslide Hazard Zonation. ITC Publication, 14. International Institute for Aerospace Survey and Earth Science (ITC), Enschede.

van WESTEN C.J., 2004 — Geo-Information tools for landslide risk assessment: An overview of recent developments. *W*: Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides, 28 June – 2 July 2004, Rio de Janeiro: 39–56. Balkema, London.

van WESTEN C.J., van ASCH T.W.J., SOETERS R., 2006 — Landslide hazard and risk zonation – why is still so difficult*?*. *Bull. Eng. Geol. Env*., **65**: 176–184.

van WESTEN C.J., CASTELLANOS E., KURIAKOSE S.L., 2008 — Spatial data for landslide susceptibility, hazard and vulnerability assessment: an overview. *Eng. Geol*., **102**: 112–131.

VARNES D.J., 1978 — Slope Movement Types and Processes. *W*: Landslides: Analysis and control (red. R.L. Schuster, R.J. Krizek). Transportation Research Board. *National Academy of Science, Washington, Special Report*, **176**: 11–33.

VARNES D.J., 1984 — Landslide hazard zonation: a review of principles and practices. International Association of Engineering Geology, Commission on Landslides and Other Mass Movements on Slopes, UNESCO, Paris, 3.

WÓJCIK A., 1997 — Osuwiska w dorzeczu Koszarawy – strukturalne i geomorfologiczne ich uwarunkowania. *Biul. Państw. Inst. Geol*., **376**: 5–42.

WÓJCIK A., MROZEK T., GRANOSZEWSKI W., 2006 — Lithological conditioning of landslides and climatic changes with examples from the Beskidy Mts., Western Carpathians, Poland. *Geografia Fisica e Dinamica Quateranria, Special Issue*, **29**: 197–209.

WÓJCIK A., ZIMNAL Z., 1996 — Osuwiska wzdłuż doliny Sanu między Bachórzcem a Reczpolem (Karpaty, Pogórze Karpackie). *Biul. Państw. Inst. Geol*., **374**: 71–92.

ZABUSKI L., 2004 — Prediction of the slope movements on the base of inclinometric measurements and numerical calculations. *W*: Proceedings of the Conference "Risk caused by the geodynamic phenomena in Europe" (red. M. Graniczny i in.). *Pol. Geol. Ins. Sp. Paper*s, **15**: 29–39.

ZABUSKI L., MROZEK T., GIL E., 2003 — Return period assessment. Annual report in frames of Alarm project for the period 1.12.2002–30.11.2003. VPR UE.

ZABUSKI L., THIEL K., BOBER L., 1999 — Osuwiska we fliszu Karpat polskich: Geologia, modelowanie, obliczenia stateczności. Wyd. IBW PAN, Gdańsk.

ZÊZERE J.L., 2002 — Landslide susceptibility assessment considering landslide typology: A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., **2**: 73–82.

ZÊZERE J.L., OLIVEIRA S.C., GARCIA R.A.C., REIS E., 2007 — Landslide risk analysis in the area North of Lisbon (Portugal): evaluation of direct and indirect costs resulting from a motorway disruption by slope movements. *Landslides*, **4**: 123–136.

ZIĘTARA T., 1969 — W sprawie klasyfikacji osuwisk w Beskidach Zachodnich. *Stud. Geoomorph. Carpatho-Balcan.*, **3**: 111–131

ZIĘTARA T., 1988 – Landslide areas in the Polish Flysch Carpathians. *Folia Geographica, ser. Geographica-Physica*, **20**: 21–31.

ZUBER R., BLAUTH J., 1907 — Katastrofa w Duszatynie. *Czasopismo Techniczne*, **25**: 218–221.

LANDSLIDE HAZARD AND RISK FOR A CASE-STUDY OF SZYMBARK REGION (BESKID NISKI MTS)

Abstract. The paper presents quantitative estimation of landslide hazard and risk in the test area located in the Polish Flysch Carpathians (surrounding of Szymbark, Beskid Niski Mts.). The adopted approach is enrooted in Varnes equation and, thus, problem solving is tackled with a stepwise strategy comprising landslide inventory, susceptibility and hazard modelling, and assessment of related risk in the studied area. Under such framework the landslide risk has been evaluated comprehensively for the first time in Poland. Drawing upon GIS capabilities, landslide susceptibility and hazard were modelled using ELR (*Empirical Likelihood Ratio*) function, belonging to *Favourability Functions*. The performed multivariate statistical modelling turned to be useful for predicting landslide hazard in the test area (large scale modelling – *i.e.* 1:10 000). Vulnerability was estimated by relating costs of repairs to costs of analysed objects at risk. The developed landslide risk map is the outcome of compiling the landslide hazard map with the map of potential losses. Moreover, the performed cost-benefit analysis showed that indirect losses are significant (up to 20%) when compared to direct ones. Therefore, the indirect losses may not be neglected and have to be taken under consideration in spatial planning and landscape management.

Key words: landslide susceptibility and hazard; prognostic modelling; ELR – Empirical Likelihood Ratio function; landslide risk estimation; Szymbark region in Beskid Niski Mts.

SUMMARY

Mass movements are the present-day morphogenetic processes that play significant role in relief transformation (*i.a*. Starkel, 1960; Kotarba, 1986; Pasuto, Soldati, 1999). However, due to their destructive consequences the mass movements have to be considered as geohazards as well (*i.a*. Varnes, 1984; Brabb, Harrod, 1989; Starkel, 2006). Unfortunately, this aspect of landsliding was often ignored, although Brabb and Harrod (1989) emphasised already by the end of the 20th century that devastating effects of landsliding are far-reaching and the related losses can be comparable or even larger than in the case of floods.

Although mass movements in Poland can be observed in various regions (Ostaficzuk, 1999), landslidng predominates in the Polish Flysch Carpathians (Mrozek *et al*., 2000; Rączkowski, 2003). In spite of extensive literature dealing with landslides in that area (*i.a*. Starkel, 1960, 1996, 2006; Ziętara, 1988, Oszczypko, 1971; Bober, 1984; Wójcik, 1997; Zabuski *et al*., 1999; Margielewski, 2009), the problems of landslide hazard and related destructions were tackled only sporadically (Zuber, Blauth, 1907; Pitułko, 1913; Poprawa, Rączkowski, 1999; Bajgier-Kowalska, 2006). The approach to landslides and their destructive effects has been changing since 1997, when extreme and intensive rainfalls of July triggered spatially extensive landsliding (Poprawa, Rączkowski, 1999) that resulted in severe losses. That event pointed to controversies which arise from a need for landslide loss reduction and from inhabitants needs for living and managing the land. Thus, assessment of landslide hazard risk became a challenge.

This paper presents the outcomes of the study undertaken to evaluate landslide hazard and risk assessment in a test region in the Flysch Carpathians. The adopted approach is enrooted in Varnes concept (1984), as shown in equation [1] where risk is a function of hazard, vulnerability and costs of exposed elements. Due to inherent complexity (van Westen *et al*., 2006, 2008) the problem is tackled with a stepwise strategy, that comprises: landslide inventory and development of occurrence map; analysis of causative factors (*e.g*. lithology, slope etc.) with converting them to thematic maps (layers) manageable under GIS; developing landslide susceptibility and hazard maps; identifying of elements at risk and assessing their vulnerability, and finally estimation of risk. Under such strategy the landslide risk has been evaluated comprehensively for the first time in Poland. The paper is also the briefing of the author's doctoral thesis (Mrozek, 2008).

The case study area (17,5 km^2) was selected in Szymbark region, which is at a boundary between the Beskid Niski Mts. and Jasło–Sanok Depression. The study area comprises drainage basins of Bystrzanka and Biczyska streams as well as the interbasin area adjacent to the Ropa river (Fig. 1). It is located near the transportation track from Grybów to Gorlice while in the administrative context it covers parts of villages of Szymbark, Bystra and Ropica Dolna belonging to Gorlice commune (Fig. 2).

In terms of a geologic setting (Fig. 3) the study area is located in a marginal zone of the Magura nappe being horizontally thrust over the Silesian nappe. The front of this overthrust is near Gorlice (Świdziński, 1973). The flysch rocks are folded and tectonised. The Magura unit of Upper Cretaceous to Oligocene age (almost 93% of the area) includes the Inoceramian beds, variegated shales, Ciężkowice sandstones, Sub-Magura shales and Magura sandstones. The Inoceramian Beds developed as thin- and medium bedded sandstones and shales represent so called normal flysch (Bober, Zabuski, 1993). The Inoceramian Beds are capped with the Eocene variegated shales developed as weakly resistant clayey-shale flysch. Ciężkowice sandstones represent sandstone flysch. Individual rock units have additionally been sliced and imbricated. The Silesian unit (Paleogene–Oligocene) is known here as Krosno beds represented by grey marly shales with subordinate sandstones. These series can form normal or shale flysch. The Quaternary deposits comprise clays, loams and debris of various origin, including landslide colluvium and river alluvia that occur in the valley of the Ropa river.

The sedimentary structures and tectonics are well reflected in the morphology. The inverse relief is related to the Magura sandstones. The NW–SE oriented syncline ridge of Jelenia Góra and Maślana Góra with the highest summit reaching 753 m a.s.l. forms the upper elevation level. The ridge is dissected by the transverse SW–NE faults. The second elevation level is formed by lower and relatively flat hills reaching about 350–580 m a.s.l. The bottom of the Ropa river and stream channels are at 290–350 m a.s.l. The floor of the Bystrzanka stream valley is narrow with fragments of young Pleistocene terraces. The tributaries are of erosional nature and dissect alluvial deposits as well as the bedrock. The differences in elevation are of the order of 50 to 300 m, slope gradients of 8 to 35°, and a dense network of small erosional-denudational valleys render the area prone to landsliding.

The inventoried landslides occupy 5.1 km^2, which is ca. 30%. They represent morphologically and genetically unique forms as well as forms that were rejuvenated. Because of that they were classified as singular or multiple polygons, respectively (Carrara *et al*.,1991; Pasuto, Soldati, 1999). The registered landslides were mapped (Fig. 4) and classified according to modified typology of Varnes (Varens, 1978; Cruden, Varnes, 1996; Dikau *et al*., 1996; Margielewski, 2004, 2009). The majority of inventoried landslide (74%) are compound or complex forms, and as the most numerous group were used as occurrences for hazard modelling. Distributions of landslides with respect to slope gradients and particular lithostratigraphic units are given in Tables 1 and 2, respectively.

The major trigger in the study area is precipitation as shown in Figure 5. The return periods for the rainfall triggers, calculated empirically (Zabuski *et al*., 2003), were 7.08 years for short downpours and 4.38 years for long-lasting, less intense precipitation. Landslide activity refers to various time scales (Kotarba, 1989; Flageollet, 1996). Information on landslide activity and their destructive effects were available from the Research Station Polish Academy of Sciences at Szymbark, and for the purpose of hazard evaluation the landslide occurrences were divided into two subsets (pre 1969, post 1969 till 2003).

Landslide susceptibility and hazard were assessed using conceptual model that relates causative factors to landslide occurrences (Figs 6, 7). All input data are layers depicting particular factors. Using *Weights of Evidence* (Bonham-Carter *et al*., 1989; Bonham-Carter, 1994), belonging to bivariate statistical methods, it was possible only to generate the susceptibility map (Mrozek *et al*., 2004; Mrozek, 2008). For landslide hazard, a spatial predictive modelling technique based on multivariate statistics was used according to procedure developed by Chung and Fabbri (1993, 1999, 2005). As in the former case, the method is based on Favourability Function concept. For the purpose of this study, the modelling was performed using the *Empirical Likelihood Ratio* function. The details of mathematical foundations of the ELR method have been presented by Chung (2006), and are only outlined here by presenting formulas [2–11]. The method is robust to conditional dependence between causative factors and owing to temporal partitioning of landslide occurrence allows for landslide hazard prediction. For the study area, continuous layers were: elevation, slope gradient, slope aspect, distance from tectonic dislocations, while categorised (discrete) layers were: lithology and land use. The rasterized layers with a 10 m pixel and two temporal sets of landslide occurrences were modelled using SPMS software (SPMS, 2004). The obtained results for frequency distribution and ELR are presented in Figs 8 and 9. The procedure was performed twice using for occurrences the whole areas of landslides and rupture zones. The appropriate maps, presented in Figs 11 and 12, illustrate the differences in predicted hazardous zones.

For quantitative risk evaluation, information on elements at risk and their vulnerability are prerequisite. Although people might be and usually are exposed to landslide danger, they were not considered in this study (no fatalities reordered). Elements at risk comprised houses and homestead lots, roads, lifelines, arable fields, orchards, forests, grassland. Following Remondo *et al*. (2004, 2005) vulnerability was treated as the ratio of repair costs to the cost of a new element (recovery costs). It was calculated this way for roads and lifelines. Vulnerability of other elements was determined semi-qualitatively (AGS, 2000; Glade, 2003;Crozier, Glade, 2005). It should be emphasised here, that vulnerability has to be calculated separately for each element at risk and may not be combined to form "one compiled vulnerability layer". Instead, the map of potential losses is proposed which is a product of vulnerability and costs of a given exposed element per pixel. Based on predicted hazard and total potential losses assigned to particular pixels, the final risk map has been generated for the study area (Fig. 13). The cost-benefit analysis performed for two critical locations (in Bystra midregion and at the Bystrzanka outlet close to the junction with a regional road no. 28) indicated that the calculated indirect losses are significant (up to 20%) when compared to direct ones and may not be neglected in risk assessment.

The obtained results showed that landslide risk and hazard modelling by ELR function is reliable for the scale of 1:10 000. The predicted hazardous zones occupy mainly slopes inclined at 7–18°, coincide with the extent of Eocene variegated shales and with the faulted region of Ciężkowice sandstones contacting with shales. Thus, the hazard and risk maps generated by ELR method are considered to be supportive in landuse management. Moreover, the indirect losses are important constituent of risk evaluation and have to be taken under consideration in spatial planning.

The study was partially supported by the funds to the ALARM project —Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas in frames of 5FP EU (project no. EVGI-2001-0018; contract no. EVG1-CT-2001-00038).

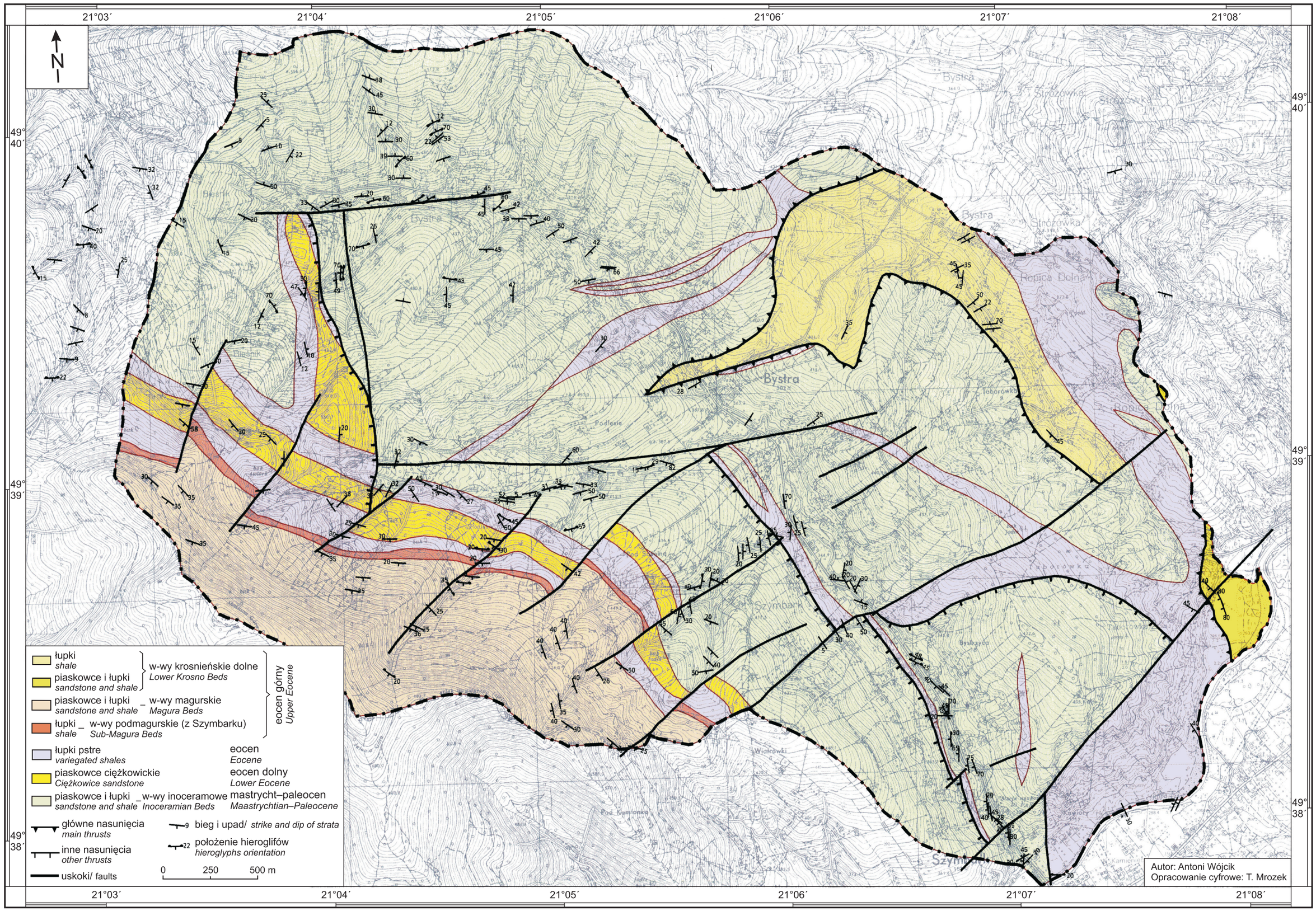


Fig. 3. Mapa geologiczna obszaru badań

Geologic map of the study area

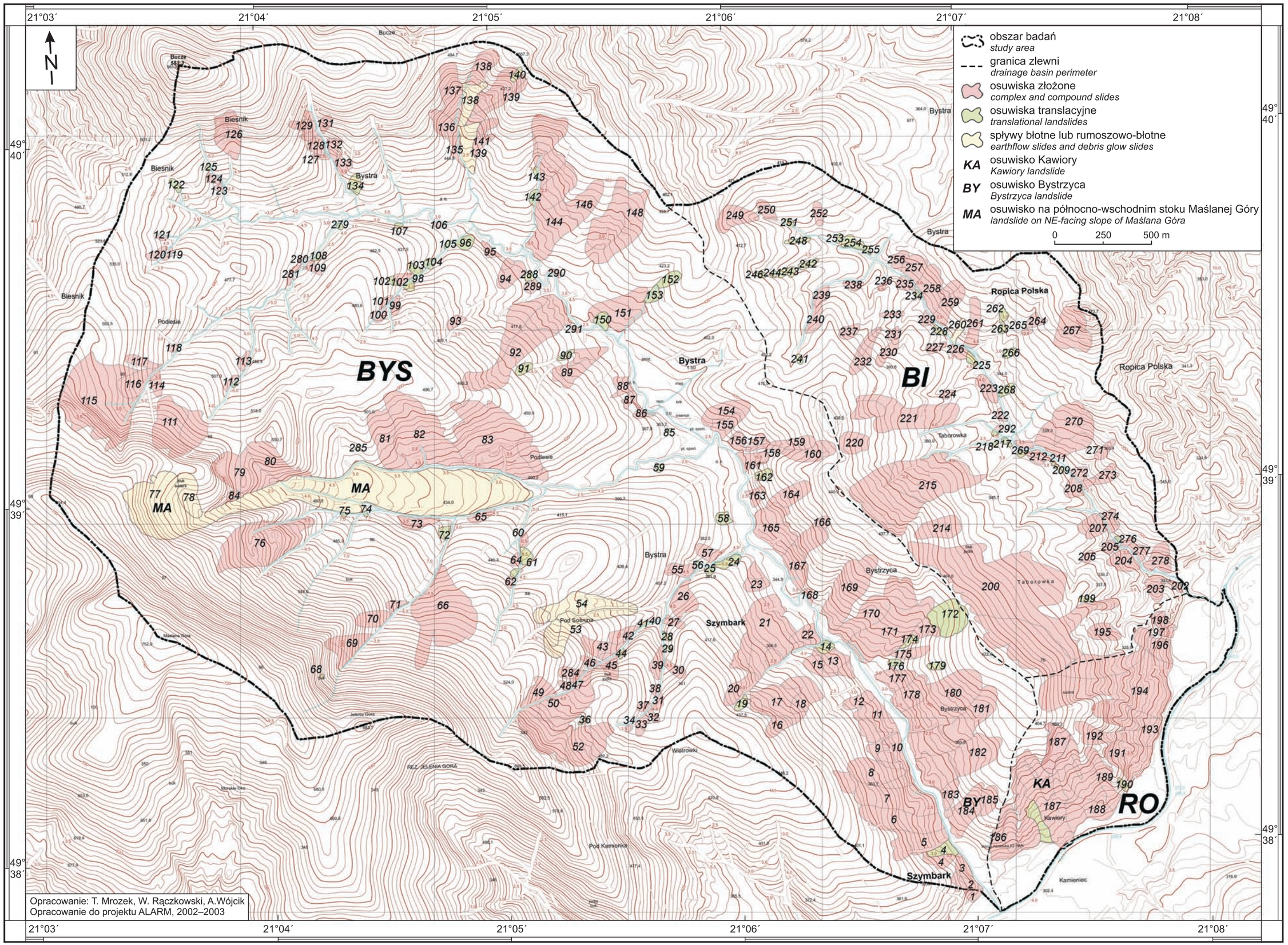


Fig. 4. Rozmieszczenie osuwisk i podział ruchów masowych na obszarze badań w nawiązaniu do zmodyfikowanej typologii Varnesa (Varnes, 1978; Cruden, Varnes, 1978; Dikau i in., 1996)

Landslides of the study area and their typology based on modiefied Varnes' classification (Varnes, 1978; Cruden, Varnes, 1978; Dikau *et al.*, 1996)

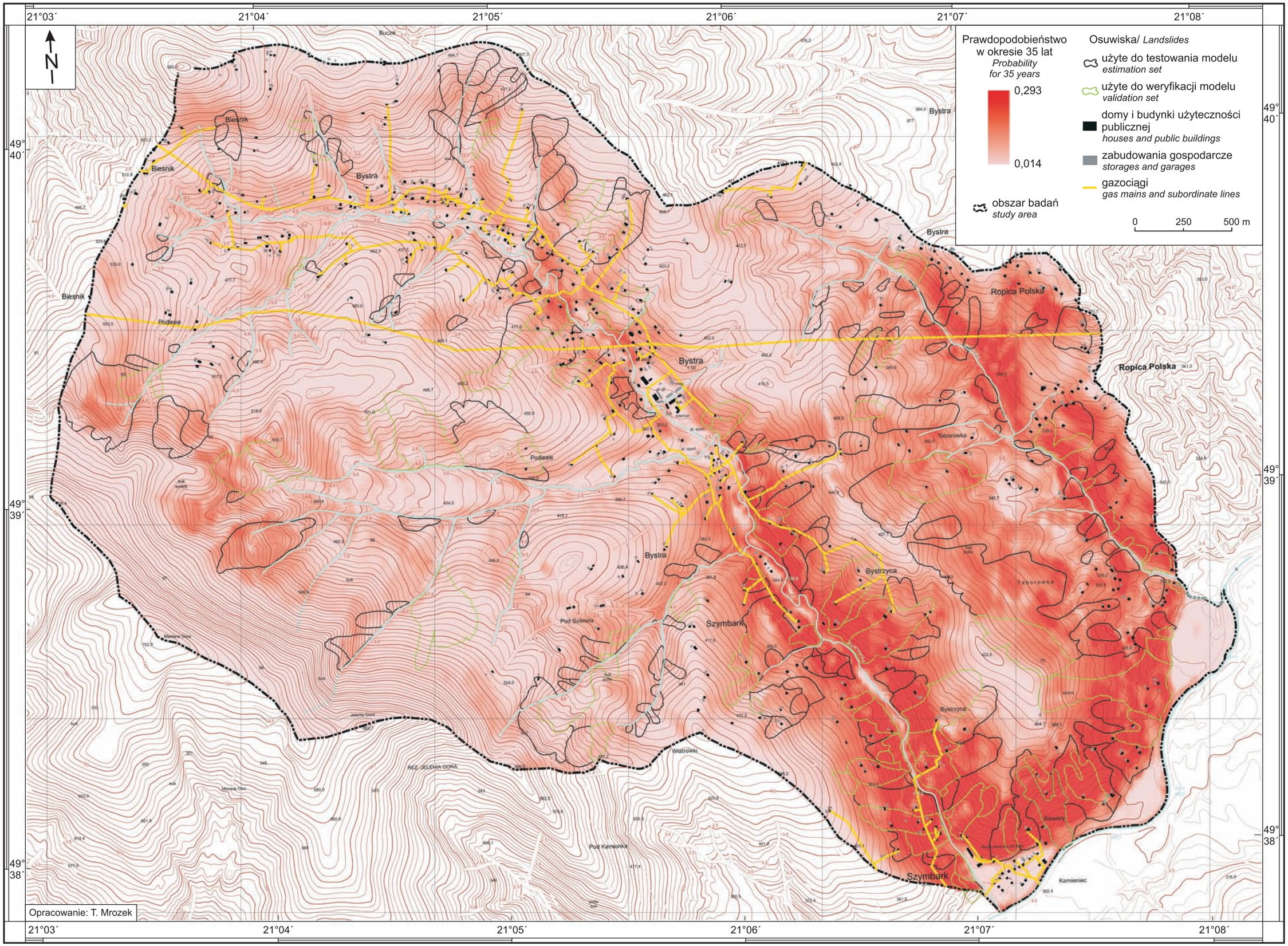


Fig. 11. Mapa zagrożenia osuwiskowego wygenerowana przy użyciu metody ELR zastosowanej do całej powierzchni osuwisk złożonych oraz wybrane elementy infrastruktury

Landslide hazard map obtained from ELR modelling based on total landslide areas and selected elements of infrastructure

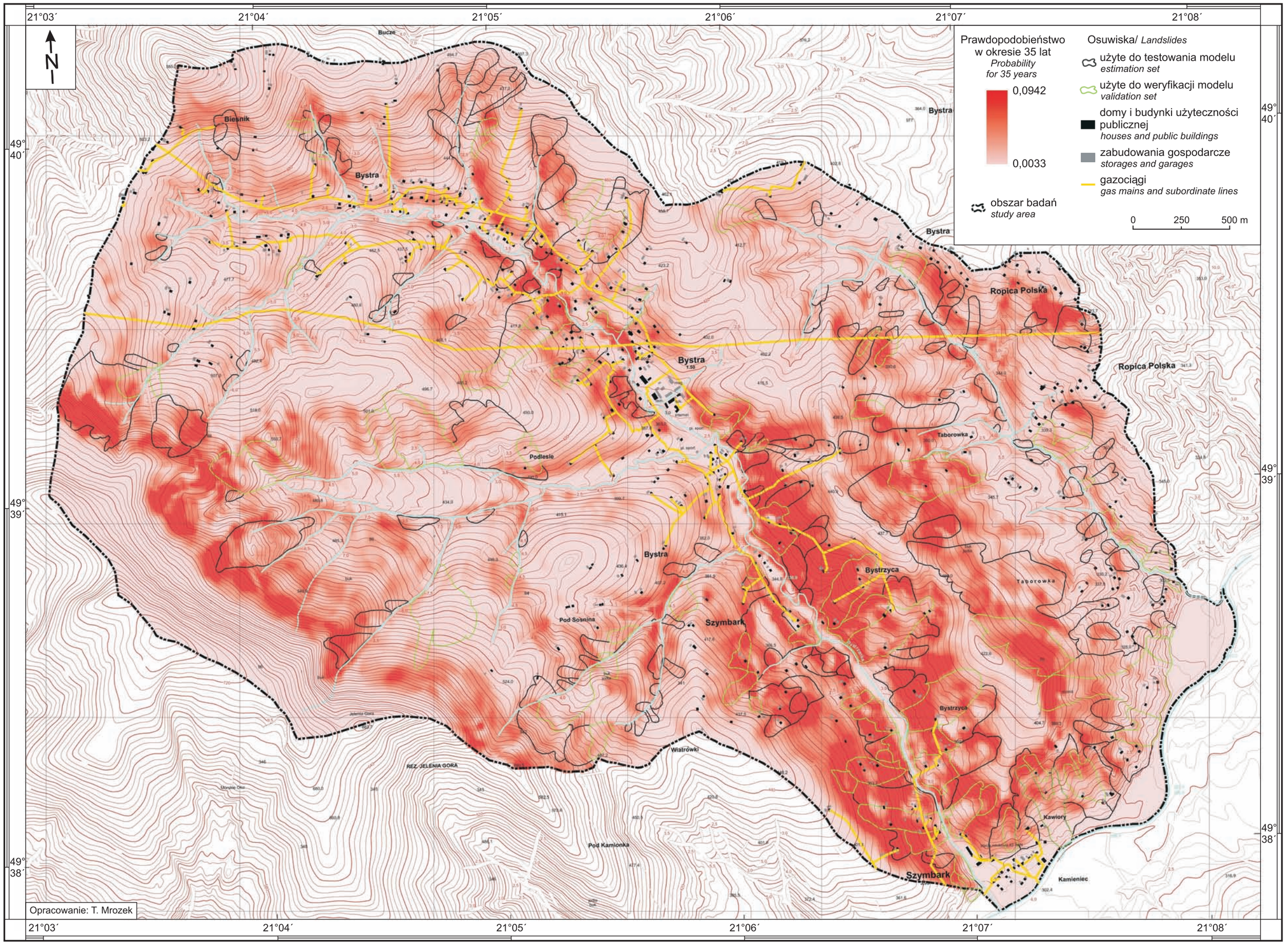


Fig. 12. Mapa zagrożenia wygenerowana metodą ELR zastosowaną do obszarów oderwania oraz wybrane elementy infrastruktury

Landslide hazard map obtained from ELR modelling based on landslide rupture zones and selected elements of infrastructure

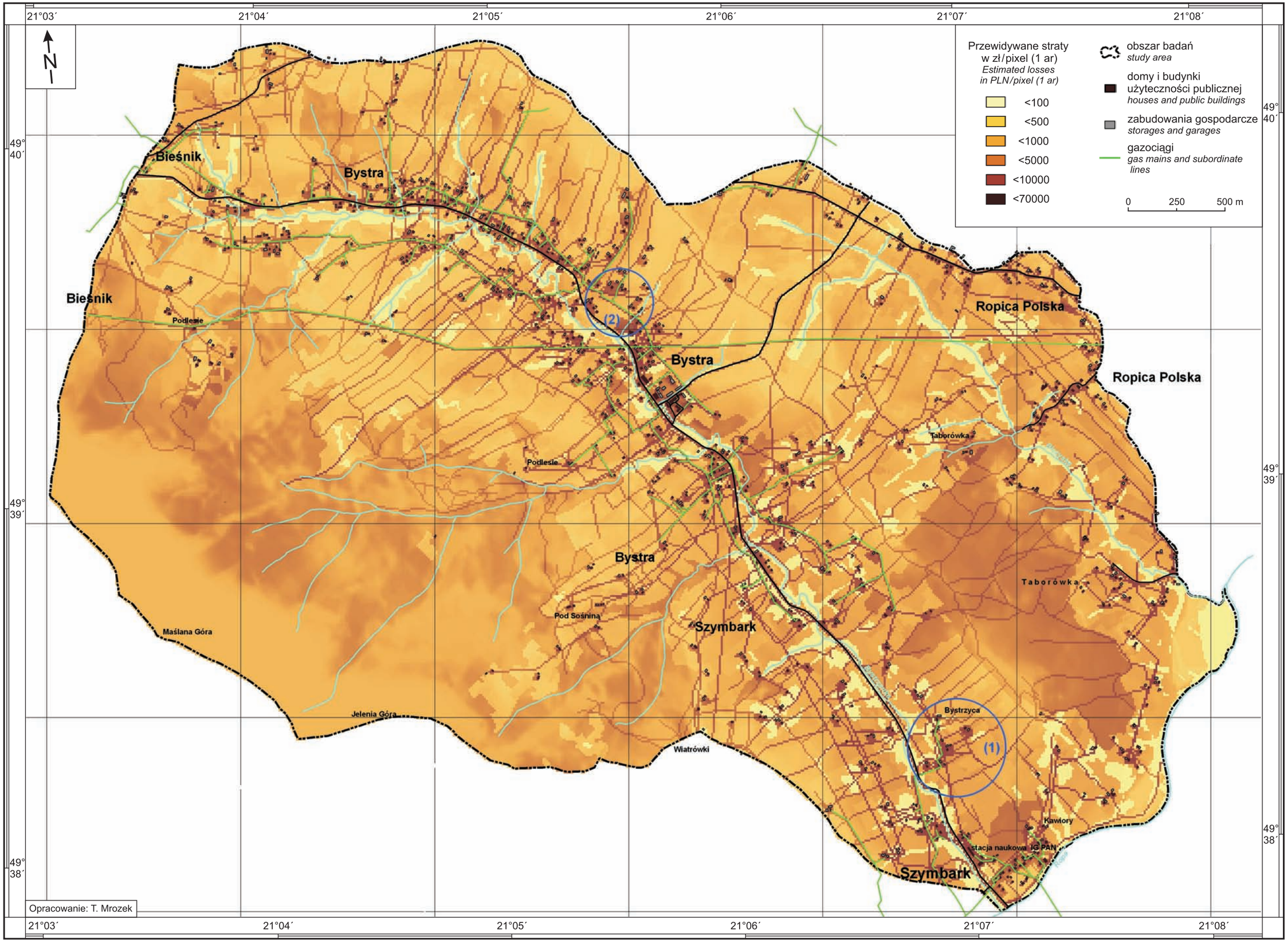


Fig. 13. Mapa ryzyka

Lanslide risk in the study area