

Modelowanie podatności osuwiskowej z zastosowaniem metody indeksowej i wysokorozdzielczych danych z lotniczego skaningu laserowego (LIDAR) na obszarze Gdańska

Anna Małka¹



Landslide susceptibility modelling using the index method and high-resolution airborne laser scanning data (LIDAR) in the area of Gdańsk. *Prz. Geol.*, 63: 301–311.

Abstract. The paper presents a statistical approach to landslide susceptibility modelling using the GIS-based spatial data analysis. The area of investigation is an urban district in which the activation of mass movements is of interest to both the local population and the authorities. The analyses were carried out on the basis of the “Map of landslides and risk areas for the city of Gdańsk” drawn in 2011. The research took into account the geological, geomorphological, hydrological, hydrogeological and anthropogenic conditions. Eleven landslide influencing factors were considered in the analyses. The landslide susceptibility map was evaluated by the landslides index method. The obtained results show that the most susceptible to landslides are slopes of angle between 10–29° and areas located at a distance of 50 m from watercourses and reservoirs. The presence of silty sands, silts and clays along a lithological layer and the N, NW and NE aspect of a slope are also of great significance. The final map presents the areas with the greatest probability of mass movement occurrence.

Keywords: landslide susceptibility, landslide index method, morainic upland, Gdańsk city area



I Ogólnopolskie Sympozjum
Geointerdyscyplinarnych
Metod Badawczych

Najbardziej znaczącymi dla gospodarki człowieka formami powstałymi w wyniku ruchów masowych są osuwiska, które mają często charakter katastrofalny i przynoszą znaczne straty ekonomiczne. Degradacyjny wymiar osuwisk nabiera szczególnej wagi w przypadku zwartych aglomeracji miejskich. Przykładem takiego obszaru jest Gdańsk, zlokalizowany na terenach charakteryzujących się urozmaiconą morfologią. Współczesne intensywne procesy urbanizacyjne Gdańska, a w szczególności dynamiczny rozwój budownictwa mieszkaniowego związany z przyrostem ludności, przemawiają za celowością predykcji ruchów masowych na terenie miasta. Negatywne skutki ruchów masowych mogą powodować olbrzymie straty materialne, przykładowo w 2001 r. po nawalnych opadach deszczu straty wywołane uaktywnieniem osuwisk w Gdańsku oszacowano na 3,7 mln zł (Jurys i in., 2014).

W celu zarządzania ryzykiem osuwiskowym są stosowane różne metody prewencji, w tym metody kartograficzne. Regulacje prawne (Grabowski i in., 2008), wprowadzone po „katastrofie osuwiskowej” w 1997 i 2000 r., zobligowały organy administracji samorządowej do obserwacji terenów zagrożonych ruchami masowymi oraz gromadzenia tych informacji w formie przestrzennej bazy danych. Seryjne mapy cyfrowe osuwisk oraz karty dokumentacyjne osuwisk i terenów zagrożonych są opracowywane od 2008 r. w ramach realizacji ogólnopolskiego projektu System Osłony Przeciwośuwiskowej – SOPO. Jednym z produktów wynikowych projektu jest „Mapa osuwisk i terenów zagrożonych (MOTZ) w skali 1 : 10 000”. Połączenie informacji zawartych na MOTZ z innymi komplementar-

nymi danymi cyfrowymi z rejestrów państwowych, a przede wszystkim z wysokorozdzielczym modelem rzeźby terenu pozyskanym z projektu Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami (ISOK), umożliwia wykonanie precyzyjnych analiz wielokriterialnych GIS, pozwalających na ocenę podatności na osuwanie oraz zagrożenia i ryzyka osuwiskowego badanych obszarów.

Literatura naukowa obfituje w liczne przykłady praktycznego zastosowania technologii GIS do badań ruchów masowych (m.in. van Westen i in., 1997, 1999; Huabin i in., 2005; Sarkar i in., 2008). W Polsce analizy geoinformacyjne osuwisk są prowadzone dopiero od początku XXI w. i dotyczą południowej części Polski (Mrozek i in., 2004; Kamiński, 2007, 2012; Długosz, 2011; Wojciechowski, 2009; Kasprzak & Traczyk, 2012; Mrozek, 2013). W badaniach podatności osuwiskowej stosuje się wiele, różnorodnych technik obejmujących podejście empiryczne, statystyczne oraz deterministyczne, stosowane przy dużych skalach w geologii inżynierskiej (van Westen i in., 1999, 2006).

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki modelowania predykcyjnego osuwisk przeprowadzonego przy pomocy narzędzi GIS i metod statystycznych. Celem pracy jest ocena podatności osuwiskowej w Gdańsku, wyniki przeprowadzonej analizy geoinformacyjnej mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w planach zagospodarowania przestrzennego.

Podstawę przeprowadzonych analiz stanowi opracowany w 2011 r. „Rejestr osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi ziemi dla terenu miasta Gdańska”. Pracami terenowymi objęto wówczas obszar 125 km². Wskaźnik osuwiskowości powierzchniowej, czyli stosunek łącznej powierzchni osuwisk do powierzchni tego terenu, wynosi 0,25%. Ogółem zlokalizowano w Gdańsku 96 osuwisk (Jurys i in., 2014).

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Geologii Morza, ul Kościarska 5, 80-328 Gdańsk, anna.malka@pgi.gov.pl.

CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

Gdańsk charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem geomorfologicznym i geologicznym. Obszar najbardziej predysponowany do powstawania osuwisk stanowi zachodnia, wysoczyznowa część Gdańska, który należy do peryferyjnej części Pojezierza Kaszubskiego, ukształtowanego w plejstocenie (Kondracki, 1998). Teren ten jest przedmiotem analizy geoinformacyjnej prezentowanej w niniejszej pracy (ryc. 1).

Pod względem geologicznym występują tutaj utwory czwartorzędowe o znacznej miąższości, dochodzącej do 145 m (Pikies & Zaleszkiewicz, 2013). Większą część obszaru zajmują osady lodowcowe wysoczyzny morenowej oraz osady wodnolodowcowe i zastoiskowe. Stropowa część wysoczyzny jest zbudowana głównie z glin zwałowych górnych stadiału górnego zlodowacenia wisły. Osady te zajmują zwarte obszary w południowej i zachodniej części miasta, natomiast w strefie krawędziowej wysoczyzny występują w postaci niewielkich powierzchniowo płatów w rejonie Wrzeszcza i Oliwy (Mojski, 1979).

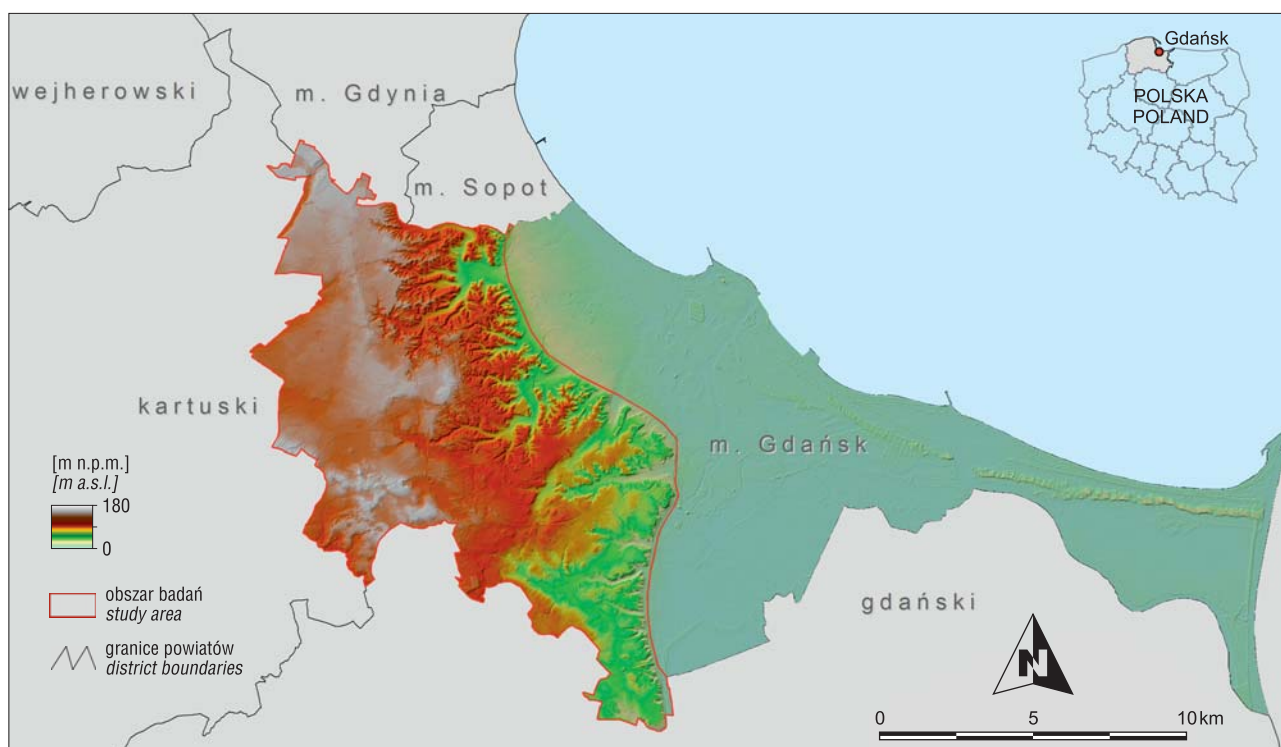
W strefie zurbanizowanej Gdańska obserwuje się wyraźny związek pomiędzy budową geologiczną i wynikającą z niej morfologią terenu, a występowaniem osuwisk. Znaczne deniwelacje terenu, zróżnicowane nachylenia stoków oraz sprzyjająca budowa geologiczna charakteryzująca się obecnością niejednorodnych osadów lodowcowych, zastoiskowych, wodnolodowcowych i licznymi zaburzeniami głacictonicznymi, warunkują powstawanie osuwisk. Istotną rolę w tworzeniu się osuwisk odgrywają utwory o frakcji aleurytowej, odsłaniające się w krawędzi wysoczyzny morenowej Pojezierza Kaszubskiego, które są podatne na rozmywanie i upłynnianie (Jurys i in., 2014).

W części zachodniej Gdańska, będącej przedmiotem analizy, występują liczne, krótkie ciekły odwadniające wysoczyznę (m.in. Kanał Raduni, Potok Oruński, Strzyża).

Na obszarze miasta głębokość pierwszego poziomu wodonośnego jest wyraźnie zróżnicowana w zależności od ukształtowania terenu i budowy geologicznej, a w rejonie najwyższych wzniesień osiąga głębokość 50 m (Szelewicka & Lidzbarski, 2006). Obszar drenażu pierwszego poziomu wodonośnego stanowi strefa krawędziowa wysoczyzny, gdzie wody podziemne wypływają w postaci źródeł, wysięków i młak. W powstawaniu ruchów masowych w utworach czwartorzędowych istotne znaczenie ma obecność horyzontów wód zawieszonych na stokach. Zjawisko to jest związane z występowaniem soczewek utworów nieprzepuszczalnych w osadach łatwo przepuszczalnych. Ich obecność jest trudna do wykrycia i utrudnia modelowanie (Parriaux i in., 2010). Na wysoczyźnie morenowej Pojezierza Kaszubskiego występowanie poziomów wód zawieszonych implikuje skomplikowaną budowę geologiczną. Pojawiają się one powyżej wkladek glin zwałowych, m.in. na obszarze Trójmiejskiego Parku Krajobrazowego (Szelewicka & Lidzbarski, 2006).

Kolejnymi czynnikami inicjującymi powstawanie i rozwój osuwisk w mieście są sposób zagospodarowania terenu oraz działalność ludzka.

Ponad połowa powierzchni wszystkich osuwisk w Gdańsku zlokalizowana jest w lasach, a przyczyny ich powstania są wyłącznie naturalne. Pozostałe osuwiska powstały w wyniku antropogenicznych zmian użytkowania terenu, których intensyfikacja nastąpiła w ciągu ostatnich 200 lat. Jeszcze na początku XIX w. miasto było zlokalizowane jedynie w granicach płaskiego obszaru obecnej dzielnicy Śródmieście. W pozostałej części istniały nieliczne wioski, usytuowane osiowo wzdłuż lokalnych cieków i dróg (Engelhard, 1813). Późniejsze procesy urbanizacyjne powodowały zaburzenie równowagi stoków i nasilenie ruchów masowych. Szczególnie negatywny wpływ miało podcinanie i zestromienie stoków, obciążenie zabudową oraz nieodpowiednia gospodarka wodno-ściekowa (Jurys i in., 2014).



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań
Fig. 1. Location of the study area

Warunki meteorologiczne wydają się nie odgrywać kluczowej roli w powstawaniu osuwisk w Gdańsku. Jednak w świetle współczesnego globalnego ocieplenia i scenariuszy wzrostu częstotliwości ekstremalnych zdarzeń hydrometeorologicznych (IPCC, 2007) należy brać pod uwagę większą ilość katastrofalnych opadów atmosferycznych inicjujących ruchy masowe.

MATERIAŁY

Dane do badań zostały udostępnione przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii, dodatkowo korzystano z danych źródłowych znajdujących się w zasobach Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego (PIG-PIB) oraz materiałów z domeny publicznej. W celu przeprowadzenia analizy GIS wykorzystano: dane wysokościowe pochodzące z lotniczego skaningu laserowego (ang. ALS – *Airborne Laser Scanning*), określane również jako dane LIDAR (ang. *Light Detection and Ranging*) z projektu (PZGiK), bazy danych obiektów topograficznych (BDOT), mapę gruntów na głębokości 1, 2 i 4 m p.p.t. z „Atlasu geologiczno-inżynierskiego aglomeracji trójmiejskiej Gdańsk–Sopot–Gdynia” (Frankowski & Zachowicz, 2007), mapę pierwszego poziomu wodonośnego, bazę danych „Urban Atlas” pozyskaną z Europejskiej Agencji Środowiska (Urban Atlas–PL006L–Gdańsk, 2010) oraz MOTZ. Dokładność wykorzystanych do analizy warstw odpowiada dokładności kartometrycznej mapy w skali 1 : 10 000. Wszystkie mapy rastrowe użyte do analizy mają rozdzielczość 5×5 m.

Dodatkowo w analizie wykorzystano Karty Rejestracyjne Osuwisk (KRO) wyeksportowane z desktopowej wersji bazy SOPO w postaci *.dbf.

METODYKA BADAŃ

Analizę przestrzenną przeprowadzono za pomocą oprogramowania ArcGIS v.10.2, do konwersji danych oraz do zmiany rozdzielczości danych wysokościowych wykorzystano pomocnicze oprogramowanie GlobalMapper v. 14.2.

Bazowe źródło informacji w przeprowadzonej analizie i następnie w walidacji danych stanowi MOTZ w skali 1 : 10 000 dla miasta Gdańska. W celu wyznaczenia podstawowych i wtórnych atrybutów topograficznych² wykorzystano dane LIDAR. W pierwszym etapie badań zmniejszono rozdzielczość cyfrowego, rastrowego modelu wysokościowego z 1×1 do 5×5 m oraz zebrano i poddano selekcji mapy tematyczne czynników mających wpływ na osuwanie.

We wcześniejszych pracach dotyczących podatności osuwiskowej (Kamiński, 2007; Mrozek, 2013) brano pod uwagę w analizach jedynie aktywne osuwiska. W przypadku Gdańska udokumentowano jedynie pięć osuwisk w całości aktywnych i sześć stref aktywnych w obszarze osuwisk nieaktywnych i okresowo aktywnych. Osuwiska aktywne nie spełniają zasady reprezentatywności statystycznej, ponieważ aż trzy z nich znajdują się nad jeziorem Wysockim. Analizą geoinformacyjną objęto więc wszystkie

osuwiska, wychodząc z założenia, że większa liczebność polepszy podstawy wnioskowania, a analiza statystyczna przy większej ilości danych będzie pewniejsza.

Zbiór zinventaryzowanych osuwisk podzielono na dwa zróżnicowane przestrzennie podzbiory o liczebności 66 i 30. Większy podzbiór i mapy tematyczne wykorzystano do opracowania modelu, natomiast drugi podzbiór posłużył do jego weryfikacji. Taki podział umożliwił z jednej strony osiągnięcie dużej dokładności i wysokiej reprezentatywności modelu, z drugiej strony pozwolił na statystycznie wiarygodną jego weryfikację. Ze względu na skupiony rozkład przestrzenny osuwisk, przy podziale na podzbiory zastosowano schemat próbkowania losowego stratyfikowanego. Stratyfikacja opierała się na głównych jednostkach geomorfologicznych, wyróżnionych w Gdańsku. Użyty schemat próbkowania umożliwił zachowanie identycznych proporcji liczebności w poszczególnych kategoriach i w całej populacji.

W modelowaniu podatności osuwiskowej badanego obszaru początkowo wykorzystano 13 czynników pasywnych zwizualizowanych w postaci map. Bezpośrednio z cyfrowego modelu wysokościowego obliczono takie atrybuty topograficzne jak: nachylenie, ekspozycję, krzywiznę wertykalną, energię rzeźby³, topograficzny indeks wilgotności (TWI), indeks siły spływu (SPI), a także współczynnik zdolności transportowania osadu (LS).

Energia rzeźby (relief) określa gradienty wysokościowe w zadanym z góry otoczeniu. Została ona obliczona z rastrowego modelu wysokościowego o rozdzielczości obliczeniowej 1×1 m i informuje o deniwelacjach dla otoczenia 5 m od każdej komórki rastrowej.

Indeks siły spływu stanowi miarę siły erozyjnej wody, spływającej po powierzchni terenu. Indeks SPI (Wilson & Gallant, 2000) jest definiowany wzorem:

$$SPI = \ln (As * \tan \beta)$$

gdzie:

As – właściwa lokalna powierzchnia zlewni,

β – kąt nachylenia stoku.

Na podstawie tych samych zmiennych jest obliczany topograficzny indeks wilgotności, który opisuje wpływ topografii na procesy hydrologiczne i wskazuje na obszary sprzyjające koncentracji wody. Indeks TWI (Moore & Grayson, 1991) definiuje wyrażenie:

$$TWI = \ln \left(\frac{As}{\tan \beta} \right)$$

Współczynnik zdolności transportowania osadu opisuje połączone efekty długości stoku, czyli długości spływu i nachylenia (Wischmeier & Smith, 1978). Indeks LS obliczono ze wzoru:

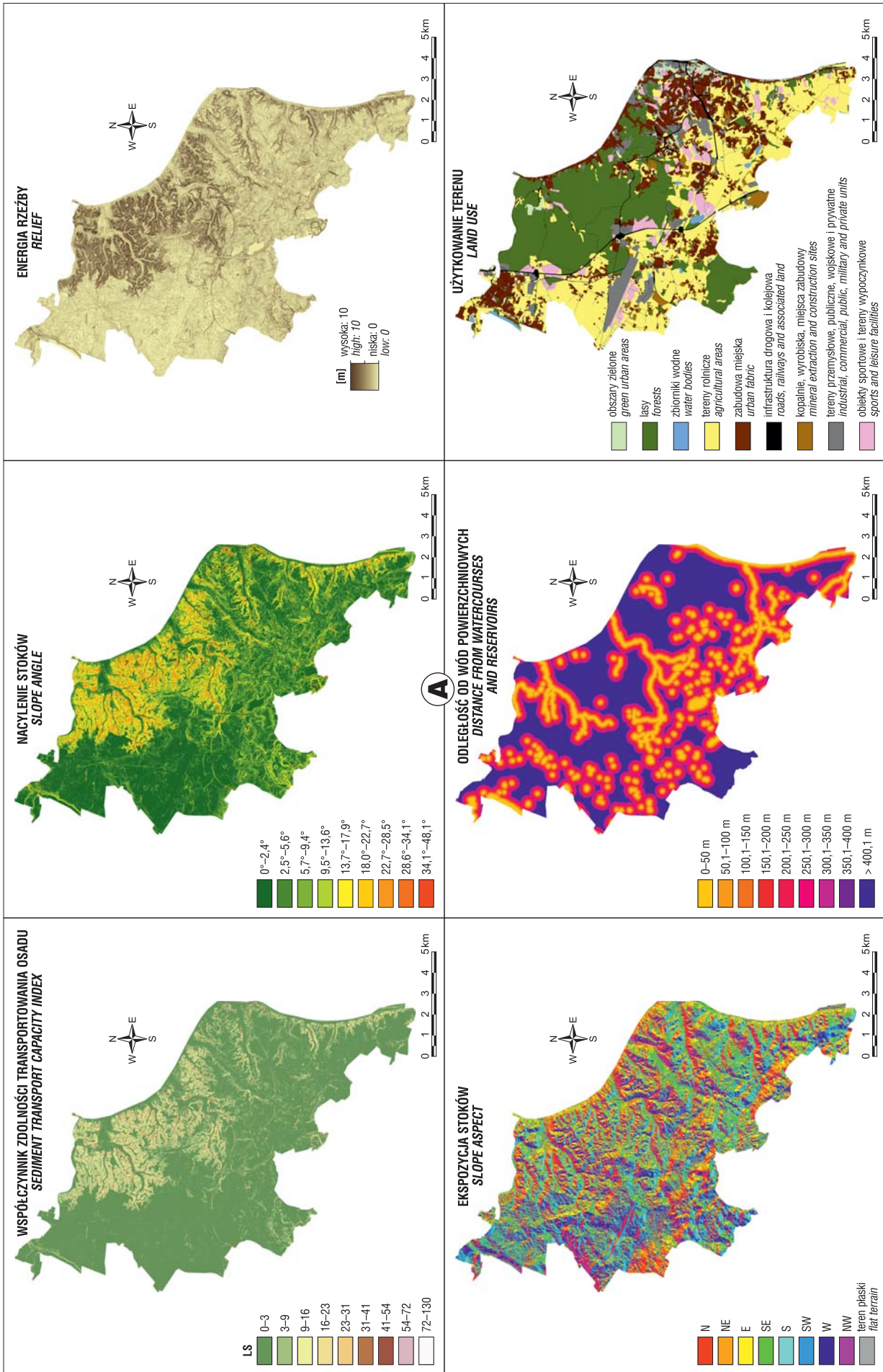
$$LS = \left(\frac{\alpha}{22,1} \right)^{0,5} (65,41 \sin^2 \beta + 4,56 \sin \beta + 0,065)$$

gdzie:

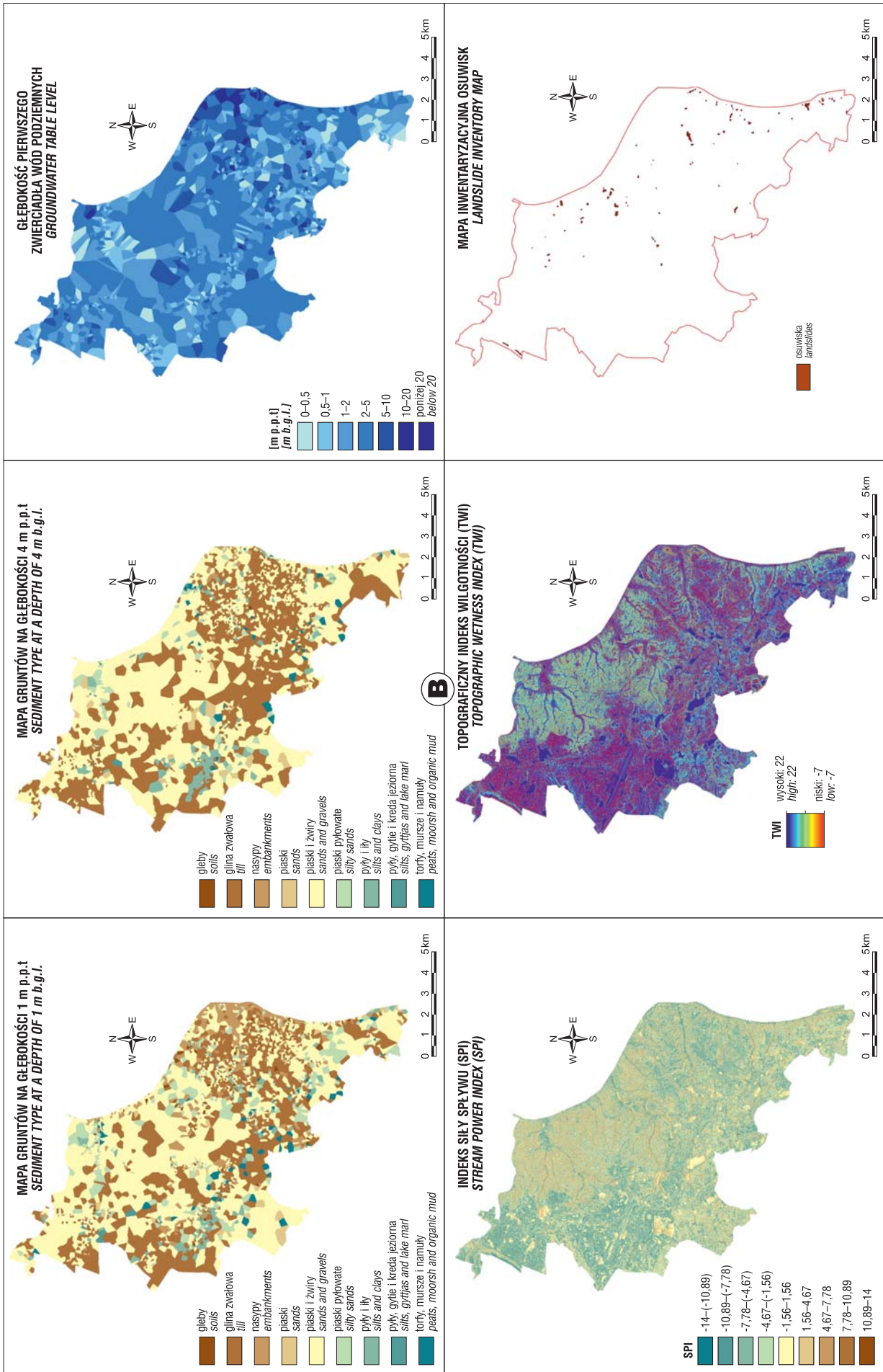
α – poziomo mierzona długość stoku.

² Więcej informacji na temat parametrów morfometrycznych obliczanych z cyfrowych modeli wysokościowych oraz fachowego słownictwa z zakresu GIS czytelnik znajdzie w podręcznikach z zakresu GIS (np. dostępnej w sieci publikacji J. Urbańskiego http://ocean.ug.edu.pl/~oceju/CentrumGIS/dane/GIS_w_badaniach_przyrodniczych_12_2.pdf).

³ Energia rzeźby (relief) – to parametr morfometryczny obliczany przy użyciu oprogramowania GIS, utworzony w wyniku numerycznej transformacji cyfrowego modelu rzeźby, wskazuje on na różnice wysokości w zadanym otoczeniu. Energia rzeźby obliczana jest jako różnica wysokości maksymalnej i minimalnej dla danego zakresu pól modelu. W badaniach podatności osuwiskowej była z powodzeniem stosowana m.in. przez Kasprzaka i Traczyka (2012).



Ryc. 2A. Mapy tematyczne zastosowane w analizie GIS
Fig. 2A. Thematic layers used in GIS analysis



Ryc. 2B. Mapy tematyczne zastosowane w analizie GIS
Fig. 2B. Thematic layers used in GIS analysis

Do pozostałych warstw tematycznych należą: użytkowanie terenu, odległość od wód powierzchniowych, mapy gruntów na głębokości 1, 2 i 4 m p.p.t. oraz głębokość zwierciadła wód podziemnych, obliczona na podstawie danych otworowych z dokumentacji geologiczno-inżynierskich metodą alokacji euklidesowej.

Atrybuty topograficzne obliczone bezpośrednio z cyfrowego modelu wysokościowego przedstawiają zmienne ciągłe, dlatego dokonano ich konwersji do postaci interwałowej (kategoryzowanej). Dobór przedziałów nachyleń stoków wykonano metodą empiryczną na podstawie oceny stoków, które są znane z miejsc występowania osuwisk. W grupowaniu nachyleń wykorzystano metodę naturalnych przerw Jenksa⁴.

W celu określenia prawidłowości powstawania osuwisk zgeneralizowano wybrane warstwy wektorowe. Dane geologiczne zostały zagregowane⁵ na podstawie litologii osadów, z pominięciem ich cech genetycznych i stratygraficznych. Agregację danych cyfrowych przeprowadzono również dla pokrycia terenu.

W wyniku wielokrotnych iteracji⁶ odrzucono warstwy przedstawiające krzywiznę wertykalną i mapę gruntów na głębokości 2 m p.p.t., ponieważ ich wpływ na podatność osuwiskową jest minimalny.

Pozyskane w trakcie prac terenowych dane (MOTZ) oraz jedenaście map wizualizujących czynniki środowiskowe (ryc. 2A i B) posłużyły do wykonania mapy podatności osuwiskowej w skali 1:10 000 za pomocą indeksowej metody statystycznej – *landslide index method* (Van Westen, 1997; Sarkar i in., 2008).

Wykorzystana w analizie metoda indeksowa opiera się na następującym wzorze:

$$\ln W_i = \ln \left(\frac{Densclas}{Densmap} \right) = \ln \left(\frac{\frac{Npix(Si)}{Npix(Ni)}}{\frac{\sum Npix(Si)}{\sum Npix(Ni)}} \right)$$

gdzie:

W_i – współczynnik podatności na osuwanie przypisany do danej klasy mapy tematycznej

$Densclas$ – gęstość osuwiskowa w danej klasie mapy tematycznej

$Densmap$ – gęstość osuwiskowa objęta mapą

$Npix(Si)$ – liczba komórek rastra z osuwiskami w obrębie danej klasy mapy tematycznej

$Npix(Ni)$ – liczba komórek rastra w danej klasie mapy tematycznej

Głównym założeniem tej metody jest „krzyżowanie” mapy osuwisk z poszczególnymi mapami tematycznymi, dzięki temu jest możliwe obliczenie gęstości osuwiskowej

map tematycznych i odniesienie jej do gęstości osuwiskowej dla obszaru całej mapy. Wartość dodatnia logarytmu W_i wskazuje na klasę sprzyjającą powstawaniu osuwisk, ujemna świadczy o warunkach niesprzyjających. Ograniczeniem metody indeksowej jest niemożliwość oceny ryzyka osuwiskowego, jednak w przypadku Gdańska taka analiza obecnie jest trudna do przeprowadzenia ze względu na niewielki zasięg osuwisk oraz brak map inwentaryzacyjnych z różnych okresów.

W kolejnym etapie, po zsumowaniu obliczonych indeksów dla wszystkich czynników biernych, otrzymano mapę podatności na osuwanie dla obszaru Gdańska w skali 1:10 000 (ryc. 3), przy czym przedziały interwałowe dobrano, analizując histogram przedstawiający gęstość wartości indeksów (Wojciechowski, 2009).

WYNIKI

Na podstawie analizy statystycznej uzyskano przestrzenny rozkład obszarów predysponowanych do występowania osuwisk w Gdańsku.

Mapa podatności osuwiskowej została zweryfikowana za pomocą drugiego podzbioru osuwisk. W jego efekcie stwierdzono, że 84,49% całkowitej powierzchni diagnozowanych osuwisk należy do obszarów bardzo podatnych i podatnych na osuwanie, 14,25% do średnio podatnych i jedynie 1,25% do mało podatnych i bardzo mało podatnych.

Dużą i bardzo dużą podatnością osuwiskową charakteryzuje się północno-wschodnia (dzielnice: Oliwa, VII Dwór, Brętowo, Wrzeszcz Górny) i wschodnia (Orunia-Św. Wojciech-Lipce) część badanego obszaru.

Zastosowanie indeksowej metody statystycznej pozwoliło na określenie znaczenia poszczególnych czynników środowiskowych. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie współczynnika podatności osuwiskowej dla wszystkich zinwentaryzowanych osuwisk⁷ i klas map tematycznych uwzględnionej w końcowej analizie.

Na terenie Gdańska najważniejsze znaczenie w powstawaniu ruchów masowych ma ukształtowanie terenu oraz erozja i denudacja, które rozluźniają i degradują stoki.

Wyniki podobnych analiz, wykonanych metodą indeksową, przeprowadzonych w Karpatach wskazują na dominującą rolę litologii w tworzeniu się osuwisk, morfologia ma tam drugorzędne znaczenie (Długosz, 2011; Wojciechowski, 2009).

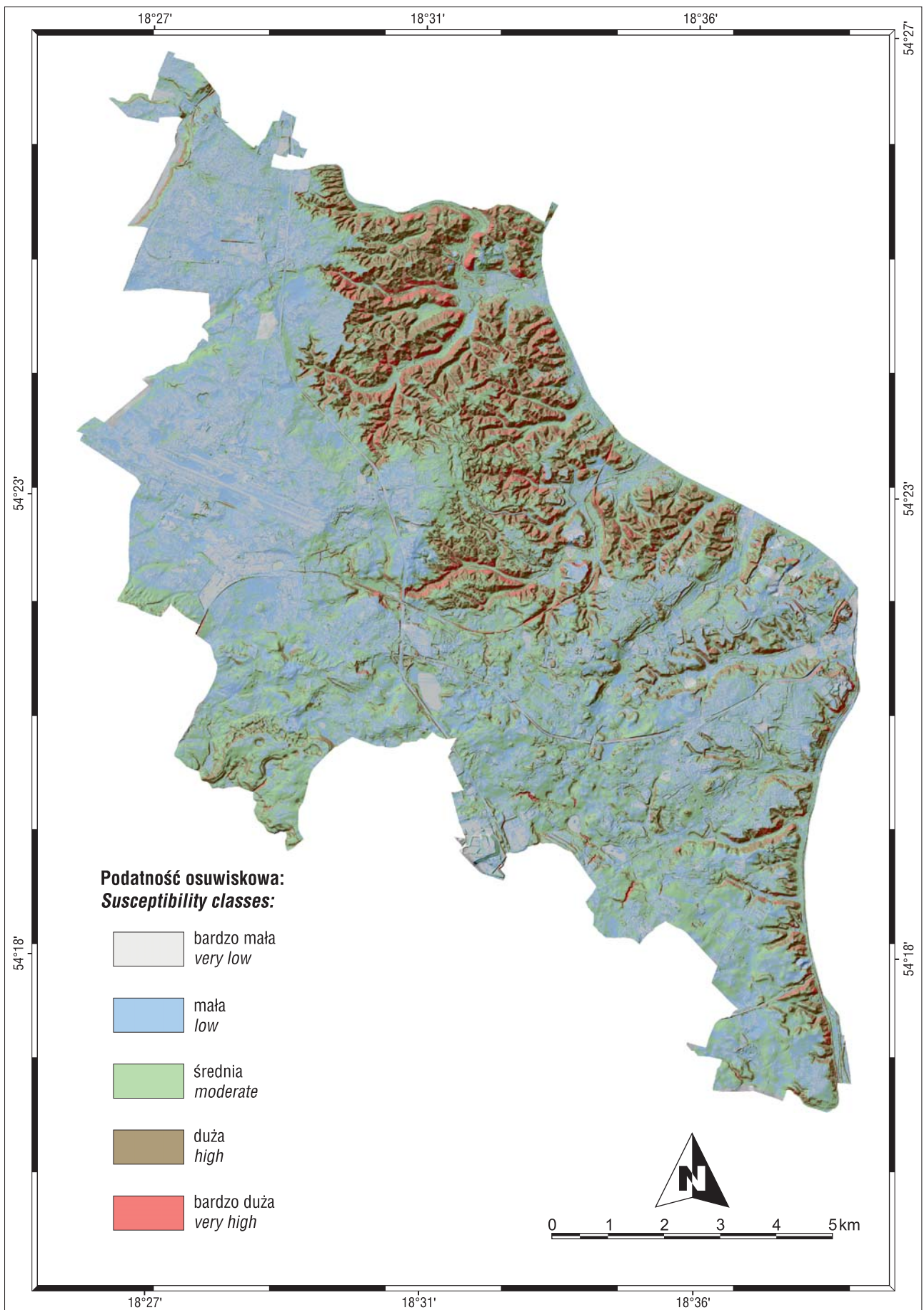
W Gdańsku współczynnik podatności osuwiskowej osiąga najwyższe (>1) wartości dla indeksu LS, nachylenia stoków i energii rzeźby. Wskaźnik LS dla analizowanego obszaru przyjmuje wartości od 0 do 130 (cecha niemianowana). Wartości współczynnika $\ln W_i$ rosną wraz ze wzrostem wartości wskaźnika LS, przy czym największe

⁴ Metoda naturalnych przerw umieszcza granice przedziałów w miastach wyznaczonych za pomocą optymalizacji Jenksa i jest wbudowana w zestaw narzędzi pakietu ArcGIS (ArcGIS Resource Center; <http://help.arcgis.com>). Metoda optymalizacji Jenksa jest najczęściej wykorzystywaną w systemach informacji przestrzennej (GIS) metodą służącą do jak najlepszego podziału na klasy, przez dążenie do zwiększenia jednolitości klas przy jednoczesnym zwiększeniu różnic między nimi. Polega ona na minimalizacji kwadratów odchylenia od średnich arytmetycznych dla klas (Żyszkowska i in., 2012).

⁵ Agregacja danych przestrzennych jest jedną z metod generalizacji stosowaną w GIS i polega na łączeniu określonej grupy obiektów w jedną całość lub zastąpienie jej jednym obiektem (Żyszkowska i in., 2012).

⁶ Iteracje polegały na wielokrotnym wykonywaniu kolejnych map podatności osuwiskowej przy uwzględnieniu różnych czynników biernych i następnie ich weryfikacji za pomocą drugiego podzbioru osuwisk.

⁷ Podatności osuwiskowe obliczone dla różnych zbiorów osuwisk wykazują pewne różnice, uwzględnienie wszystkich osuwisk pozwoliło uzyskać pełniejszy obraz uwarunkowań środowiskowych w obszarze badań.



Ryc. 3. Mapa podatności osuwiskowej w Gdańsku wygenerowana metodą „landslide index metod”
Fig. 3. Landslide susceptibility map of Gdansk evaluated by landslide index method

Tab. 1. Zestawienie współczynnika podatności na osuwanie (W_i) dla każdej klasy mapy tematycznej
Table 1. Weighting values (W_i) of the considered causal factors classes

Czynnik <i>Causal factor</i>	Klasa <i>Class</i>	$\ln W_i$	Wpływ warstw tematycznych na tworzenie się osuwisk <i>The impact of thematic layers on landslide formation</i>	Powierzchnia osuwisk <i>The area of landslides</i> [ha]	Powierzchnia klasy <i>The area of class</i> [ha]
Współczynnik zdolności transportowania osadu (LS) <i>Sediment transport capacity index</i>	0–3	–1,79	81,61%	4,16	9732,67
	3,1–9	0,87		8,68	1427,17
	9,1–16	1,35		7,54	769,40
	16,1–23	1,45		4,61	423,96
	23,1–31	1,73		3,27	226,50
	31,1–41	2,17		2,03	91,46
	41,1–54	2,75		1,28	32,27
	54,1–72	2,99		0,64	12,66
	72,1–130	3,00	0,19	3,63	
Nachylenie stoków <i>Slope-angle classes</i>	0–2,4°	–3,94	20,62%	0,24	4743,69
	2,5–5,6°	–2,10		1,03	3287,27
	5,7–9,4°	–0,42		2,81	1679,13
	9,5–13,6°	0,72		5,37	1022,68
	13,7–17,9°	1,22		6,64	768,62
	18,0–22,7°	1,38		6,56	649,26
	22,8–28,5°	1,65		5,85	442,41
	28,6–34,1°	2,32		2,66	102,36
	34,2–48,1°	2,99	1,24	24,30	
Energia rzeźby <i>Relief energy</i>	0–2	–0,26	11,75%	24,15	12268,71
	2,1–4	1,94		7,84	444,69
	4,1–6	2,65		0,40	11,03
	6,1–8	1,41		0,01	0,48
	8,1–10	–7,84		0,00	0,09
Ekspozycja <i>Aspect classes</i>	teren płaski / <i>flat</i>	–7,84	3,56%	0,00	0,63
	N	0,43		6,90	1762,31
	NE	0,24		5,80	1792,54
	E	–0,10		4,08	1764,70
	SE	–0,40		2,92	1705,85
	S	–0,19		3,51	1663,30
	SW	–0,33		2,50	1365,77
	W	–0,82		1,44	1283,52
	NW	0,40	5,24	1381,10	
Odległość od wód powierzchniowych <i>Distance from watercourses and reservoirs</i>	0–50 m	0,84	4,13%	6,38	1080,20
	50,1–100 m	0,69		5,52	1090,28
	100,1–150 m	0,13		3,39	1170,74
	150,1–200 m	–0,59		1,67	1185,61
	200,1–250 m	–0,91		1,17	1144,29
	250,1–300 m	–0,23		2,13	1055,88
	300,1–350 m	–0,57		1,40	965,65
	350,1–400 m	–0,82		0,95	845,33
	>400,1 m	–0,08	9,78	4183,28	
Użytkowanie terenu <i>Land-use classes</i>	tereny rolnicze, półnaturalne, podmokłe <i>agricultural, semi-natural areas, wetlands</i>	–0,21	2,49%	8,52	4141,42
	zabudowa miejska / <i>Urban fabric</i>	–0,47		3,13	1960,95
	tereny przemysłowe, publiczne, wojskowe i prywatne <i>industrial, commercial, public, military and private units</i>	–1,85		0,40	1003,82
	las / <i>forests</i>	0,68		19,09	3787,58
	kopalnie, wyrobiska, miejsca zabudowy <i>mineral extraction and construction sites</i>	–3,01		0,05	378,17
	infrastruktura drogowa i kolejowa <i>roads, railways and associated land</i>	–2,22		0,15	549,64
	obszary zielone / <i>green urban areas</i>	0,55		0,96	219,11
	obiekty sportowe i tereny wypoczynkowe <i>sports and leisure facilities</i>	–2,91		0,08	594,13
	zbiorniki wodne / <i>water bodies</i>	–7,84	0,00	90,18	

Tab. 1. Zestawienie współczynnika podatności na osuwanie (W_i) dla każdej klasy mapy tematycznej (cd.)
Table 1. Weighting values (W_i) of the considered causal factors classes (cont.)

Czynnik <i>Causal factor</i>	Klasa <i>Class</i>	$\ln W_i$	Wpływ warstw tematycznych na tworzenie się osuwisk <i>The impact of thematic layers on landslide formation</i>	Powierzchnia osuwisk <i>The area of landslides</i> [ha]	Powierzchnia klasy <i>The area of class</i> [ha]
Grunty na głębokości 1 m p.p.t. <i>Sediment types at a depth of 1 m b.g.l.</i>	nasypy / embankments	0,02	4,46%	2,10	800,97
	gleby / soils	0,46		0,36	87,33
	torfy, mursze i namuły <i>peats, moorsh, organic mud</i>	-0,77		0,34	231,68
	piaski pyłowate / silty sands	-0,18		2,18	1016,15
	piaski / sands	-0,86		0,20	183,75
	pyły i iły / silts and clays	0,14		1,05	356,74
	pyły, gytie i kreda jeziorna <i>silts, gyttjas and lake marl</i>	-7,85		0,00	39,39
	glina zwałowa / till	-0,15		8,56	3717,74
	piaski i żwiry / sand and gravel	0,04		17,61	6218,18
Grunty na głębokości 4 m p.p.t. <i>Sediment types at a depth of 4 m b.g.l.</i>	nasypy / embankments	-7,85	2,58%	0,00	111,81
	gleby / soils	-7,85		0,00	4,37
	torfy, mursze i namuły <i>peats, moorsh, organic mud</i>	-0,20		0,33	155,85
	piaski pyłowate / silty sands	0,62		1,82	383,68
	piaski / sands	-0,85		0,27	243,65
	pyły i iły / silts and clays	-0,57		0,65	447,62
	pyły, gytie i kreda jeziorna <i>silts, gyttjas and lake marl</i>	-7,85		0,00	22,59
	glina zwałowa / till	0,06		13,00	4765,39
	piaski i żwiry / sand and gravel	-0,02		16,33	6516,99
Głębokość pierwszego zwierciadła wód podziemnych <i>The level of the groundwater table</i>	0-0,5	-0,62	3,61%	0,99	717,81
	0,6-1 m	-0,87		1,24	1163,52
	1,1-2 m	0,24		11,30	3482,93
	2,1-5 m	-0,21		12,62	6133,64
	5,1-10 m	0,59		4,75	1032,05
	10,1-20 m	1,14		1,50	187,55
	poniżej / below 20 m	-7,84		0,00	4,38
Indeks siły spływu (SPI) <i>Stream power index (SPI)</i>	(-14)-(-10,89)	-3,91	4,36%	0,11	2048,93
	(-10,90)-(-7,78)	0,26		6,61	1950,00
	(-7,79)-(-4,67)	-5,54		0,00	2,98
	(-4,68)-(-1,56)	-4,04		0,06	1228,45
	(-1,57)-1,56	-0,11		11,65	5073,93
	1,57-4,67	0,86		12,31	2027,52
	4,68-7,78	0,62		1,38	289,34
	7,79-10,89	0,50		0,25	58,05
	10,90-14	0,40		0,03	7,90
Topograficzny indeks wilgotności (TWI) <i>Topographic wetness index (TWI)</i>	(-7)-(-3,78)	0,06	4,96%	6,67	2461,84
	(-3,79)-(-0,56)	-4,46		0,05	1534,37
	(-0,57)-2,67	1,84		1,88	114,96
	2,68-5,89	0,56		16,93	3796,76
	5,90-9,11	-0,48		6,06	3849,18
	9,12-12,33	-1,29		0,51	728,73
	12,34-15,56	-0,44		0,26	160,55
	15,57-18,78	-1,24		0,03	37,35
18,79-22	-5,54	0,00	3,59		

powierzchnie osuwiskowe i najwyższe wartości współczynnik $\ln W_i$ powstają przy zakresach 3–9, 9–16 wskaźnika LS.

Analizując cyfrowy model wysokościowy o rozdzielczości 5×5 m, wygenerowany z danych lidarowych, stwierdzono, że największy udział mają powierzchnie o spadkach 3–10°. Osuwiska na omawianym terenie powstają jednak przy większych nachyleniach. Rozkład spadków określony jedynie dla tych fragmentów stoków, na których występowały osuwiska, jest zbliżony do rozkładu normalnego Gaussa o wartości oczekiwanej 19,5° i odchyleniu standardowym 9,5°, przy czym większość powierzchni osuwiskowych powstaje przy nachyleniach z przedziału 10–29°. W miarę wzrostu nachyleń stoków wzrastają wartości współczynnika podatności osuwiskowej.

Są to wyniki odmienne od rezultatów podobnych analiz GIS wykonanych w Karpatach, gdzie np. w Beskidzie Niskim największą podatność obserwowano na stokach o nachyleniu 9–14°, natomiast przy większych nachyleniach współczynnik $\ln W_i$ wyraźnie maleje (Długosz, 2011). Przyczyną może być odmienna budowa geologiczna, ponieważ w obszarach młodoglacjalnych mamy do czynienia z utworami nieskonsolidowanymi.

Dla stoków w przedziałach energii rzeźby od 2 do 8 m (w zadanym sąsiedztwie 5 m od każdej komórki rastrowej) współczynnik $\ln W_i$ osiąga wartości od 1,41 do 2,65. Ze względu na zajmowane powierzchnie osuwiskowe, istotne znaczenie mają przedziały energii rzeźby od 2 do 4 m. Występowanie osuwisk jest powiązane ze stokami wypukłymi i wklęsłymi, przy czym bardziej podatne na osuwanie są odcinki o profilu wklęsłym.

Istotnym czynnikiem warunkującym powstawanie ruchów masowych jest budowa geologiczna, a w szczególności zróżnicowanie litologiczne warstw. Częste jest występowanie osadów sypkich nad spoistymi. Taka budowa geologiczna sprzyja infiltracji wód opadowych i inicjowaniu powierzchni poślizgu. Korzystny dla powstawania osuwisk jest również układ odwrotny, w którym na powierzchni pojawiają się gliny zwałowe, a w spągu występują piaski i żwiry.

Na mapie gruntów na głębokości 1 m p.p.t. największe powierzchnie osuwiskowe (tab. 1) zajmują osady piaszczyste i żwirowe, współczynnik $\ln W_i$ dla tych osadów wynosi 0,04. Największą podatność na osuwanie mają gleby (0,46) i ulegające łatwo rozmyciu utwory pylaste i łyły (0,14), zajmują one jednak stosunkowo niewielką powierzchnię. Natomiast na mapie gruntów na głębokości 4 m p.p.t. podatne na osuwanie są gliny zwałowe (0,06), większe wartości $\ln W_i$ osiąga tylko dla piasków pyłowatych (0,62), które obejmują nieduże obszary.

Kolejnym czynnikiem kontrolującym ruchy masowe są warunki hydrologiczne i hydrogeologiczne. Szczególnie zagrożone są stoki w pobliżu (do 50 m) cieków i zbiorników wodnych ($\ln W_i = 0,84$). Wynika to przede wszystkim z dużej roli jaką odgrywa w ruchach masowych erozja rzeczna oraz funkcja drenażu. Istotne znaczenie dla podatności osuwiskowej mają także płytko (1–2 m) występujące wody gruntowe. Płytkie położenie zwierciadła wód gruntowych prawdopodobnie określa powierzchnie poślizgu osuwisk asekwentnych, wzdłuż których zachodzi przemieszczanie.

Na wysoczyznowym terenie Gdańska osuwiska występują przeważnie na całych długościach stoków lub w ich dolnych partiach, o ekspozycjach N, NW i NE, co należy wiązać z dominującą orientacją dolin oraz z warunkami hydrometeorologicznymi. Na stokach północnych dłużej zalega śnieg i dochodzi do zwiększonej infiltracji wód opadowych i roztopowych.

Wyższe wartości współczynnika podatności osuwiskowej osiąga dla lasów (0,68). Wysoką podatność osuwiskową terenów zalesionych należałoby jednak traktować nie jako przyczynę, ale jako skutek. Obszary zalesione *de facto* stanowią czynnik stabilizujący stoki, ponieważ rośliny zatrzymują przez intercepcję część wsiąkającej wody, a zjawiska kapilarne przeciwdziałają nasyceniu gruntu wodą. Dodatkowo głębokie korzenie przyczyniają się do odwodnienia gruntu i obniżenia ciśnienia porowego (Parriaux i in., 2010).

Większość kompleksów leśnych w Gdańsku znajduje się na terenach charakteryzujących się znacznymi deniwelacjami i dużą energią rzeźby (ryc. 2). Trwająca od setek lat zabudowa miasta związana była z antropogenicznymi wylesieniami zlewni Wisły, natomiast zróżnicowane hipsometrycznie tereny krawędzi wysoczyzny pozostawały w dużej części niezagospodarowane. W związku z tym obecnie duży odsetek osuwisk znajduje się na terenie Trójmiejskiego Parku Krajobrazowego.

WNIOSKI

Przeprowadzona analiza podatności osuwiskowej wykazała związki pomiędzy występowaniem osuwisk, a czynnikami pasywnymi: współczynnikiem LS, nachyleniem, deniwelacjami i ekspozycją stoków, indeksem TWI, indeksem SPI, litologią, odległością od cieków i zbiorników wodnych, występowaniem pierwszego poziomu wodonośnego i użytkowaniem terenu.

Wykazano, że potencjalnym obszarem występowania osuwisk jest północno-wschodnia i wschodnia część obszaru badań, a w szczególności Trójmiejski Park Krajobrazowy, strefa krawędziowa wysoczyzny morenowej oraz szereg rozcięć erozyjnych wysoczyzny morenowej Pojezierza Kaszubskiego o generalnym przebiegu SW–NE i W–E.

Największe znaczenie dla powstawania osuwisk na młodoglacjalnym terenie Gdańska mają czynniki geomorfologiczne oraz erozja powierzchniowa i splukiwanie powodujące rozluźnienie i zmianę struktury gruntu. Na podstawie wykonanych map można stwierdzić, że istnieje wyraźna korelacja pomiędzy mapą podatności a mapą współczynnika LS, mapą spadków i energii rzeźby. Te czynniki pasywne charakteryzują się najwyższymi wartościami współczynnika podatności osuwiskowej ($\ln W_i > 1$). Przeprowadzone badania wykazały zwiększoną podatność na osuwanie stoków wklęsłych o nachyleniach 10–29° i ekspozycjach N, NW i NE, zbudowanych z osadów wykazujących zróżnicowanie litologiczne oraz cechujących się obecnością przewarstwień w postaci piasków pyłowatych, pyłów i łyłów. Czynniki silnie determinującymi procesy osuwiskowe w Gdańsku są uwarunkowania hydrologiczne: płytkie zaleganie wód gruntowych (1–2 m), bliskie położenie (0–50 m) wód powierzchniowych oraz zwiększone wartości wskaźnika uwilgotnienia podłoża (TWI).

Obszary predysponowane do wystąpienia ruchów masowych są związane także z obecnością kompleksów leśnych. Ostatnia zależność ma charakter stochastyczny, nie oznacza występowania związku przyczynowo-skutkowego.

Mapa podatności osuwiskowej w skali 1: 10 000 może być użyteczna do celów planistycznych. W celu oceny możliwości predykcyjnych modelu wykonanego przy pomocy metody indeksowej w przyszłości planuje się wykonanie analizy GIS z zastosowaniem innej metody statystycznej, np. logiki rozmytej lub technik opartych na prawdopodobieństwie Bayesa, umożliwi to porównanie wyników predykcji i ocenę ich zgodności.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2013–2014 jako projekt badawczy nr 61.3506.1301.00.0. Dane LiDAR i baza BDOT zostały pozyskane bezpłatnie z Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Warszawie. Autorka dziękuje dr T. Mrozek i L. Jurysowi (PIG-PIB) za udzieloną pomoc i dyskusje oraz recenzentom – dr. hab. A. Stachowi (UAM, Poznań), drugiemu – anonimowemu, a także redaktorowi naczelnemu za cenne wskazówki, które pozwoliły na udoskonalenie pierwszej wersji artykułu. Dziękuję również panu K. Majerowi (PIG-PIB) za pomoc w wykonaniu mapy głębokości pierwszego zwierciadła wód podziemnych dla Trójmiasta.

LITERATURA

- IPCC, 2007 – Climate Change 2007: Synthesis Report Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Pachauri R.K., Reisinger A., red.). Geneva, Switzerland, 104. <http://www.ipcc.ch>
- DŁUGOSZ M. 2011 – Podatność stoków na osuwanie w polskich Karpatach Fliszowych. *Pr. Geogr.*, 230: 1–112.
- ENGELHARD F.B. 1813 – Plan von Gegend von Danzig. Carl Gall, Berlin.
- FRANKOWSKI Z. & ZACHOWICZ J. (red.) 2007 – Baza danych geologiczno-inżynierskich wraz z opracowaniem atlasu geologiczno-inżynierskiego aglomeracji trójmiejskiej Gdańsk–Sopot–Gdynia. *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB*.
- GRABOWSKI D., MARCINIEC P., MROZEK T., NESCIERUK P., RAČZKOWSKI W., WÓJCIK A. & ZIMNAL Z. 2008 – Instrukcja opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1 : 10 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- HUABIN W., GANGJUN L., WEIYA X. & GONGHUI W. 2005 – GIS-based landslide hazard assessment: an overview. *Prog. Phys. Geog.*, 29 (4): 548–567.
- JURYS L., UŚCINOWICZ G., MAŁKA A., SZARAFIN T., ZALESZKIEWICZ L., PĄCZEK U., FRYDEL J., KAWĘCKA J. & PRZEZDZIECKI P. 2013 – Identyfikacja zagrożeń wywołanych ruchami masowymi w przestrzeni zurbanizowanej na przykładzie map osuwisk Gdańska i Gdyni. *Gór. Odkryw.*, 2–3: 116–126.
- KAMIŃSKI M. 2007 – Mapa podatności osuwiskowej – studium z regionu Jodłówki (Pogórze Dynowskie). *Prz. Geol.*, 55: 779–784.
- KAMIŃSKI M. 2012 – Mapa podatności osuwiskowej w skali regionalnej – przykład z Doliny Sanu na Pogórzu Dynowskim. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 452: 109–118.
- KASPRZAK M. & TRACZYK A. 2012 – Uwarunkowania rozwoju osuwisk w środkowej części Gór Kamiennych (Sudety). *Landf. Anal.*, 20: 65–77.
- KONDRACKI J. 1998 – Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa.
- MOJSKI J.E. 1979 – Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Gdańsk (27) wraz z objaśnieniami. *Inst. Geol., Warszawa*.
- MOORE I.D. & GRAYSON R.B. 1991 – Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. *Water Resour. Res.*, 27 (6): 1171–1191.
- MROZEK T. 2013 – Zagrożenie i ryzyko osuwiskowe w rejonie Szymbarku (Beskid Niski). *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 199: 5–40.
- MROZEK T., POLI S., STERLACCHINI S. & ZABUSKI L. 2004 – Landslide susceptibility assessment. A case study from the Beskid Niski Mts., Carpathians, Poland. *Polish Geol. Inst. Sp. Papers*, 15: 13–18.
- PARRIAUX A., BONNARD C. & TACHER L. 2010 – Rutschungen: Hydrogeologie und Sanierungsmethoden durch Drainage. *Leitfaden. BUWAL*, Bern.
- PIKIES R. & ZALESZKIEWICZ L. 2013 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Gdańsk (reambulacja) wraz z objaśnieniami. *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB*.
- SARKAR S., KANUNGO D.P., PATRA A.K. & PUSHPENDRA KUMAR 2008 – GIS Based Spatial Data analysis for Landslide Susceptibility Mapping. *J. Mt. Sci.*, 5 (1): 52–62.
- SZELEWICKA A. & LIDZBARSKI M. 2006 – Baza danych GIS Mapy Hydrogeologicznej Polski, pierwszy poziom wodonośny. *Ark. Gdańsk (0027)*. *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB*.
- URBAN ATLAS–PL006L–Gdańsk 2010 – European Environment Agency (EEA). Copenhagen. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-atlas>.
- URBAŃSKI J. 2008 – GIS w badaniach przyrodniczych. Wyd. UG, Gdańsk. http://ocean.ug.edu.pl/~oceju/CentrumGIS/dane/GIS_w_badaniach_przyrodniczych_12_2.pdf
- VAN WESTEN C.J., RANWERS N., TERLIN M.T.J. & SOETERS R. 1997 – Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geol. Rundsch.*, 86: 404–414.
- VAN WESTEN C.J., SEJMONSBERGEN A., C. & MONTAVANI F. 1999 – Comparing Landslide Hazard Maps. *Natural Hazards*, 20: 137–158.
- VAN WESTEN C.J., VAN ASCH T.W.J. & SOETERS R. 2006 – Landslide hazard and risk zonation – why is it still so difficult? *Bull. Eng. Geol. Env.*, 60: 167–184.
- WOJCIECHOWSKI T. 2009 – Geologiczna analiza osuwisk z wykorzystaniem satelitarnej interferometrii radarowej na przykładzie rejonu Nowego Sącza (rozprawa doktorska). Biblioteka WNoZ. UŚ. Sosnowiec.
- WILSON J.P. & GALLANT J.C. 2000 – Terrain analysis: Principles and applications. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- WISCHMEIER W.C. & SMITH D.D. 1978 – Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook*. 537. US Dept. Agric., Washington, DC.
- ŻYSZKOWSKA W., SPALLEK W. & BOROWICZ D. 2012 – Kartografia tematyczna. PWN, Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 12.06.2014 r.

Akceptowano do druku 16.02.2015 r.