

dr inż. Grzegorz Oleniacz¹⁾

ORCID: 0000-0003-3318-0928

dr inż. Wanda Kokoszka¹⁾

ORCID: 0000-0003-0486-9881

mgr inż. Dominik Ożóg¹⁾

ORCID: 0000-0002-5213-9667

dr inż. arch. Anna Sikora, prof. PRz¹⁾

ORCID: 0000-0002-3646-6924

dr hab. inż. Marta Słowik, prof. PL²⁾

ORCID: 0000-0001-9627-3625

dr hab. inż. Natalia Przesmycka, prof. PL²⁾

ORCID: 0000-0002-1755-2448

dr inż. Wojciech Gosk³⁾ ORCID: 0000-0001-5376-4686

DOI: 10.15199/33.2023.12.10

Streszczenie. W środowisku geologicznym podłoża budowlanego i otaczającego go terenu mogą występować: ruchy osuwiskowe; osiadanie zapadowe w utworach lessowych; deformacje powierzchni związane z eksploatacją surowców; erozja powierzchniowa i deformacje filtracyjne; zjawiska krasowe; zmienność parametrów geotechnicznych związana z dociążeniem lub odciążeniem podłoża, ze zmianami wilgotności; temperatury oraz obecnością zanieczyszczeń; reakcja gruntów ekspansywnych (skurcz i pęcznienie); zmiany położenia zwierciadła wód podziemnych; powódzie oraz podtopienia. Duże znaczenie w planowaniu przestrzennym miast i gmin mają mapy obszarów predysponowanych do występowania tego rodzaju zjawisk i opracowana na ich podstawie ocena przydatności terenu pod zabudowę. W artykule przedstawiono mapowanie przydatności inwestycyjnej terenu na bazie metody Van Westena. Opisano sposób pozyskiwania danych wejściowych z wykorzystaniem aktualnych baz systemowych (SOPO, ISOK), map geologicznych i hydrogeologicznych oraz lokalnej wiedzy eksperckiej. Opracowano finalną mapę przydatności dotyczącą Rzeszowa.

Słowa kluczowe: geośrodowisko; indeksowa metoda statystyczna; mapa przydatności do zabudowy; Rzeszów.

Gospodarowanie przestrzenią powinno odbywać się z uwzględnieniem ładu przestrzennego oraz zrównoważonego rozwoju. Geośrodowiskowa ocena przydatności terenu do celów budowlanych wymaga opracowania zarówno metod monitorowania, jak i mapowania przestrzeni przez pryzmat planowania przestrzennego i racjonalnego gospodarowania gruntami. Zgodnie z propagowaną w Unii Europejskiej ideą stałego monitorowania przestrzeni wskazane byłoby opracowanie miar „użytkowania gruntów zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju” oraz wskaźników i metod wspomagających jakoś podejmowanych decyzji planistycznych. Wskaźniki zrównoważonego rozwoju zaproponowane zostały przez Komisję Europejską

¹⁾ Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury

²⁾ Politechnika Lubelska, Wydział Budownictwa i Architektury

³⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku

* Adres do korespondencji: sikora@prze.edu.pl

Geośrodowiskowa ocena przydatności terenu do celów budowlanych

Geoenvironmental assessment of site suitability for construction purposes

Abstract. Among the changes that may occur in the geological environment of the built environment and the surrounding area are: landslide movements, subsidence in loess formations, deformation of the surface associated with the exploitation of raw materials, surface erosion and filtration deformation, karst phenomena, variability of geotechnical parameters associated with the loading or unloading of the subsoil, with changes in humidity, temperature, the presence of contaminants, the reaction of expansive soils (shrinkage and swelling), changes in the location of the groundwater table and its chemistry, floods and flooding. Of great importance in the spatial planning of cities and municipalities are maps of areas predisposed to the occurrence of such phenomena and the assessment of the suitability of land for development developed on their basis. The article presents a methodology for mapping the investment suitability of land based on the Van Westen method. The method of obtaining input data based on current system databases (SOPO, ISOK), geological, hydrogeological maps, local expertise is described. The final suitability map for the selected area of Rzeszów – was developed.

Keywords: geoenvironment; index statistical method; buildability map; Rzeszów.

w odniesieniu do już istniejących uwarunkowań. Biorąc pod uwagę, że wskaźniki te mogą służyć monitorowaniu procesów zagospodarowania przestrzennego, powinny być przede wszystkim wykorzystywane przy ocenie przydatności terenu do celów budowlanych i racjonalnym gospodarowaniu gruntami. Zasadne byłoby więc odpowiednie opisanie zakresu uwarunkowań planu ogólnego gminy i miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego oraz promowanie wskaźników i metod oceny geośrodowiskowej jako dobrej praktyki planistycznej przy ocenie przydatności terenu do celów budowlanych, która byłaby cyklicznie ulepszana i uaktualniana.

Ważnym narzędziem do wykonania analizy oraz jakościowego mapowania przydatności terenów jest gromadzenie i przetwarzanie danych przestrzennych w bazach danych (platforma ArcGIS). Z badań przeprowadzonych w [1] wynika, że program ArcGIS jest użytecznym narzędziem do mapowania przydatności/użytkowania terenów oraz wykonywania

analiz jakościowych projektów miejskich, rolniczych, górniczych i wszystkich projektów związanych z użytkowaniem gruntów [2, 3]. Analizy GIS wykorzystano również do oceny przydatności do użytkowania gruntów z przeznaczeniem na siedliska zwierząt i uprawy wybranych gatunków roślin [4], a także do analiz geograficznych oraz oceny i planowania krajobrazu [5]. Ponadto GIS może być stosowany w prywatnym i publicznym planowaniu nieruchomości [6].

Celem analizy przydatności terenu jest określenie lokalizacji w obrębie obszaru planowania, która najlepiej nadaje się do określonego użytkowania terenu, np. na cele mieszkaniowe, rolnictwo, górnictwo, parki narodowe itp. [7]. Analiza może być wykorzystana do opracowania planów zagospodarowania przestrzennego i kształtowania ładu przestrzennego [8] oraz przez ekspertów z różnych dziedzin w zależności od zamierzonego celu przeznaczenia danego terenu. Dla rolnika oznaczałoby to przydatność ziemi pod uprawę, hodowlę zwierząt i pastwiska, a dla urbanisty pod budowę domów itp. Zamierzony cel, który formułuje ekspert, polega wg [9] na rozróżnieniu problemu wyboru miejsca i problemu wyszukiwania. Problem z wyszukiwaniem przydatności obszaru pojawia się, gdy nie ma z góry określonego obszaru do analizy przydatności. Zgodnie z zaleceniami zawartymi w [10], analiza przydatności dzieli obszar badań na podstawowe jednostki obserwacji, takie jak np. wielokąty. Zdaniem innych badaczy, analiza wyszukiwania w witrynie określa również cechy przestrzenne witryny, w tym jej kształt i ciągłość [11, 12]. Planowanie związane z przydatnością terenu na cele budowlane bazuje więc na analizie przestrzennej z wykorzystaniem GIS.

Analiza przydatności terenu do zabudowy

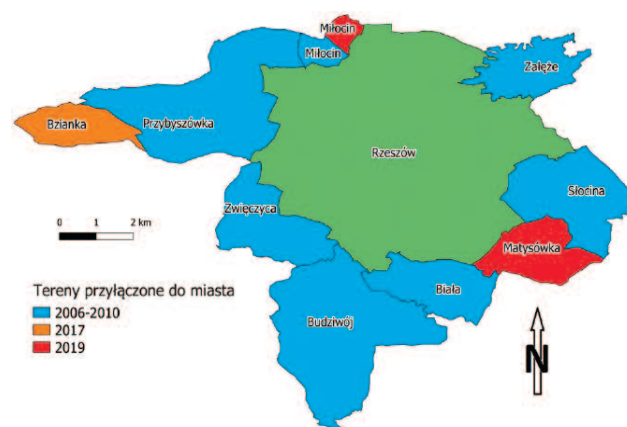
Geośrodowiskowa ocena przydatności terenu wymaga zastosowania technologii geoprzestrzennych za pośrednictwem systemu informacji geograficznej (GIS), który zapewni możliwość analizowania, interpretowania oraz modelowania przydatności gruntów na cele budowlane. W modelowaniu tym wszystkie czynniki środowiskowe będą ważone na podstawie poziomu ich wpływu przy użyciu oceny wielokryterialnej do stworzenia mapy przydatności gruntów. Mapowanie terenów na cele budowlane jest zatem niezbędne, aby zlokalizować i ocenić, które obszary są bardzo lub mało odpowiednie. Mapowanie przydatności gruntów za pomocą GIS zapewnia klasyfikację obszarów w strefach/kategoriach, z których każda ma inne prawdopodobieństwo przydatności inwestycyjnej. Takie mapy mają zasadnicze znaczenie podczas planowania przestrzennego ukierunkowanego na tereny miejskie.

Celem badania było opracowanie mapy przydatności przy użyciu podejścia Multi-Criteria Evaluation (MCE) oraz GIS z wykorzystaniem metody Van Westena, aby określić możliwości rozwoju przestrzennego gminy Rzeszów.

Zastosowana metoda

Bazową analizę przestrzenną gminy Rzeszów przeprowadzono za pomocą oprogramowania ArcGIS v.10.2. Obszar badań położony jest na Podkarpaciu, w południowo-wschodniej części Polski. Cechą charakterystyczną Rzeszowa – stolicy

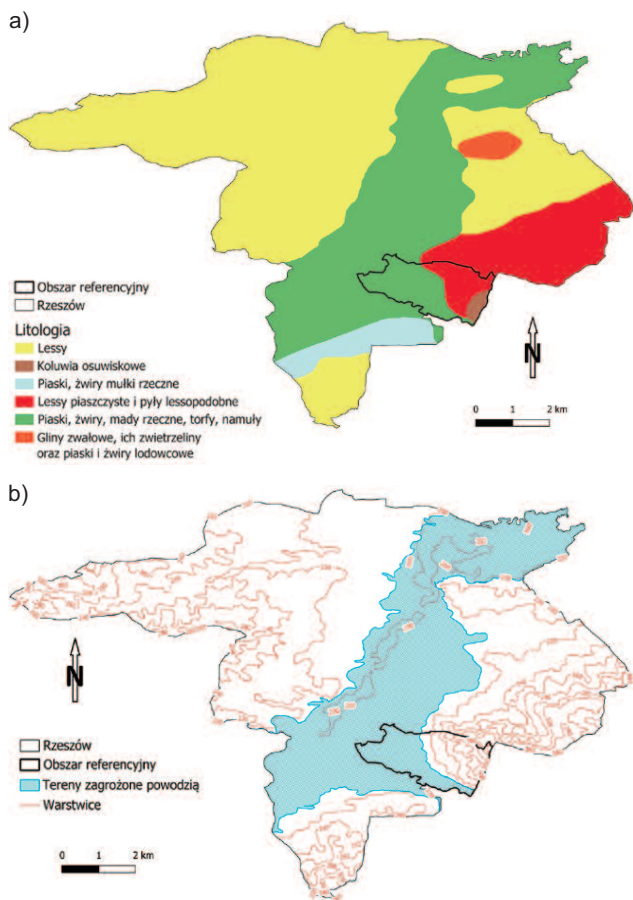
województwa podkarpackiego jest od początku XX w. rozszerzanie jego granic, a w efekcie powiększanie terenów możliwych do zabudowania [13]. Intensywne rozszerzanie granic Rzeszowa rozpoczęło się w 2006 r. i od tego czasu, niemal corocznie, powierzchnia miasta powiększa się o obszary o charakterze wiejskim (rysunek 1). Obecnie trwa deweloperska urbanizacja, czyli działanie w granicach administracyjnych miasta nakierowane na maksymalizację zysku przy minimalizacji poniesionych kosztów. Decyzje planistyczne są wynikiem presji inwestorów zarówno fizycznych, jak i prawnych. Efektem takiej interpretacji celów rozwojowych miasta jest program nakierowany na działalność inwestycyjną za wszelką cenę z pominięciem uwarunkowań przyrodniczych, w tym geotechnicznych. Tak skonstruowany program rozwoju jednostki osadniczej obarczony jest wieloma błędami, generując potencjalne problemy w racjonalnym zarządzaniu przestrzenią w realiach gospodarki rynkowej [14].



Rys. 1. Mapa przyłączonych terenów – rozszerzanie granic Rzeszowa

Fig. 1. Map of annexed areas – expansion of Rzeszow's borders

Teren aglomeracji rzeszowskiej ma charakter pagórkowato-równinny. Znajduje się w obrębie południowego skraju dużej jednostki geologicznej, tzw. Zapadliska Przedkarpackiego. Starsze podłoże Zapadliska Przedkarpackiego wypełniają osady morskie miocenu wykształcone w postaci ilów pylastych i ilułupków frakcji krakowieckiej. Bezpośrednio na stropie miocenu zalegają osady akumulacji rzecznej wykształcone początkowo przez serię piaszczysto-żwirową, a następnie mady rzeczne reprezentowane przez różnego typu gliny i pyły oraz grunty wodno-zastoiskowe złożone z namulów organiczno-gliniastych. Miąższość pakietu osadów czwartorzędowych jest zróżnicowana w zależności od ich lokalizacji i wynosi 16 – 18 m. Na tym bowiem poziomie zaznacza się strop trzeciorzędowych ilów krakowieckich. Pod względem litologicznym jest to więc obszar bardzo zróżnicowany. Bezpośrednio z cyfrowego modelu wysokościowego obliczono takie atrybuty topograficzne, jak nachylenie i ekspozycja. W analizach wykorzystano metodę Van Westena [15], dlatego w pierwszym etapie badań zebrano i poddano selekcji mapy tematyczne trzech czynników – pasywnych: budowa geologiczna; nachylenie terenu oraz aktywnych: tereny zalewowe.



Rys. 2. Przykładowe mapy dla wybranych czynników pasywnych: a) budowa geologiczna; b) tereny zalewowe
 Fig. 2. Example maps for selected passive factors: a) lithology; b) flood risk area

Atrybuty topograficzne (w tym przypadku nachylenie terenu) obliczone bezpośrednio z cyfrowego modelu wysokościowego przedstawiają zmienne ciągłe, dlatego dokonano ich konwersji do postaci interwałowej (kategoryzowanej). Mapa geologiczna została opracowana na podstawie reinterpretacji wcześniejszych map geologicznych tego rejonu oraz szczegółowej Mapy Geologicznej Polski. Przedstawiono na niej główne kompleksy tworzące flisz karpacki, z wyodrębnieniem jednostek litostratygraficznych. Na podstawie tej mapy zostały ustalone warstwy tematyczne dotyczące budowy geologicznej. Agregację danych cyfrowych przeprowadzono również w przypadku pokrycia terenu.

Dane pozyskane podczas prac terenowych oraz trzech map wizualizujących czynniki środowiskowo-geologiczne posłużyły do wykonania mapy przydatności terenu na cele budowlane w skali 1 : 10000 za pomocą indeksowej metody statystycznej WoE (Weights of Evidence) – Van Westena, z wykorzystaniem wzoru (1):

$$W_i = \ln \left(\frac{\text{Dens clas}}{\text{Dens map}} \right) = \ln \left(\frac{N_{pix}(S_i)}{\sum N_{pix}(S_i)} \cdot \frac{\sum N_{pix}(N_j)}{N_{pix}(N_j)} \right) \quad (1)$$

gdzie:

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

Dens clas – gęstość osuwiskowa w danej klasie mapy tematycznej;

Dens map – gęstość osuwiskowa objęta mapą;

$N_{pix}(S_i)$ – liczba komórek rastra z osuwiskami w obrębie danej klasy mapy tematycznej;

$N_{pix}(N_j)$ – liczba komórek rastra w danej klasie mapy tematycznej.

Metoda WoE jest logarytmiczno-liniową wersją ogólnej teorii Bayesa [7]. 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 obszaru całej mapy. Na podstawie zlogarytmowanych wielkości oblicza się tzw. wskaźniki asocjacji W^+ oraz W^- , czyli *Weights of Evidence*. Wielkość wag jest miarą zależności pomiędzy terenem nieprzydatnym do zabudowy (osuwiskiem) a każdą klasą zmiennych przyjętych do predykcji (czynników pasywnych). Wartość dodatnia logarytmu W_i wskazuje na klasę sprzyjającą powstawaniu osuwisk, a ujemna świadczy o warunkach niesprzyjających (tabela).

Obliczenia metodą Van Westena w odniesieniu do czynników przyjętych dla wybranego obszaru

Van Wasten method calculations for the adopted factors for the selected area

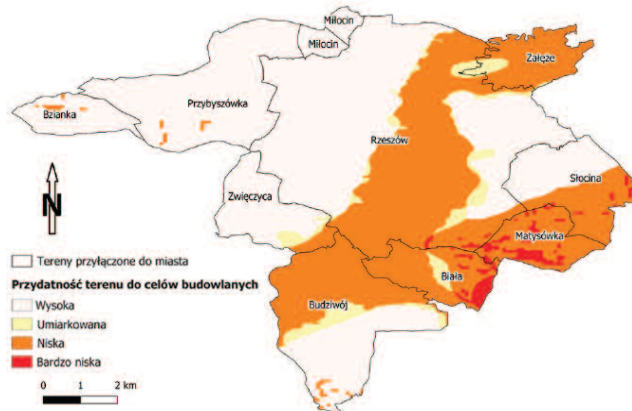
Cecha	Rzeszów [C]	Biała [A]	Śródmieście [B]	Biała + Śródmieście		Biała	
				ratio [A+B/C]	Wi	ratio [A/C]	Wi
Powierzchnia	126602946	6058617	5815111	0,094	0,048		
Obszar zalewowy	38722683	3121478	2621104	0,148	0,458	0,081	0,521
Geologia: piaski, żwiry, mady rzeczne...	38291160	3528018	2647709	0,161	0,542	0,092	0,655
Geologia: lessy piaszczyste i pyły lessopodobne	13786526	2059739	0	0,149	0,466	0,149	1,138
Geologia: lessy	68468657	0,1	3167402	0,046	-0,707	0,000	-17,305
Geologia: koluwia osuwiskowe	470860	470860	0	1,000	2,367	1,000	3,040
Nachylenie 8°	2280911	375545	0	0,165	0,563	0,165	1,236

W pierwotnych badaniach Van Westen zastosował wzór (1) do analiz związanych z oceną podatności terenu na osuwanie. Autorzy tego artykułu adaptowali metodę do wielokryterialnej, geosrodowiskowej oceny przydatności terenu na cele budowlane. Współczynniki podatności (wagi W_i) wyznaczone względem terenu referencyjnego uznano za najmniej predysponowany do celów budowlanych, przy czym uwzględniono wiele wymienionych w tabeli czynników pasywnych i aktywnych. W pierwszym etapie analiz rozpatrzono dwa warianty obliczeń. Wariant pierwszy, w którym jako obszar referencyjny przyjęto dzielnicę Biała i Śródmieście, oraz wariant drugi obejmujący dzielnicę Biała. Obszar tej dzielnicy charakteryzuje się

w szczególności niekorzystnym ukształtowaniem terenu, dużym stopniem osuwiskowości, a także wysokim poziomem wód gruntowych i zagrożeniem powodziowym. Z kolei Śródmieście wyróżnia się gruntami o słabszej nośności i podwyższonym ryzykiem występowania powodzi. Wzór (1) zastosowano do wyznaczenia wag W_i poszczególnych cech w odniesieniu do gęstości ich występowania wyrażonej w pikselach mapy. Zasięg występowania danej cechy w obrębie poszczególnych uwzględnianych obszarów zamieszczony jest w tabeli w kolumnach A, B i C. Natomiast kolejne kolumny tabeli zawierają wartości wyznaczonych wag.

Po zsumowaniu obliczonych indeksów dotyczących wszystkich czynników biernych otrzymano mapę przydatności terenu na cele budowlane w gminie Rzeszów (rysunek 3), przy czym przedziały interwałowe dobrano, analizując histogram przedstawiający gęstość wartości indeksów [16].

Pomimo przyjęcia do analiz różnych obszarów referencyjnych oraz otrzymanych różnych wartości wag, wygenerowane na ich podstawie mapy przydatności terenu do celów budowlanych były zbieżne, a zasięgi obszarowe w poszczególnych klasach pokrywały się. Z tego powodu mapę przydatności terenów do celów budowlanych (rysunek 3) ograniczono się do przypadku obszaru referencyjnego Biała.



Rys. 3. Mapa przydatności terenów do celów budowlanych
Fig. 3. Map of land suitability for construction purposes

Podsumowanie

Optymalne i zrównoważone planowanie przestrzenne jest najważniejsze w racjonalnej gospodarce gruntami. Ocena przydatności terenu jest jednym z podstawowych wyzwań stojących przed decydentami i użytkownikami gruntów. Wyniki przeprowadzonego badania pokazały, że analiza GIS i opracowanie mapy przydatności do celów budowlanych mogą być wykorzystane do opracowania planu zagospodarowania przestrzennego.

Przedstawione studium przypadku pokazuje, że metody bazujące na GIS można stosować w planowaniu przestrzennym obszarów miejskich. Zidentyfikowano obszary o dużej i umiarkowanej przydatności do celów budowlanych w gminie Rzeszów. Wyniki oceny przydatności gruntów do zabudowy w obecnym badaniu wykazały, że 75% całkowitej powierzch-

ni obecnie zagospodarowanych terenów znajdowało się w obszarze sklasyfikowanym jako bardzo przydatny. Analizę można zmodyfikować i ulepszyć w przypadku, gdy zastosuje się ją w połączeniu z innymi metodami, np. AHP Saaty. Wynikiem badania jest proces identyfikacji przydatności terenu do konkretnych celów, np. poprawy planowania przestrzennego obszarów miejskich.

Literatura

- [1] Joerin F, Theriault M, Musy A. Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. *Geographical Information Science*. 2001, DOI: 10.1080/13658810051030487.
- [2] Brail RK, Klosterman RE. *Planning Support Systems*, ESRI Press, Redlands, CA; 2001.
- [3] Collins MG, Steiner FR, Rushman MJ. Land-use suitability analysis in the United States: historical development and promising technological achievements. *Environmental Management*. 2001, DOI: 10.1007/s002670010247.
- [4] Store R, Kangas J. Integrating spatial multi-criteria evaluation and expert knowledge for GIS-based habitat suitability modelling. *Landscape and Urban Planning*. 2001, DOI: 10.1016/S0169-2046(01)00120-7.
- [5] Kalogirou S. Expert systems and GIS: an application of land suitability evaluation. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2002, DOI: 10.1016/S0198-9715(01)00031-X.
- [6] Eastman JR. *Idrisi for Windows, Version 2.0: Tutorial Exercises*, Graduate School of Geography. Clark University, Worcester, MA; 1997.
- [7] Kaiser EJ, Godschalk DR, Esnard AM. *Hypothetical city workbook: exercises, spreadsheets, and GIS data to accompany Urban land use planning*. University of Illinois Press; 1998.
- [8] Steiner F, McSherry L, Cohen J. Land suitability analysis for the upper Gila River watershed. *Landscape and Urban Planning*. 2000; DOI: 10.1016/S0169-2046(00)00093-1
- [9] Cova TJ, Church RL. Exploratory spatial optimization and site search: neighborhood operator approach. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2000, DOI: 10.1016/S0198-9715(00)00015-6.
- [10] Malczewski J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*. 2000, DOI: 10.1016/j.progress.2003.09.002
- [11] Aerts J. *Spatial decision support for resource allocation: integration of optimization, uncertainty analysis and visualization techniques*. PhD Thesis. Faculty of Science, University of Amsterdam, 2002.
- [12] Xiao N, Bennett DA, Armstrong MP. Using evolutionary algorithms to generate alternatives for multiobjective site-search problems. *Environment and Planning A*. 2002, DOI: 10.1068/a34109.
- [13] Henning W. Rzeszowski alfabet miejsc często już zapomnianych i osób z nimi związanych. Podkarpacki Instytut Książki i Marketingu. Rzeszów, 2012.
- [14] Szymtke R, Krzysztofik R. The processes of incorporation and secession of urban and suburban municipalities: The case of Poland. *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography*. 2019, 73, 1-18. DOI: 10.1080/00291951.2019.1604567.
- [15] Van Westen CJ, Ranwers N, Terlin MTJ, Soeters R. Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau*. 1997, 86: 404-14.
- [16] Wojciechowski T, Borkowski A, Perski Z, Wójcik A. Dane lotniczego skaningu laserowego w badaniu osuwisk – przykład osuwiska w Zbyszycach (Karpaty zewnętrzne). *Przegląd Geologiczny*. 2012, 60: 95 – 102.

Badania przeprowadzono w ramach zadania zleconego pn. „Politechniczna Sieć VIA CARPATIA im. Prezydenta RP Lecha Kaczyńskiego” finansowanego z dotacji celowej Ministra Edukacji i Nauki nr umowy MEiN/2022/DPI/2578 działanie „ISKRA – budowanie międzyuczelnianych zespołów badawczych”.

Przyjęto do druku: 16.11.2023 r.