

Globalnie i lokalnie ważona kombinacja liniowa jako podejście metodyczne do oceny georóżnorodności geoparków

Globally and locally weighted linear combination as a methodological approach to geodiversity assessment of geoparks

Zbigniew Zwoliński ¹, Alicja Najwer ¹, Piotr Jankowski ^{1,2}

¹ Instytut Geookologii i Geoinformacji, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań

² Departament Geografii, Uniwersytet Stanowy w San Diego, San Diego, USA

Zarys treści: Artykuł przedstawia analizę porównawczą metody przestrzennej analizy wielokryterialnej w dwóch technikach do oceny georóżnorodności wybranych parków narodowych reprezentujących zróżnicowane typy krajobrazu Polski: obszar górski, wyżynny i nizinny. Pierwsza technika dotyczy globalnie ważonej kombinacji liniowej (G-WLC), natomiast druga – lokalnie ważonej kombinacji liniowej (L-WLC). Oceny georóżnorodności zlewni elementarnych wykonano w oparciu o siedem komponentów środowiska geograficznego wybranych parków narodowych. Do analizy porównawczej uzyskanych wyników ocen georóżnorodności obydwoma technikami wykorzystano indyktor georóżnorodności. W artykule wykazano, że technika globalnie ważonej kombinacji liniowej (G-WLC) jest bardziej czuła na georóżnorodność obszarów jednorodnych środowiskowo, np. wyżynnych i nizinnych, natomiast technika lokalnie ważonej kombinacji liniowej (L-WLC) powinna być przeznaczona do badania obszarów heterogenicznych, bardzo zróżnicowanych, szczególnie hipsometrycznie, np. do obszarów górskich.

Słowa kluczowe: ocena georóżnorodności, przestrzenna analiza wielokryterialna, globalnie ważona kombinacja liniowa, lokalnie ważona kombinacja liniowa, indyktor georóżnorodności, park narodowy, Polska

Abstract: The paper presents a comparative analysis of the method of spatial multicriteria analysis (S-MCA) with two techniques for the assessment of geodiversity of selected national parks representing various types of Polish landscape: mountain, upland and lowland areas. The first technique concerns the Globally Weighted Linear Combination (G-WLC), while the second one – the Locally Weighted Linear Combination (L-WLC). The geodiversity assessment of elementary catchments was performed with seven components of the geographical environment of selected national parks. The geodiversity indicator was used for a comparative analysis of the obtained results of geodiversity assessments by both techniques. The paper shows that the globally weighted linear combination (G-WLC) technique is more sensitive to the geodiversity of environmentally homogeneous areas, e.g. uplands and lowlands, while the locally weighted linear combination (L-WLC) technique is more suitable in terms of assessment accuracy for the study of heterogeneous, highly diversified areas, especially hipsometrically, e.g. mountainous areas.

Key words: geodiversity assessment, Spatial Multiple Criteria Analysis, Globally Weighted Linear Combination, Locally Weighted Linear Combination, geodiversity indicator, national park, Poland

Wprowadzenie

Pomimo że termin georóżnorodność został zaproponowany w latach 90. ubiegłego wieku, to nadal zauważalny jest brak ustalonych ram metodologicznych i metodycznych oceny georóżnorodności (Gray 2013, Najwer i Zwoliński 2014, Brilha 2016, Najwer i in. 2016, Zwoliński i in. 2018). W tym okresie za-

proponowano różne metody oceny georóżnorodności. Można je podzielić na podstawie źródeł danych na bezpośrednie i pośrednie (Pellitero i in. 2014), a w oparciu o procedury oceny na – jakościowe, ilościowe i jakościowo-ilościowe (Zwoliński i in. 2018). Te metody oceny georóżnorodności zostały przetestowane dla różnych typów krajobrazów, w tym gór (Zwoliński 2009, Zwoliński, Stachowiak 2012, Kori

i in. 2019, Perotti i in. 2019, Jankowski i in. 2020), wyżyn (Pellitero i in. 2011, Manosso i in. 2021), nizin (Kot 2015, Najwer i in. 2016), krajobrazów polarnych (Hjort, Luoto 2010, 2012, Hjort i in. 2012), wysp (Koh i in. 2014, Nunes 2014, Kuleta 2017, Seijmonsbergen i in. 2017), a nawet obszarów dna morskiego (Kasela, Kotilainen 2017, Zelewska i in. 2018). Jednak pomimo tej imponującej liczby prób metodycznych dla specyficznych obszarów, zauważalny jest brak badań porównawczych, testujących skuteczność metod oceny georóżnorodności różnych typów krajobrazu.

Wśród wyżej wymienionych metod oceny georóżnorodności, podejście jakościowo-ilościowe, zogniskowane na przestrzennej analizie wielokryterialnej (S-MCA, Malczewski, Rinner 2015, Malczewski, Jankowski 2020), zasługuje na uwagę dzięki połączeniu oceny z analizą. Jedną z ostatnio zaproponowanych metod wykorzystania S-MCA do oceny georóżnorodności terenu górskiego przedstawili Jankowski i in. (2020). Autorzy wykorzystali S-MCA do obliczenia wartości georóżnorodności dla jednostek przestrzennych w Karkonoskim Parku Narodowym.

Innym, niezwykle ważnym problemem i często pomijanym aspektem oceny georóżnorodności jest walidacja uzyskanych ocen. Weryfikacja mapy georóżnorodności jest bardzo trudna i wymaga zarówno dużej wiedzy eksperckiej na temat badanego obszaru, jak i doświadczenia z techniką oceny. W przypadku georóżnorodności brak jest standardowego modelu, do którego można by odnieść uzyskane wyniki, jak i ocenić skuteczność wybranej metody ewaluacji. Na tym etapie rozwoju metodologicznego jedynym dostępnym podejściem do walidacji ocen jest weryfikacja uzyskanej mapy georóżnorodności podczas wizji terenowej oraz w oparciu o wiedzę ekspercką.

Podjęcie tematu oceny georóżnorodności i jej walidacji wiąże się bezpośrednio z rozwojem idei geoparków w Polsce. Do tej pory na terenie naszego kraju był jeden geopark wchodzący do sieci UNESCO Global Geopraks, a mianowicie Łuk Mużakowa, który ma charakter międzynarodowy polsko-niemiecki. W kwietniu 2021 roku UNESCO ustanowiło na terenie Polski kolejny Geopark Świątokrzyski, a aspirującym do światowej sieci jest Geopark Kraina Wygasłych Wulkanów. Oprócz tego jest ok 30 propozycji utworzenia geoparków w randze europejskiej i krajowej w różnych krajobrazach Polski. Między innymi wiele parków narodowych w Polsce jest doskonałą podstawą do ustanawiania geoparków. To powoduje pilną potrzebę stworzenia instrumentów i ustanowienia procedur oceniających i porównujących część abiotyczną proponowanych geoparków o różnej randze.

Zaprezentowane w artykule badanie rozszerza podejście do oceny georóżnorodności przedstawione przez Jankowskiego i in. (2020) poprzez systematyczną ocenę skuteczności technik ważonej kombinacji

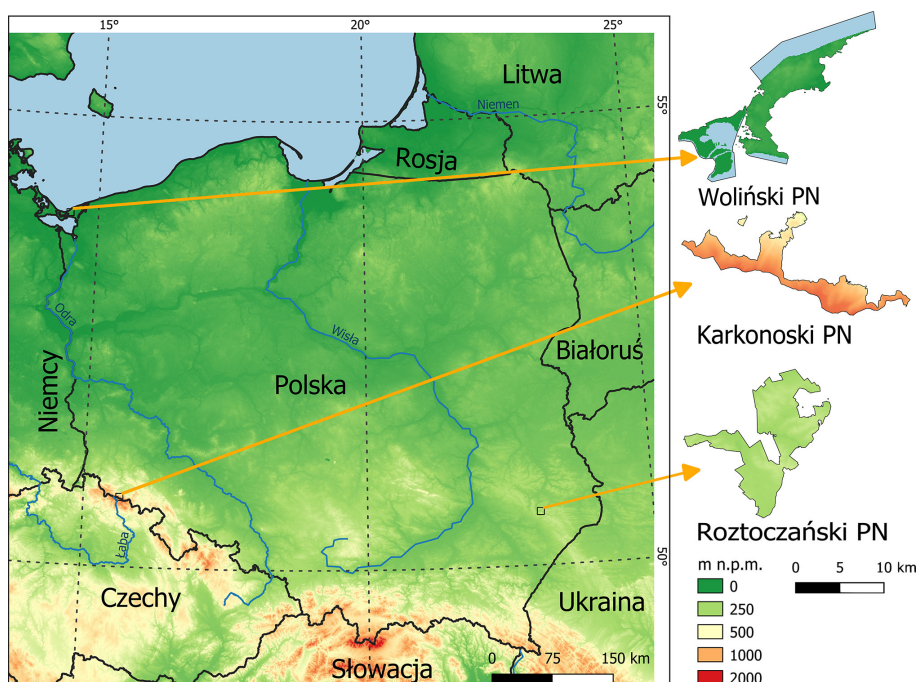
liniowej (WLC) i lokalnie ważonej kombinacji liniowej (L-WLC) w różnych typach krajobrazu. Szczegółowe cele artykułu to: 1) przeprowadzenie oceny georóżnorodności dla zróżnicowanych morfogenetycznie typów krajobrazów, w tym gór, obszarów wyżynnych i nizinnych, 2) porównanie wyników ocen zwizualizowanych na mapach georóżnorodności wyliczonych na podstawie analiz WLC i L-WLC oraz 3) walidacja wizualna i indykatorem georóżnorodności skuteczności dwóch technik S-MCA dla każdego z trzech typów krajobrazu. Zamiarem autorów jest zaproponowanie metodyki, być może standardu, w ocenie georóżnorodności dla geoparków, parków narodowych i krajobrazowych oraz innych obszarów chronionych.

Obszar badań

Badany obszar obejmuje wybrane parki narodowe w Polsce w trzech typach krajobrazu: nizinnym, wyżynnym i górskim. Do badań wybrano trzy parki narodowe: Karkonoski Park Narodowy (KPN), Roztoczański Park Narodowy (RPN) i Woliński Park Narodowy (WPN) (ryc. 1). Parki są zróżnicowane pod względem komponentów środowiska, zwłaszcza morfogenezy i litologii, parametrów geomorfometrycznych oraz pokrycia terenu i użytkowania ziemi (tab. 1).

Karkonoski Park Narodowy (KPN) reprezentuje krajobraz górski (ryc. 1). Park zajmuje powierzchnię 59,5 km² i obejmuje północne stoki Karkonoszy, będące najwyższym i największym pasmem Sudetów. Grzbiet główny jest na wysokości ok. 1400 m n.p.m., zaś najwyższy szczyt Śnieżka ma wysokość 1603,2 m n.p.m. (Maciuk i in. 2021). Rdzeń budowy geologicznej Karkonoszy jest karbońską intruzją granitową, należąca do bloku karkonosko-izerskiego, w której zidentyfikowano 230 minerałów (Knapik, Migoń 2011). Wychodnie skał i stosunkowo łatwy dostęp do różnych stanowisk mineralogicznych, w połączeniu z odsłonięciami granitów i skał metamorficznych, pozwalających na wgląd w naturę procesów magmowych i deformacji skał w erze paleozoicznej, stały się przyczyną utworzenia parku narodowego. Karkonosze wyróżniają się wyjątkową rzeźbą powierzchni ziemi. Wynika to z dużego zróżnicowania ukształtowania terenu i ich wyrazistości w krajobrazie pasma górskiego (Knapik i in. 2011). Kluczowymi elementami geodziejstwa na tym obszarze są elementy takie jak: powierzchnie zrównania, kotły polodowcowe, granitowe skałki o różnorodnych kształtach oraz wodospady i torfowiska.

Roztoczański Park Narodowy (RPN) położony jest w zachodniej części Roztocza Tomaszowskiego i zajmuje powierzchnię 84,8 km² (ryc. 1). RPN chroni



Ryc. 1. Lokalizacja wybranych parków narodowych na tle cyfrowego modelu wysokościowego Polski (DEM z projektu ISOK, Geoportal 2020)

Fig. 1. Location of selected national parks on the background of digital elevation model of Poland (DEM from ISOK project, Geoportal 2020)

najcenniejsze przyrodniczo obszary środkowej części pasma Roztocza w dolinie górnego Wieprza. Krajobraz parku jest bardzo zróżnicowany a ukształtowanie terenu jest ściśle związane z budową geologiczną.

Pasma wzgórz, położone w północnej i środkowej części parku, zbudowane są z górnokredowych skał kredowych, gazów i margli, natomiast nieco niższe pagórki na południowym krańcu parku tworzą mio-

Tabela 1. Charakterystyka fizyczno-geograficzna wybranych parków narodowych

Table 1. Physical-geographical characteristics of selected national parks

Parametr	Jednostka	Karkonoski PN	Roztoczański PN	Woliński PN
Morfogeneza	[-]	Wulkaniczno-tektoniczna	Tektoniczno-denudacyjna	Glacialno-abrazyjna
Dominująca litologia	[-]	Granity i liczne odmiany skał metamorficznych	Skały węglanowe i węglanowo-krzemionkowe; piaski aluwialne i eoliczne, lessy	Osady poglacialne: gliny morenowe, piaski fluwioglacialne, piaski eoliczne
Powierzchnia	km ²	59,5	84,8	109,4*
Obwód	km	103,8	97,6	118,2
Wysokość minimalna	m n.p.m.	345	223	0,0
Wysokość średnia	m n.p.m.	1062	270	19,7
Wysokość maksymalna	m n.p.m.	1603	367	115,9
Spadek średni	°	16,4	5,7	3,2
Wskaźnik urzeźbienia	[-]	0,57	0,33	0,17
Topograficzny indeks wilgotności – średni	[-]	1,60	2,90	6,30
Powierzchnie sztuczne	%	0,2	0,2	0,2
Obszary rolnicze	%	0,4	2,1	1,4
Lasy i obszary półnaturalne	%	99,1	97,2	44,2
Mokradła	%	0,2	0,0	12,0
Obiekty wodne	%	0,0	0,5	42,2

* Liczba ta obejmuje część lądową i wodną WPN; część lądowa zajmuje 63,8 km².

ceńskie wapienie rafowe i detrytusowe (Harasimiuk 1995). Osady powierzchniowe tworzą miększe pokrywy lessowe. Pod względem geomorfologicznym RPN wyróżnia się zróżnicowaną rzeźbą terenu (Brzezińska-Wójcik i in. 2016). Podstawowa formacja terenu składa się z dwóch poziomów płaskowyżów, które nacinają górnokredowe skały zróżnicowane litologicznie. Wyższy płaskowyż znajduje się na wysokości 330–350 m n.p.m., natomiast dolny płaskowyż – 310–330 m n.p.m. (Maciejewski 2010). Ponad tymi poziomami wznoszą się ostańce, a najwyższym punktem parku jest Góra Dach (367 m n.p.m.). Deniwelacje terenu miejscami przekraczają 100 m. Charakterystyczne formy ukształtowania terenu to: głęboko wcięte doliny, ostańce, strome zbocza z licznymi wąwozami i debrzami, rozcięcia erozyjne w pokrywie lessowej, wydmy, zagłębienia bezodpływowe i koryta rzek.

Woliński Park Narodowy (WPN) o powierzchni 109,4 km² położony jest w strefie nadmorskiej Bałtyku. WPN chroni najcenniejszą północno-zachodnią część wyspy Wolin, położoną między Zalewem Szczecińskim a Morzem Bałtyckim. Przez obszar parku przebiega zasięg fazy gardzieńskiej zlodowacenia Wisły. Bezpośrednio na powierzchni skał mezozoicznych (Alexandrowicz 1967) zalegają osady czwartorzędowe, tj. szare i brązowe gliny morenowe, piaski i żwiry wodnolodowcowe, piaski eoliczne (Borówka i in. 1986). Zróżnicowane postglacialne i holocenne ukształtowanie terenu, klifowe wybrzeże Morza Bałtyckiego oraz Zalew Szczeciński tworzą unikalny krajobraz, niepowtarzalny w innych miejscach Polski. Dominującym elementem obszaru młodoglacjalnego jest wał spiętrzony moreny czołowej, dochodzący do wysokości 115 m n.p.m. (Góra Grzywacz). Aktywna abrazja powodująca cofanie korony klifu (najwyższy punkt to 91 m n.p.m.) oraz procesy akumulacyjne u podnóża klifu tworzą brzeg morski. Wieloletnie tempo recesji klifu to ok. 0,24 m a⁻¹ i zależy od warunków litologicznych, meteorologicznych i hydrologicznych (Kostrzewski i in. 2015). Mimo intensywnej abrazji, klify wyspy Wolin o długości 15 km tworzą najpiękniejszą część wybrzeża Bałtyku i są głównym abiotycznym elementem ochrony przyrody na terenie WPN. Delta Wsteczna Świny z archipelagiem licznych małych, płaskich i nisko położonych wysepek tworzy niepowtarzalny i indywidualny krajobraz parku. Z uwagi na fakt, że ponad 42% obszaru stanowią wody Bałtyku, Jeziora Wicko i Zalewu Szczecińskiego postanowiono ograniczyć ocenę georóżnorodności tego parku do części lądowej, zajmującej 63,8 km².

Wybrane parki narodowe cechują się wysoką bioróżnorodnością, szczególnie w zakresie roślinności leśnej. Cechą wyróżniającą KPN i RPN jest dominujący udział powierzchni leśnych (dla KPN: świerk i buk; dla RPN: jodła i buk; dla WPN: buk i dąb), natomiast dla WPN wody powierzchniowe Bałtyku

i Zalewu Szczecińskiego, które zajmują ponad 42% powierzchni parku. Duże odsetki obszarów leśnych w parkach mogą świadczyć o tym, że w okresie holocenu ukształtowanie terenu nie uległo dużym modyfikacjom, a dzięki temu formy powierzchni terenu mogą być dobrze zachowane. We wszystkich trzech parkach struktura pokrycia terenu i użytkowania ziemi odbiega od średnich wartości dla całego kraju, gdzie obszary leśne zajmują 30,5%, zbiorniki wodne 2,1%, a tereny rolne 59,9% powierzchni.

Analiza geoinformacyjna oceny georóżnorodności

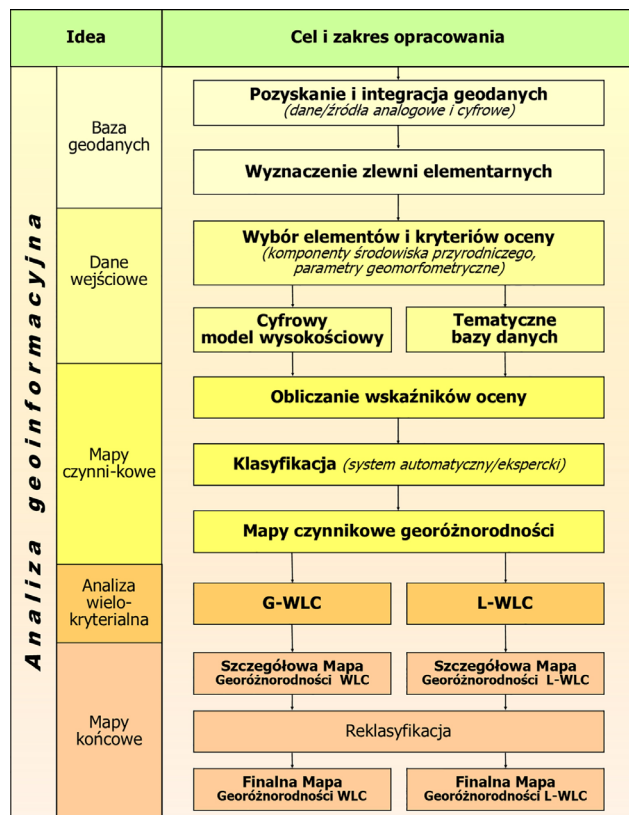
Dane

Wejściowe zbiory danych obejmują: cyfrowy model wysokości (DEM) o rozdzielczości 1 × 1 m z projektu ISOK (Geoportal 2020), warstwy map tematycznych: litologicznej, geomorfologicznej, hydrograficznej i glebowej oraz mapy pokrycia terenu i użytkowania ziemi z bazy CORINE Land Cover (GIOŚ 2021). Większość warstw tematycznych uzyskano z pracowni naukowych parków narodowych. Warstwy litologiczne dla parków wzbogacono o dane pochodzące ze Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski (PIG – PIB 1977–2011). Informacje geomorfologiczne uzupełniono danymi z Cyfrowej Mapy Geomorfologicznej Polski (Buraczyński i in. 2013, Karczewski, Zwoliński 2013, Migoń i in. 2013, Rączkowska, Zwoliński 2015). Pozyskane dane geoprzestrzenne zostały zintegrowane i przetransformowane do układu współrzędnych ETRS89/Polska CS92 (EPSG 2180).

Procedura

Procedura analizy georóżnorodności trzech parków narodowych w Polsce przebiegała według schematu analitycznego zaproponowanego przez Najwer i Zwolińskiego (2014) oraz Zwolińskiego i in. (2018). Schemat ten składa się z pięciu kolejnych zadań (ryc. 2):

1. opracowanie geobazy ze zbiorami danych wejściowych oraz wyznaczenie analitycznych jednostek przestrzennych oceny, tj. zlewni elementarnych,
2. w oparciu o utworzoną geobazę wskazanie komponentów przyrodniczych (czynników georóżnorodności) oraz kryteriów ich oceny,
3. standaryzacja komponentów przyrodniczych i obliczenie wskaźników oceny georóżnorodności na podstawie cyfrowego modelu wysokościowego oraz map tematycznych,
4. obliczenie wag i opracowanie map georóżnorodności w wyniku przestrzennej analizy wielokryterialnej, przy użyciu technik globalnie i lokalnie ważonej kombinacji liniowej, oraz



Ryc. 2. Etapy przetwarzania danych w ocenie georóżnorodności

Fig. 2. Workflow of the geodiversity assessment

5. ujednoczenie poprzez reklasyfikację do 5 klas georóżnorodności uzyskanych map dwoma technikami agregacji i ich analiza porównawcza.

W niniejszym artykule podjęto próbę odejścia od dotychczas stosowanego obliczania wartości georóżnorodności w polach oceny równych komórkom map rastrowych (m.in. Zwoliński 2008, Zwoliński, Stachowiak 2012, Najwer i in. 2016). Nie skorzystano również z możliwości oceny georóżnorodności na podstawie pola kwadratu o zadany boku (np. Serrano, Ruiz-Flaño 2007, Manosso i in. 2021 i wiele innych opracowań). W zamian za obszar obliczeniowy przyjęto zlewnię rzeczną, która w opinii Kostrzewskiego (1993) jest najlepszą jednostką przestrzenną do wszelkich ilościowych obliczeń bilansowych. Obszary zlewni to jednostki o zazwyczaj dobrze zdefiniowanych granicach, cyklach energii i materii oraz podobnych cechach środowiskowych. Cohen i in. (2008), badając zależności między różnymi elementami środowiskowymi w zlewni rzecznej stwierdzili, że rozwiązania oparte na komórkach mapy rastrowej wprowadzają zbyt wiele szumu informacyjnego, aby można było przeprowadzić zadowalającą analizę jakościową i ilościową. Według tych autorów, uśrednianie wartości wejściowych oraz proste filtrowanie rastra wyjściowego za pomocą średniej ruchomej nie poprawia znacząco poziomu szumu. Dopiero uśred-

nienie danych wyjściowych w skali zlewni cząstkowych pozwoliło na wyłonienie się wyraźnych struktur rozkładu przestrzennego badanych parametrów. Zatem, jak zauważyli Cohen i in. (2008) wykorzystanie zlewni jako przestrzennej jednostki obliczeniowej może być pomocne w wykrywaniu powiązań przestrzennych między komponentami środowiska takimi jak: geologia, morfologia, właściwości gleby itp.

Wykorzystując podejście geosystemowe do jednostki przestrzennej według Kostrzewskiego (1993) oraz obliczenia na uśrednionych danych wyjściowych cyfrowego modelu wysokościowego za Cohenem i in. (2008) wytyczono zlewnie elementarne pierwszego rzędu dla obszarów analizowanych parków narodowych i wykorzystano je jako jednostki przestrzenne do oceny georóżnorodności. Aplikacja r.watershed zaimplementowana w GRASS GIS v7 (Grass GIS 2021) została użyta do zdefiniowania obszarów zlewni pierwszego rzędu. W obrębie KPN wytyczono 212 zlewni, dla RPN – 403 zlewnie i dla WPN – 289 zlewni. Wykorzystanie zlewni elementarnych pierwszego rzędu zamiast komórek siatki map rastrowych lub dowolnych wielokątów jest zatem nowością w ocenie georóżnorodności, czego nie odnotowano w dotychczasowej literaturze światowej.

Metody

Podejście do oceny georóżnorodności w niniejszym opracowaniu opiera się na metodzie jakościowo-ilościowej zapoczątkowanej przez Najwer i Zwolińskiego (2014) i rozwiniętej przez Zwolińskiego i in. (2018). Dane geobazy posłużyły do opracowania siedmiu map czynnikowych do oceny georóżnorodności:

1. litologii skał i osadów,
2. energii rzeźby (reprezentowana przez wysokość względną),
3. rzeźby terenu (geomorfologicznej),
4. pokrycia terenu i użytkowania ziemi (jako wskaźnik antropopresji na powierzchnię Ziemi),
5. gleb,
6. całkowitego nasłonecznienia jako elementu mezo-klimatycznego (w $WH\ m^{-2}$),
7. topograficznego wskaźnika wilgotności (TWI) jako elementu hydrograficznego.

Przygotowana geobaza zawiera dane ciągłe i dyskretne. Mapy czynnikowe 1, 3, 4 i 5 ilustrują dane dyskretne i podlegają klasyfikacji eksperckiej na 5 klas georóżnorodności. Mapy 2, 6 i 7 reprezentują dane ciągłe obliczone na podstawie cyfrowego modelu wysokościowego. Mapy te zostały automatycznie przeklasyfikowane do 5 klas metodą naturalnej przerwy (*Natural Breaks*) zaproponowanej przez Jenksa (1967).

Do oceny georóżnorodności parków narodowych w oparciu o siedem map czynnikowych wykorzystano skalę Likerta (1932), przypisując automatycznie lub ekspercko poszczególnym komponentom abiotycz-

nym georóżnorodności oceny w klasach od 1 do 5. Następnie wartości map czynnikowych znormalizowano do skali 0,0–1,0 i średnią ważoną wartość komórek rastrowych przypadających na dany poligon przypisano do całej zlewni (Jankowski i in. 2020). W kolejnym kroku obliczono wagi dla poszczególnych map czynnikowych w układzie zlewniowym przy wykorzystaniu kalkulatora AHP (Goepel 2018). Wagi dla map czynnikowych oparto na decyzjach eksperckich i były takie same dla każdego z trzech parków.

Końcowe mapy georóżnorodności zostały obliczone za pomocą dwóch technik S-MCE: szerzej znanej ważonej kombinacji liniowej (WLC), którą dla różnienia z drugą techniką nazwano globalnie ważoną kombinacją liniową (G-WLC) i jej rozszerzeniem lokalnie ważoną kombinacją liniową (L-WLC). Obydwie techniki zostały opisane przez Malczewskiego (2011) i Malczewskiego i Jaroszewicz (2018).

Globalnie ważona kombinacja liniowa (G-WLC) jest jedną z najczęściej stosowanych reguł decyzyjnych w przestrzennej analizie wielokryterialnej (Tomlin 1990, Malczewski, Rinner 2015). G-WLC można zoperacjonalizować w dowolnym oprogramowaniu GIS z funkcjami nakładania.

Lokalnie ważona kombinacja liniowa (L-WLC) rozszerza technikę G-WLC poprzez uwzględnienie przestrzennej, lokalnej zmienności danych wejściowych w określonym sąsiedztwie i powiązanie lokalnej zmienności ze zmiennością globalną na badanym obszarze. L-WLC opiera się na dwóch rodzajach wag w celu obliczenia wyniku oceny dla każdej jednostki przestrzennej: przestrzennie zmiennych wag lokalnych i przestrzennie niezmiennych wag globalnych (ten sam rodzaj wag, jak stosowany w G-WLC). Obliczanie wag lokalnych opiera się na zasadzie wrażliwości przedziałowej, zgodnie z którą czynnikiem charakteryzującym się większym zakresem wartości należy nadać większą wagę niż czynnikom o mniejszych zakresach wartości. Wagi lokalne L-WLC różnią się w zależności od zróżnicowania wartości czynników w obrębie danego sąsiedztwa lokalnego, podczas gdy w G-WLC wagi globalne są stałe dla całego badanego obszaru. Istotnym krokiem w zastosowaniu L-WLC jest wybór odpowiedniej wielkości sąsiedztwa do obliczenia lokalnych zakresów wartości, a tym samym lokalnych wag.

W niniejszym opracowaniu do implementacji G-WLC i L-WLC została wykorzystana aplikacja o otwartym kodzie MCDA4ArcMap (Voss 2021). W obu technikach każdy czynnik georóżnorodności był traktowany jako czynnik korzyści (tj. wartość oceny czynnika jest maksymalizowana) i znormalizowany za pomocą formuły normalizacji maksymalnego wyniku (Malczewski, Rinner 2015). W celu uniknięcia sąsiedztw jednorodnych dających zasięgi lokalne o zerowej wartości (tj. sąsiedztw charakteryzujących się brakiem zmienności wartości czyn-

ników), wybrano opcję automatycznej definicji sąsiedztwa w aplikacji MCDM4ArcMap. Wagi lokalne i globalne obliczono w formie tabeli i połączono z tabelami atrybutów poligonów zlewni dla każdego parku narodowego. Obliczone wartości wykorzystano do stworzenia map rastrowych, obrazujących finalne mapy georóżnorodności.

Ostatnim zadaniem po analizie wielokryterialnej była analiza porównawcza pomiędzy mapami georóżnorodności parków uzyskanymi dwoma technikami. Składała się ona z dwóch kolejnych etapów przeprowadzonych dla każdego obszaru chronionego z osobna. W pierwszym etapie przydatność dwóch technik MCE (G-WLC i L-WLC) została przeanalizowana przez ekspertów ds. georóżnorodności dla każdego typu krajobrazu. Ocena obejmowała określenie, w każdym parku narodowym, szeregu ważnych punktów orientacyjnych, które charakteryzują się wysokim/bardzo wysokim lub niskim/bardzo niskim poziomem georóżnorodności. Ustalenie oparto na gruntownej wiedzy ekspertów na temat lokalnych krajobrazów parkowych. Mapy georóżnorodności (jedna uzyskana za pomocą G-WLC, a druga za pomocą L-WLC) zostały następnie ocenione pod kątem tego, na ile dobrze odzwierciedlają wiedzę ekspertów na temat wyżej wymienionych miejsc. W rezultacie określono skuteczność obu technik MCE dla każdego z trzech parków narodowych. Drugi etap polegał na porównaniu map z wykorzystaniem indykatora georóżnorodności. Dokonano tego poprzez porównanie liczbowe i poparto oceną wizualną.

Wzór obliczania indykatora georóżnorodności ma następująca postać:

$$Gd\text{-ratio} = (Gd_{vl} + Gd_l) / (Gd_h + Gd_{vh}) \quad (1)$$

gdzie:

- $Gd\text{-ratio}$ – indykator georóżnorodności,
- Gd_{vl} – powierzchnia klasy o bardzo niskiej georóżnorodności,
- Gd_l – powierzchnia klasy o niskiej georóżnorodności,
- Gd_h – powierzchnia klasy o wysokiej georóżnorodności,
- Gd_{vh} – powierzchnia klasy o bardzo wysokiej georóżnorodności.

Uwaga: powierzchnia zajmowana przez kolejne klasy georóżnorodności może być wyrażona albo w jednostkach powierzchni (np. m², ha, km²) albo w procentach zajmowanej powierzchni przez klasy albo w liczbie komórek o wartościach odpowiadającym poszczególnym klasom georóżnorodności.

Wartości indykatora georóżnorodności $Gd\text{-ratio}$ są zawsze wartościami dodatnimi i mogą mieścić się w następujących przedziałach:

- 0–1: oznaczając obszary o bogatej georóżnorodności,

- 1–2: oznaczając obszary o przeciętnej georóżnorodności,
- powyżej 2: oznaczając obszary o przeważającej ubogiej georóżnorodności, a im większa wartość indikatora tym uboższa georóżnorodność.

Wyniki

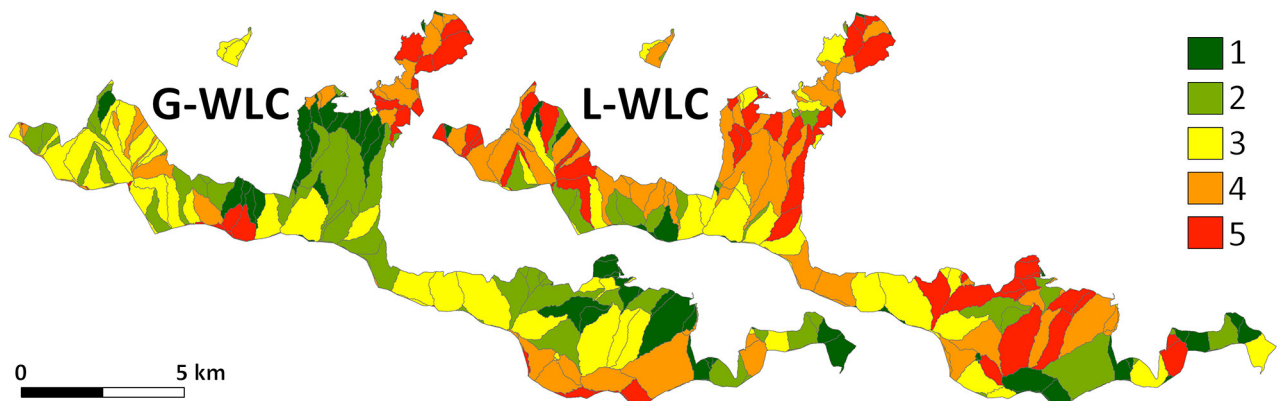
Mapy georóżnorodności wybranych parków narodowych obliczone technikami G-WLC i L-WLC przedstawiono na rycinach 3–5, a udziały powierzchni poszczególnych klas georóżnorodności zamieszczono w tabeli 2. Z kolei na rycinie 6 zestawiono porównawczo procentowe udziały pięciu klas georóżnorodności badanych obszarów chronionych. Otrzymane mapy z jednej strony przedstawiają odrębne rozkłady klas georóżnorodności, szczególnie w przypadku KPN, a z drugiej strony wskazują na niektóre interesujące miejsca na obszarze parków. To powoduje, że podjęcie decyzji która z technik lepiej odzwierciedla rzeczywistą georóżnorodność analizowanych parków jest niezwykle trudna.

W Karkonoskim Parku Narodowym zarówno w technice G-WLC jak i L-WLC za najbardziej georóżnorodny obszar należy uznać okolice środkowej części parku w strefie Wielki Szyszak/Przełęcz Karkonoska – Góra Chojnik, która rozdziela Grzbiet Śląski, a tym samym cały park na część wschodnią i zachodnią (ryc. 3). Szczególnie okolice Góry Chojnik odznaczają się najwyższymi wartościami georóżnorodności (klasy 4 i 5). Obliczenia techniką G-WLC ukazują dominującą powierzchniowo klasę niskiej i średniej georóżnorodności (łącznie około 59% powierzchni parku, tab. 2). Wytlumaczeniem tej sytuacji może być stosunkowo wyrównana powierzchnia grzbietu Karkonoszy oraz łagodnie opadające północne stoki Karkonoszy w stronę Ko-

tliny Jeleniogórskiej. Poza tym park charakteryzuje się na całym obszarze krajobrazem górskim, reprezentowanym przez wcięte doliny rzeczne i kotliny śródgórskie. W rezultacie wszystkie obszary zlewni w obrębie parku są podobne topograficznie i geomorfologicznie. Nawet Śnieżne Kotły, będące *de facto* wyraźnymi cyrkami polodowcowymi oraz masyw Śnieżki w przypadku globalnie ważonej kombinacji liniowej nie podniosły wartości georóżnorodności. Natomiast zwraca uwagę kilkanaście odosobnionych zlewni klasy wysokiej georóżnorodności rozrzuconych po różnych częściach parku.

Z kolei mapa KPN wykonana techniką L-WLC przedstawia zdecydowanie odmienny obraz klas georóżnorodności. Dominują klasy średniej, wysokiej i bardzo wysokiej georóżnorodności, zajmujące łącznie blisko 80% powierzchni parku (tab. 2). Być może jest to uzasadnione obliczeniami lokalnych sąsiedztw w obrębie poszczególnych zlewni, rozróżniających dolinę cieków oraz grzbiety wododziałowe. Do obszarów klasy 4 i 5 można zaliczyć, od zachodu, m.in.: Mumławski Stok, Szrenica i Kocioł Szrenicki, zlewnia Wrzosówki, Góra Chojnik, północne stoki Smogorni, zlewnia Płasawy, dolina Złotego Potoku oraz Dolina Bystrzyka, zachodnie stoki Skalnego Stołu. Natomiast bardzo niską i niską georóżnorodnością charakteryzują się tak wyróżniające miejsca jak np.: Łabski Szczyt, Śnieżne Kotły, Równia pod Śnieżką oraz północne stoki Śnieżki, Czarny Grzbiet, Kopa, wschodnie stoki Skalnego Stołu, zachodnie stoki Czoła.

Dla Rostoczańskiego Parku Narodowego różnice między mapami georóżnorodności są mniejsze aniżeli w przypadku Karkonoskiego Parku Narodowego. Zwraca uwagę północna część parku, która na obydwóch mapach wykazuje duże podobieństwa rozmieszczenia klas georóżnorodności, choć należy odnotować częste wymiany klas pomiędzy wysoką a bardzo wysoką wartością (ryc. 4). Jednak w przy-



Ryc. 3. Mapa georóżnorodności Karkonoskiego Parku Narodowego obliczona techniką G-WLC i L-WLC
Klasy georóżnorodności: 1 – bardzo niska, 2 – niska, 3 – średnia, 4 – wysoka, 5 – bardzo wysoka

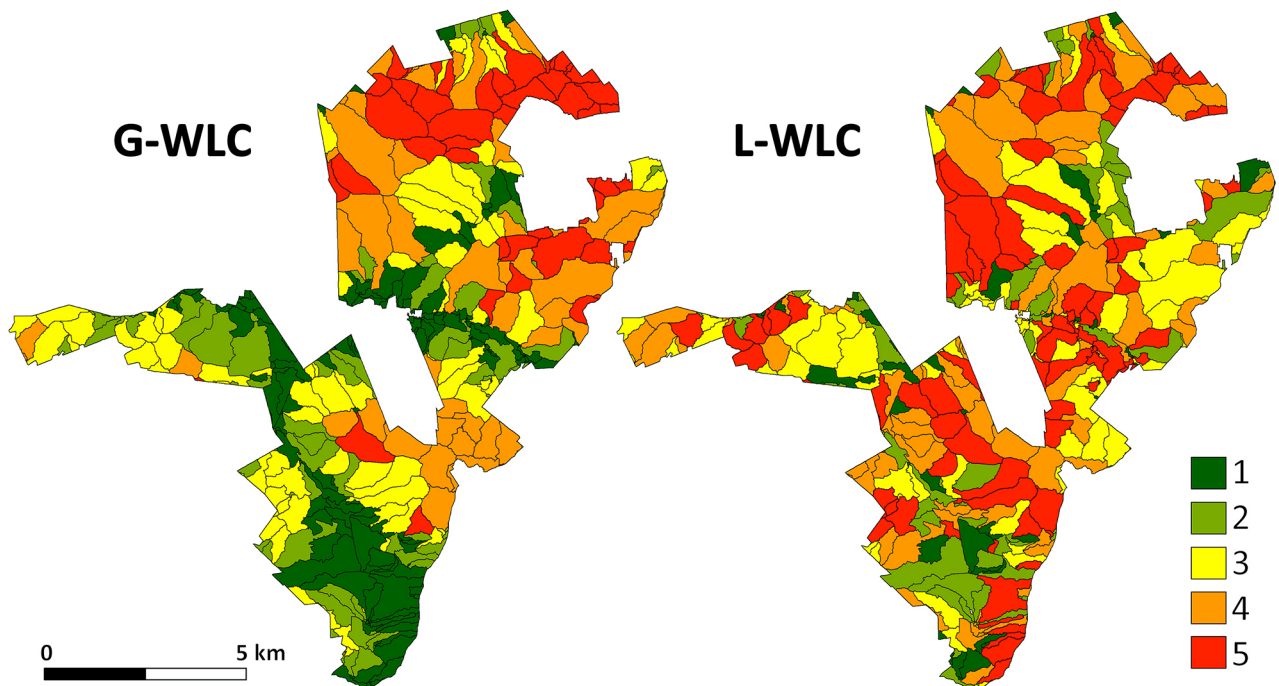
Fig. 3. Geodiversity map of the Karkonosze National Park calculated with the G-WLC and L-WLC techniques
Geodiversity classes: 1 – very low, 2 – low, 3 – medium, 4 – high, 5 – very high

Tabela 2. Udział powierzchni [km²] klas georóżnorodności w wybranych parkach narodowychTable 2. Share of area [km²] of geodiversity classes in selected national parks

Mapa georóżnorodności	1 – bardzo niska	2 – niska	3 – średnia	4 – wysoka	5 – bardzo wysoka
Karkonoski Park Narodowy (KPN)					
G-WLC	10,1	16,2	18,8	10,0	4,4
L-WLC	4,1	8,1	13,0	18,8	15,5
Roztoczański Park Narodowy (RPN)					
G-WLC	16,1	13,3	20,1	21,2	14,1
L-WLC	4,7	10,9	19,1	23,9	26,2
Woliński Park Narodowy (WPN)					
G-WLC	13,2	0,9	13,5	21,6	14,6
L-WLC	1,3	6,8	20,6	23,0	12,1

padku RPN wydaje się za uzasadnione przypisanie mapie wykonanej techniką G-WLC lepszego odzwierciedlenia zróżnicowania geologicznego i geomorfologicznego parku. Dzieje się tak za sprawą wyraźnego zróżnicowania środowiska parku w części północnej i południowej, rozdzielonych doliną Wieprza. Pierwsza z nich jest bardziej urozmaicona litologicznie i morfologicznie, mająca wyraźne założenia strukturalne, powierzchnie płaskowyżowe i typ rzeźby erozyjno-denuwacyjnej, która jest reprezentowana przez liczne wąwozy, debrza, padoly itp., m.in. w lesach. Obszary te charakteryzują się bardzo wysoką wartością georóżnorodności i obejmują głównie niższy poziom płaskowyżu wraz z Górą Kozią, północno-zachodnią część górnego płaskowyżu z Kamienną Górą, obszaru z ostańcami takimi jak Stokowa Góra

(326,5 m n.p.m.) na południe od wsi Kosobudy oraz tereny w pobliżu góry Grele (345,4 m n.p.m.). Natomiast część południowa parku, cechująca się niższymi klasami georóżnorodności jest głównie związana z obszerną Doliną Zwierzyniecką, odwadnianą małym potokiem Świerzcza z terasą zalewową wypełnianą aluwiami i torfami oraz licznymi stawami, lokalnie z polami wydmowymi oraz częściowo odwadnianą doliną górnego Wieprza, od Guciowa do Obroc. Dno doliny Wieprza na obydwu mapach charakteryzuje się bardzo małą i niską georóżnorodnością. To zróżnicowanie środowiskowe nie jest tak wyraźnie widoczne na mapie wykonanej techniką lokalnie ważonej kombinacji liniowej L-WLC. Różnica między klasami na obydwu mapach sprowadza się do zwiększenia powierzchni klasy najwyższej na mapie



Ryc. 4. Mapa georóżnorodności Roztoczańskiego Parku Narodowego obliczona techniką G-WLC i L-WLC
Klasy georóżnorodności: 1 – bardzo niska, 2 – niska, 3 – średnia, 4 – wysoka, 5 – bardzo wysoka

Fig. 4. Geodiversity map of Roztocze National Park calculated with the G-WLC and L-WLC techniques
Geodiversity classes: 1 – very low, 2 – low, 3 – medium, 4 – high, 5 – very high

L-WLC kosztem klasy najniższej przy mniej więcej podobnych powierzchniach klas pośrednich, tj. niskiej, średniej i wysokiej (tab. 2).

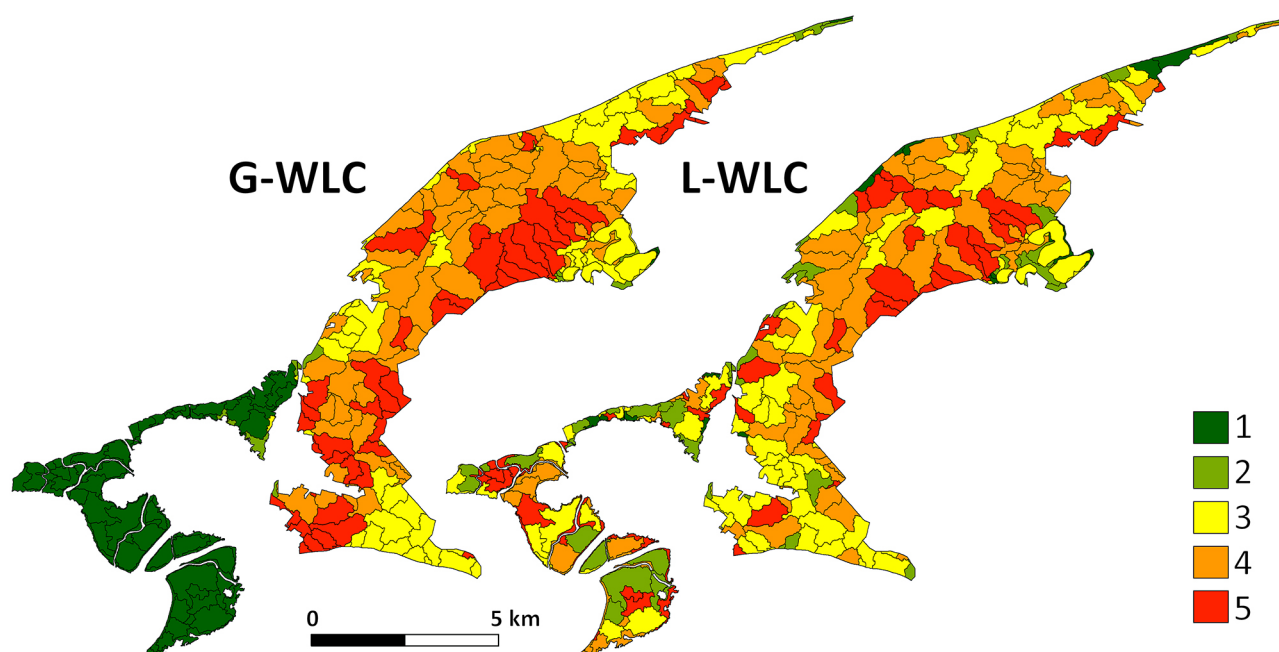
Mapy georóżnorodności Wolińskiego Parku Narodowego wykazują duże podobieństwo, szczególnie w naprzemiennym występowaniu trzech najwyższych klas georóżnorodności (ryc. 5). Łącznie klasy te zajmują 78% powierzchni na mapie G-WLC i 87% na mapie L-WLC (tab. 2). Zasadnicza różnica między tymi mapami polega na różnych ocenach dla Mierzei Bramy Świny oraz Deltę Wstecznej Świny. Są to obszary charakteryzujące się glebami hydrogenicznymi oraz refulacyjnymi i w przypadku techniki G-WLC zostały właściwie przypisane do klasy o bardzo niskiej georóżnorodności. Stanowią one łącznie ok. 20% powierzchni parku (tab. 2). Niska klasa georóżnorodności na mapie G-WLC obejmuje zaledwie 1,4% badanego obszaru (tab. 2) i są to niewielkie zlewnie położone w pobliżu jeziora Wicko Małe na zachodzie oraz jeziora Warnowo Zachodnie i Domysławskie na południowym wschodzie. Natomiast w przypadku mapy L-WLC przypisanie wyższych klas niż bardzo niskiej georóżnorodności, której praktycznie brak, wydaje się być całkowicie nieuzasadnione, tym bardziej że na płaskich powierzchniach mierzei i delty wstecznej występują najwyższe klasy georóżnorodności, tj. bardzo wysokiej i wysokiej. Warto natomiast podkreślić, że obydwie techniki obliczania map bardzo dobrze oddają urozmaiconą rzeźbę i złożoną budowę geologiczną Wolińskiej Moreny Człotwej, której zostały przypisane w większości zlewni

elementarnych klasy bardzo wysokiej i wysokiej georóżnorodności (ponad 50% powierzchni parku).

Na mapie L-WLC niespodziewanie została przypisana lokalnie klasa bardzo niskiej georóżnorodności dla strefy wybrzeża Bałtyku, gdzie występują najwyższe klify w Polsce, zbudowane z glin morenowych i mające bardzo strome ściany. Warto przypomnieć w tym miejscu, że podobną sytuację odnotowano w przypadku Śnieżnych Kotłów w Karkonoskim Parku Narodowym, które również cechują się przez prawie pionowe, bardzo strome stoki.

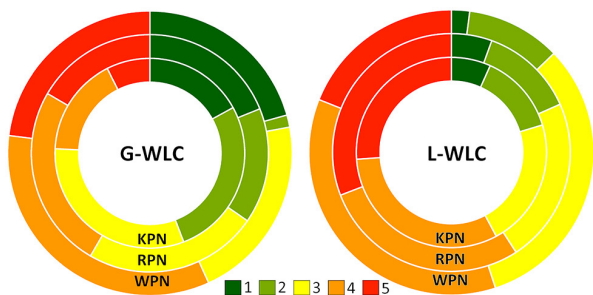
Dyskusja

Uwzględniając zalety i wady obydwóch technik podjęto próbę ustalenia która z tych dwóch technik, tj. globalnie czy lokalnie ważona kombinacja liniowa przedstawia bardziej wiarygodne wyniki oceny georóżnorodności dla poszczególnych parków. Prawdopodobnie łatwiej jest ocenić georóżnorodność w krajobrazach górskich niż na obszarach wyżynnych i nizinnych. W ocenie georóżnorodności istotna jest zatem wyrazistość form terenu, które zazwyczaj są bardziej spektakularne w krajobrazie niż elementy geologiczne, glebowe itp. Obserwacja ta jest zgodna z praktyką krajobrazową i fizjograficzną, zwłaszcza w procedurach waloryzacji geoprzestrzennej (Bródka, Macias, 2007, Macias, Bródka, 2013). Na rycinie 6 zestawiono procentowe udziały klas georóżno-



Ryc. 5. Mapa georóżnorodności Wolińskiego Parku Narodowego obliczona techniką G-WLC i L-WLC
Klasy georóżnorodności: 1 – bardzo niska, 2 – niska, 3 – średnia, 4 – wysoka, 5 – bardzo wysoka

Fig. 5. Geodiversity map of the Wolin National Park calculated with the G-WLC and L-WLC techniques
Geodiversity classes: 1 – very low, 2 – low, 3 – medium, 4 – high, 5 – very high



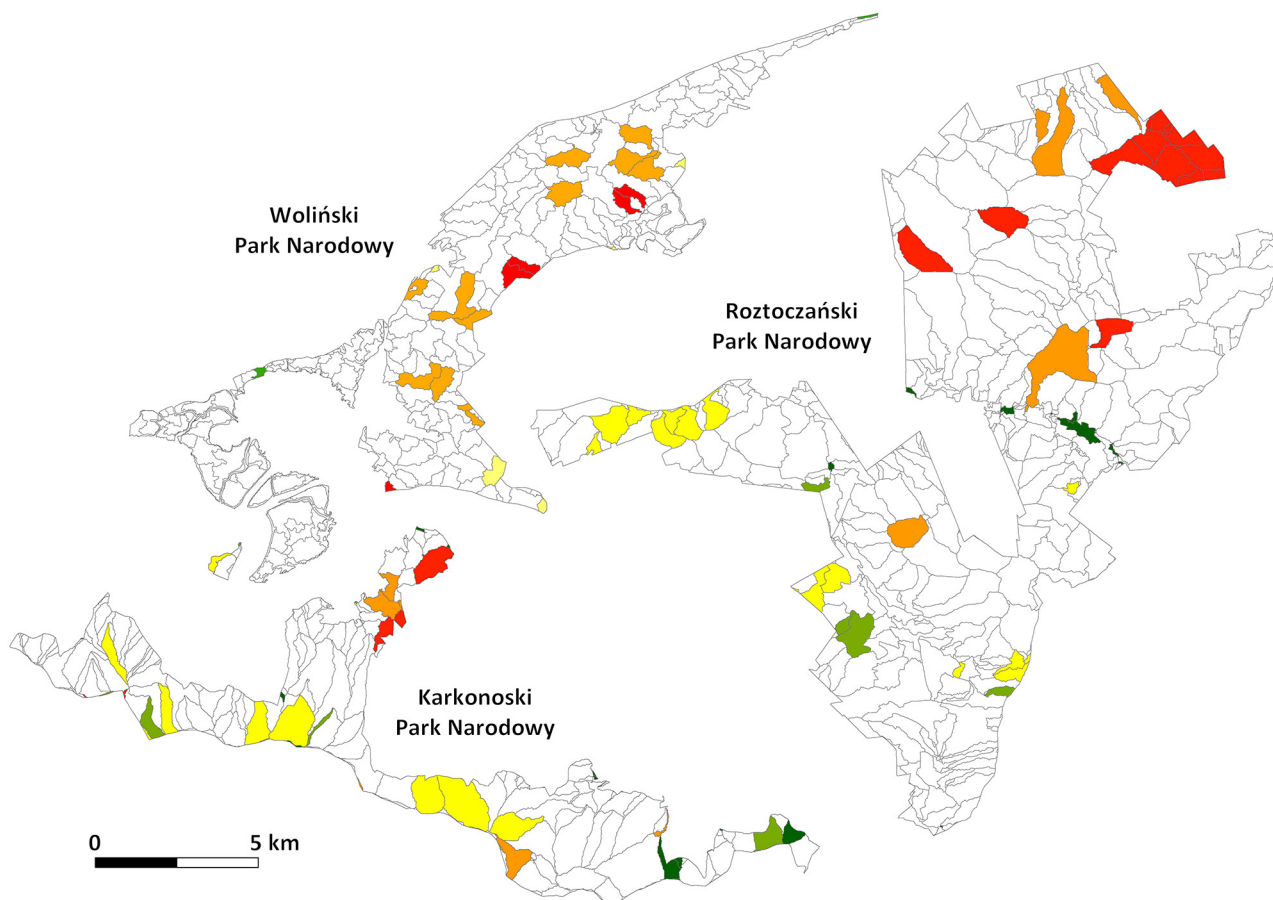
Ryc. 6. Udział powierzchni (%) klas georóżnorodności w ocenianych parkach narodowych

Fig. 6. Share of area (%) of geodiversity classes in selected national parks

rodności dla analizowanych parków narodowych. Nie wchodząc w szczegóły i wartości ilościowe dla poszczególnych klas georóżnorodności w parkach, a dokonując jedynie audytu wizualnego, można stwierdzić, że technika G-WLC przedstawia bardziej zróżnicowane wyniki w porównaniu do tech-

niki L-WLC. Uszeregowane klasy georóżnorodności od bardzo niskiej do bardzo wysokiej we wszystkich trzech parkach narodowych wykazują wyraźną lewostronną skośność na histogramach w przypadku techniki L-WLC. Natomiast w przypadku techniki G-WLC obserwuje się brak jakiegokolwiek uporządkowania klas georóżnorodności. Brak reguły w uporządkowaniu klas georóżnorodności można pożytywać za oznakę naturalności ocenianych środowisk, reagującą w indywidualny sposób na zróżnicowanie geologiczne, morfologiczne, glebowe, hydrograficzne i mezoklimatyczne badanych obszarów chronionych.

Przeprowadzono również analizę podobieństwa pomiędzy mapami uzyskanymi różnymi technikami. Na rycinie 7 przedstawiono przestrzenne rozmieszczenie zlewni elementarnych, dla których zostały uzyskane identyczne wartości georóżnorodności niezależnie od techniki agregacji. W każdym z parków narodowych naliczono zaledwie po kilkanaście takich zlewni. Identyczność obliczeń dotyczy każdej z klas georóżnorodności. Nie stwierdza się, aby zlew-



Ryc. 7. Zlewnie elementarne, dla których obliczono identyczne klasy georóżnorodności techniką G-WLC i L-WLC w wybranych parkach narodowych

Klasy georóżnorodności: 1 – bardzo niska, 2 – niska, 3 – średnia, 4 – wysoka, 5 – bardzo wysoka

Fig. 7. Elementary catchments for which identical geodiversity classes were calculated using the G-WLC and L-WLC techniques in selected national parks

Geodiversity classes: 1 – very low, 2 – low, 3 – medium, 4 – high, 5 – very high

nie charakteryzowały się wyróżniającymi warunkami środowiskowymi. Wyjątek od tego stwierdzenia stanowią zlewnie Góry Chojnik. Częściej te same klasy georóżnorodności przypisano w wyższych klasach (4 i 5) aniżeli w niższych klasach georóżnorodności (1 i 2).

Dla uzyskanych wyników oceny georóżnorodności obliczono dodatkowo indyktor georóżnorodności, pozwalający na porównania pomiędzy różnymi obiektami czy obszarami. Dla KPN uzyskano następujące wyniki: 1,82 i 0,35, dla RPN: 0,83 i 0,31 oraz dla WPN: 0,39 i 0,23, odpowiednio dla techniki G-WLC i L-WLC. Pierwsza z przytoczonych wartości 1,82 zdecydowanie odbiega od pozostałych wartości indykatora georóżnorodności. Wartość ta plasuje KPN wśród obszarów o przeciętnej georóżnorodności, z czym raczej trudno się zgodzić. Pozostałe wartości obliczonych indyktorów lokują badane parki wśród obszarów o bogatej georóżnorodności. Takie wyniki należy przyjąć jako oczywiste, bowiem zostały obliczone dla obszarów parków narodowych, a więc obszarów o unikalnych, wyjątkowych, rzadkich i specyficznych cechach dla swoich regionów, na które to cechy zwraca uwagę Zwoliński (2004) definiując georóżnorodność.

Wnioski końcowe

Niewątpliwie obydwie techniki przestrzennej analizy wielokryterialnej S-MCE, tj. G-WLC i L-WLC można rozważać do zastosowania przy ocenie georóżnorodności dowolnego obszaru, szczególnie obszarów chronionych. Na podstawie trzech zbadanych parków narodowych, choć każdy z nich przedstawia inny typ krajobrazu, można zasugerować, że technika G-WLC daje wiarygodniejsze wyniki oceny georóżnorodności dla obszarów wyżynnych i nizinnych, takich jak RPN i WPN, podczas gdy L-WLC ukazuje lepsze wyniki dla obszarów górzystych, takich jak KPN. Obserwacja ta opiera się na ocenie jakościowej i ilościowej, w której cechy terenu o dużej georóżnorodności uzyskały odpowiednio wysokie oceny na mapach generowanych przez S-MCE i odwrotnie, niektóre cechy o małej georóżnorodności otrzymały niskie oceny georóżnorodności. Od tej reguły jednak istnieją także liczne odstępstwa. Zalecenie stosowania L-WLC dla krajobrazów górskich ma sens przy rozważaniu różnic w sposobie obliczania wyników georóżnorodności w L-WLC w porównaniu z G-WLC dla każdej jednostki oceny przestrzennej. W L-WLC wagi lokalne odpowiedzialne w dużej mierze za końcowe oceny georóżnorodności są bardzo wrażliwe na różnice w wartościach czynników lokalnych (sąsiedztwa przestrzennego). Wysoka niejednorodność wartości czynników w lokalnym sąsiedztwie

jest często wskaźnikiem dużej różnorodności geograficznej i odpowiadających jej wyraźnych cech terenu. W rezultacie jednostki przestrzenne (np. zlewnie), które różnią się wartościami czynników od swoich sąsiadów, mają przypisywane wyższe wagi lokalne, co skutkuje wyższymi końcowymi ocenami georóżnorodności. Odwrotnie, jednostka przestrzenna otoczona innymi jednostkami o podobnych lub takich samych wartościach czynników daje niskie wagi lokalne, co skutkuje niskim wynikiem zróżnicowania geograficznego. Przemawia to na korzyść techniki G-WLC przy tworzeniu map georóżnorodności na bardziej jednorodnych obszarach badań. Technika ta w przeciwieństwie do L-WLC wykorzystuje globalne (niezmienne przestrzennie) wagi czynników, które są niewrażliwe na lokalne zmiany wartości czynników.

Do zaprezentowanej sugestii należy podchodzić z ostrożnością ze względu na ograniczoną liczbę przypadków oceny zastosowanych w tym badaniu, a więc do trzech przypadków o wyjątkowych walorach środowiskowych, tj. parków narodowych. Przyszłe badania mogą wykorzystać przedstawioną metodykę do oceny georóżnorodności innych zróżnicowanych środowiskowo obszarów jak np. geoparków nie tylko o znaczeniu krajowym, ale również światowym jak np. w sieci UNESCO Global Geoparks. Potrzebne są jednak dalsze badania, aby opracować wytyczne lub standardy dotyczące tego, jaki powinien być minimalny poziom zgodności i jaki rodzaj oceny można uznać za autorytatywny.

Podziękowania

Badania zostały sfinansowane przez Narodowe Centrum Nauki (Umowa nr UMO-2018/29/B/ST10/00114). Autorzy pragną podziękować Karkonoskiemu Parkowi Narodowemu, Roztoczańskiemu Parkowi Narodowemu i Wolińskiemu Parkowi Narodowemu za udostępnienie danych geoprzestrzennych dotyczących poszczególnych parków na potrzeby realizacji projektu badawczego. Projekt Corine Land Cover 2018 w Polsce został zrealizowany przez Instytut Geodezji i Kartografii i sfinansowany ze środków Unii Europejskiej, a wyniki tego projektu uzyskano ze strony internetowej Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska. Autorzy dziękują anonimowym Recenzentom za cenne uwagi.

Wkład autorów

Zbigniew Zwoliński: koncepcja, metodyka, walidacja, analiza formalna, wizualizacja, edycja tekstu, Alicja Najwer: koncepcja, metodyka, walidacja, oprogramowanie, opracowanie danych, edycja tekstu, wizualizacja, Piotr Jankowski: koncepcja, metodyka, analiza formalna, pozyskiwanie środków finansowych, zarządzanie projektem, recenzowanie

Literatura

- Alexandrowicz Z., 1967. Kry lodowcowe w Wolińskim Parku Narodowym. *Ochrona Przyrody* 32: 207–224.
- Borówka R.K., Gonera P., Kostrzewski A., Nowaczyk B., Zwoliński Zb., 1986. Stratigraphy of eolian deposits in Wolin Island and the surrounding area, North-West Poland. *Boreas* 15: 301–309. DOI: [10.1111/j.1502-3885.1986.tb00935.x](https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1986.tb00935.x).
- Brilha J., 2016. Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: a Review. *Geoheritage* 8: 119–134. DOI: [10.1007/s12371-014-0139-3](https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3).
- Bródka S., Macias A., 2007. Etapy oceny środowiska przyrodniczego oraz ich znaczenie w procesie planistycznym. W: M.Kistowski, B.Korwel-Lejkowska (red.), *Waloryzacja środowiska przyrodniczego w planowaniu przestrzennym*, Gdansk–Warszawa: 61–75.
- Brzezińska-Wójcik T., Skowronek E., Świeca A., 2016. Roztocze – od krainy fizjograficznej do regionu turystycznego. W: T.Brzezińska-Wójcik, E.Skowronek, A.Świeca (red.), *Od regionu geograficznego do regionu turystycznego*. Lubelszczyzna – implikacje historyczne, teoretyczne, naukowo-badawcze, edukacyjne, Wydawnictwo UMCS, Lublin: 133–168.
- Buraczyński J., Gawrysiak L., Chabudziński Ł., 2013. Cyfrowa mapa geomorfologiczna: Tomaszów Lubelski w skali 1:100,000. Główny Geodeta Kraju, Warszawa.
- Cohen S., Willgoose G., Hancock G., 2008. A methodology for calculating the spatial distribution of the area-slope equation and the hypsometric integral within a catchment. *Journal of Geophysical Research* 113, F03027. DOI: [10.1029/2007JF000820](https://doi.org/10.1029/2007JF000820).
- Geoportal, 2021. Numeryczny Model Terenu – PL-KRON86-NH. Główny Urząd Geodezji i Kartografii. Online: mapy.geoportal.gov.pl/imap/Imgp_2.html?gmap=gp0 (accessed 25 November 2020).
- GIOŚ [Główny Inspektorat Ochrony Środowiska], 2018. Projekt Corine Land Cover 2018 w Polsce. Online: clc.gios.gov.pl (accessed 22 July 2019).
- Goepel K.D., 2018. Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process* 10(3): 469–487. DOI: [10.13033/ijahp.v10i3.590](https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590).
- GRASS Development Team, 2020. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. Open Source Geospatial Foundation: Chicago, IL, USA. Online: <http://grass.osgeo.org> (accessed 23 March 2021).
- Gray M., 2013. *Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature*. 2nd Edition. John Wiley and Sons, Chichester. DOI: [10.1002/gj.2592](https://doi.org/10.1002/gj.2592).
- Harasimiuk M., 1995. Budowa geologiczna i rzeźba Roztoczańskiego Parku Narodowego. W: T.Wilgat (red.), *Roztoczański Park Narodowy*, Kraków–Zwierzyniec: 56–67.
- Hjort J., Heikkinen K., Luoto M., 2012. Inclusion of explicit measures of geodiversity improve biodiversity models in a boreal landscape. *Biodiversity Conservation* 21: 3487–3506. DOI: [10.1007/s10531-012-0376-1](https://doi.org/10.1007/s10531-012-0376-1).
- Hjort J., Luoto M., 2010. Geodiversity of high-latitude landscapes in northern Finland. *Geomorphology* 115(1–2): 109–116. DOI: [10.1016/j.geomorph.2009.09.039](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.09.039).
- Hjort J., Luoto M., 2012. Can geodiversity be predicted from space? *Geomorphology* 153–154: 74–80. DOI: [10.1016/j.geomorph.2012.02.010](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.02.010).
- Jankowski P., Najwer A., Zwoliński Zb., Niesterowicz J., 2020. Geodiversity Assessment with Crowdsourced Data and Spatial Multicriteria Analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 9(12), 716. DOI: [10.3390/ijgi9120716](https://doi.org/10.3390/ijgi9120716).
- Jankowski P., Nyerges T., 2001. *Geographic information systems for group decision making: Towards a participatory geographic information science*. Taylor & Francis, London.
- Jenks G.F., 1967. The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography* 7: 186–190.
- Karczewski A., Zwoliński Zb., 2013. *Cyfrowa mapa geomorfologiczna: Świnoujście w skali 1:100,000*. Główny Geodeta Kraju, Warszawa.
- Kaskela A.M., Kotilainen A.T., 2017. Seabed geodiversity in a glaciated shelf area, the Baltic Sea. *Geomorphology* 295: 419–435. DOI: [10.1016/j.geomorph.2017.07.014](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.014).
- Knapik R., Migoń P., 2011. *Atlas. Georóżnorodność i Geoturystyczne Atrakcje Karkonoskiego Parku Narodowego i Otuliny*. Karkonoski Park Narodowy, Jelenia Góra.
- Knapik R., Migoń P., Szuszkiewicz A., Aleksandrowski P., 2011. *Geopark Karkonosze – georóżnorodność i geoturystyka*. Przegląd Geologiczny 59: 311–322.
- Koh Y.K., Oh K.H., Youn S.T., Kim H.G., 2014. Geodiversity and geotourism utilization of islands: Gwanmae Island of South Korea. *Journal of Marine and Island Cultures* 3: 106–112. DOI: [10.1016/j.imic.2014.09.002](https://doi.org/10.1016/j.imic.2014.09.002).
- Kori E., Onyango Odhiambo B.D., Chikoore H., 2019. A geomorphodiversity map of the Soutpansberg Range, South Africa. *Landform Analysis* 38: 13–24. DOI: [10.12657/landfana-038-002](https://doi.org/10.12657/landfana-038-002).
- Kostrzewski A., 1993. *Geoekosystem obszarów nizinnych. Koncepcja metodologiczna*. W: *Geoekosystem obszarów nizinnych*. Komitet Naukowy przy Prezydium PAN Człowiek i Środowisko. Zeszyty Naukowe 6: 11–17.
- Kostrzewski A., Zwoliński Zb., Winowski M., Tylkowski J., Samotył M., 2015. Cliff top recession rate and cliff hazards for the sea coast of Wolin Island (Southern Baltic). *Baltica* 28(2): 109–120. DOI: [10.5200/baltica.2015.28.10](https://doi.org/10.5200/baltica.2015.28.10).
- Kot R., 2015. The point bonitation method for evaluating geodiversity: a guide with examples (Polish Lowland). *Geografiska Annaler, Series A Physical Geography* 97(2): 375–393. DOI: [10.1111/geoa.12079](https://doi.org/10.1111/geoa.12079).
- Kuleta M., 2017. Origin of Geodiversity on Volcanic Islands in European Geopark Network. *Journal of Business and Economics* 8(2): 186–198. DOI: [10.15341/jbe\(2155-7950\)/02.08.2017/007](https://doi.org/10.15341/jbe(2155-7950)/02.08.2017/007).
- Likert R.A., 1932. Technique for the Measurement of Attitudes. *Archives of Psychology* 140: 1–55.
- Macias A., Bródka S., 2013. *Przyrodnicze podstawy gospodarowania przestrzenią*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Maciejewski Z., 2010. The Roztocze National Park and its role in protecting of natural forest landscapes of the Roztocze region. W: J.Warowna, A.Schmitt (red.), *Human impact on upland landscapes of the Lublin region*. Kartpol, Lublin: 109–128.
- Maciuk K., Apollo M., Cheer J.M., Konecny O., Koziol K., Kudrys J., Mostowska J., Róg M., Skorupa B., Szombara S., 2021. Determining Peak Altitude on Maps, Books and Cartographic Materials: Multidisciplinary Implications. *Remote Sensing* 13(6), 1111. DOI: [10.3390/rs13061111](https://doi.org/10.3390/rs13061111).
- Malczewski J., 2011. Local weighted linear combination. *Transactions in GIS* 15: 439–455. DOI: [10.1111/j.1467-9671.2011.01275.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2011.01275.x).
- Malczewski J., Jankowski P., 2020. Emerging trends and research frontiers in spatial multicriteria analysis. *International Journal of Geographical Information Science* 34(7): 1257–1282. DOI: [10.1080/13658816.2020.1712403](https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1712403).
- Malczewski J., Jaroszewicz J., 2018. *Podstawy analiz wielokryterialnych w systemach informacji geograficznej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Malczewski J., Rinner C., 2015. *Scale Issues and GIS-MCDA*. W: *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*, Advances in Geographic Information Science, Springer Berlin Heidelberg: 249–266. DOI: [10.1007/978-3-540-74757-4_9](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4_9).
- Manosso F.C., Zwoliński Zb., Najwer A., Basso B.T., Santos D.S., Pagliarini M.V., 2021. Spatial pattern of geodiversity assessment in the Marrecas River drainage basin, Paraná, Brazil. *Ecological Indicators* 126, 107703. DOI: [10.1016/j.ecolind.2021.107703](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107703).
- Migoń P., Kasprzak M., Jancewicz K., 2013. *Cyfrowa mapa geomorfologiczna: Jelenia Góra w skali 1:100,000*. Główny Geodeta Kraju, Warszawa.

- Najwer A., Borysiak J., Gudowicz J., Mazurek M., Zwoliński Zb., 2016. Geodiversity and biodiversity of the postglacial landscape (Dębica River catchment, Poland). *Quaestiones Geographicae* 35(1): 5–28. DOI: [10.1515/quageo-2016-0001](https://doi.org/10.1515/quageo-2016-0001).
- Najwer A., Zwoliński Zb., 2014. Semantyka i metodyka oceny georóżnorodności – przegląd i propozycja badawcza. *Landform Analysis* 26: 115–127. DOI: [10.12657/landfana.026.011](https://doi.org/10.12657/landfana.026.011).
- Nunes J.C., 2014. The Azores Archipelago: Islands of Geodiversity. W: P.Erfurt-Cooper (red.), *Volcanic Tourist Destinations*, Springer, Heidelberg: 57–67. DOI: [10.1007/978-3-642-16191-9_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16191-9_4).
- Pellitero R., González-Amuchastegui M.J., Ruiz-Flaño P., Serrano E., 2011. Geodiversity and Geomorphosite Assessment Applied to a Natural Protected Area: the Ebro and Rudron Gorges Natural Park (Spain). *Geoheritage* 3: 163–174. DOI: [10.1007/s12371-010-0022-9](https://doi.org/10.1007/s12371-010-0022-9).
- Perotti L., Carraro G., Giardino M., De Luca D.A., Lasagna M., 2019. Geodiversity Evaluation and Water Resources in the Sesia Val Grande UNESCO Geopark (Italy). *Water* 11(10), 2102. DOI: [10.3390/w11102102](https://doi.org/10.3390/w11102102).
- PIG – PIB [Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy], 1977. Szczegółowa mapa geologiczna Polski, sheet No 113 Międzyzdroje, skala 1:50 000. Warszawa.
- PIG – PIB [Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy], 1979. Szczegółowa mapa geologiczna Polski, sheet No 114 Wolin, skala 1:50 000. Warszawa.
- PIG – PIB [Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy], 1994. Szczegółowa mapa geologiczna Polski, sheet No 893 Terespol, skala 1:50 000. Warszawa.
- PIG – PIB [Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy], 1996. Szczegółowa mapa geologiczna Polski, sheet No 894 Krasnobród, skala 1:50 000. Warszawa.
- PIG – PIB [Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy], 2009. Szczegółowa mapa geologiczna Polski, sheet No 830 Jakuszyce, skala 1:50 000. Warszawa.
- PIG – PIB [Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy], 2009. Szczegółowa mapa geologiczna Polski, sheet No 831 Szklarska Poręba, skala 1:50 000. Warszawa.
- PIG – PIB [Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy], 2009. Szczegółowa mapa geologiczna Polski, sheet No 832 Kowary, skala 1:50 000. Warszawa.
- PIG – PIB [Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy], 2011. Szczegółowa mapa geologiczna Polski, sheet No 795 Jelenia Góra, skala 1:50 000. Warszawa.
- Seijmonsbergen A.C., Guldenaar J., Rijsdijk K.F., 2017. Exploring Hawaiian long-term insular geodiversity dynamics. *Landform Analysis* 35: 31–43. DOI: [10.12657/landfana.035.007](https://doi.org/10.12657/landfana.035.007).
- Serrano E., Ruiz-Flaño P., 2007. Geodiversity. A theoretical and applied concept. *Geographica Helvetica* 62(3): 140–147.
- Tomlin C.D., 1990. *Geographical Information Systems and Cartographic Modeling*. EnglewoodCliffs, NJ, Prentice-Hall.
- Voss S., 2021. MCDA4ArcMap 1.1A for ArcMap 10.2 or Later rev36981. Online: <https://github.com/steffanv/mcda4arcmap/releases/tag/1.1Anew> (accessed 25 March 2021).
- Zełewska I., Najwer A., Zwoliński Zb., 2018. Geodiversity evaluation of the Słupsk Bank boulder area. *Bulletin of the Maritime Institute in Gdańsk* 33(1): 178–188. DOI: [10.5604/01.3001.0012.8088](https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.8088).
- Zwoliński Zb., 2008. Designing a map of the geodiversity of landforms in Poland. IAG and AIGEO International Meeting “Environmental Analysis and Geomorphological Mapping for a Sustainable Development”, 26 February 2008, Abstract Book, Addis Ababa: 18–22.
- Zwoliński Zb., 2009. The routine of landform geodiversity map design for the Polish Carpathian Mts. *Landform Analysis* 11: 77–85.
- Zwoliński Zb., Najwer A., Giardino M., 2018. Methods for assessing geodiversity. W: E.Reynard, J.Brilha (red.), *Geoheritage: Assessment, Protection, and Management*. Elsevier. DOI: [10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2).
- Zwoliński Zb., Stachowiak J., 2012. Geodiversity map of the Tatra National Park for geotourism. *Quaestiones Geographicae* 31(1): 99–107. DOI: [10.2478/v10117-012-0012-x](https://doi.org/10.2478/v10117-012-0012-x).