

## Autoreferat

### 1. Imię i nazwisko:

- Bartłomiej Jerzy Szypuła

### 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe:

- **2000** – magister geografii, specjalność: kształtowanie i ochrona środowiska, Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Tytuł pracy: „*Analiza zależności występujących pomiędzy poszczególnymi elementami środowiska przyrodniczego na terenie projektowanego Górnośląskiego Ogrodu Botanicznego w Mikołowie Mokrem przy użyciu narzędzi GIS (ArcView 3.1)*”. Promotor pracy: dr Bogdan Gądek
- **2007** – doktor nauk o Ziemi w zakresie geografii, Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Tytuł rozprawy: „*Rzeźba strukturalna Wyżyny Śląskiej w świetle badań geostatystycznych*”. Promotor pracy: prof. dr hab. Jacek Jania

### 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

- **2000 - 2001** – asystent, Katedra Geomorfologii, Zakład Teledetekcji Środowiska Przyrodniczego, Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach
- **2001 - 2006** – doktorant, Katedra Geomorfologii, Zakład Teledetekcji Środowiska Przyrodniczego, Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach
- **2003 - 2011** – nauczyciel geografii, Zespół Katolickich Szkół Ogólnokształcących Nr 2 w Katowicach
- **2009 - 2015** – adiunkt, Szkoła Wyższa im. B. Jańskiego w Warszawie
- **2007 - 2019** – adiunkt, Katedra Geomorfologii, Wydział Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach
- **od 2019** – adiunkt, Instytut Nauk o Ziemi, Wydział Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach

### 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 Ustawy.:

Na osiągnięcie naukowe składa się powiązany tematycznie cykl sześciu opublikowanych recenzowanych publikacji naukowych [A1-A6] pod wspólnym tytułem:

## OCENA JAKOŚCI I ZASTOSOWANIE CYFROWYCH MODELI TERENU DO GEOMORFOMETRYCZNYCH ANALIZ RZEŻBY POWIERZCHNI

[A-1] Szypuła B., 2017. Digital elevation models in geomorphology. [In]: Shukla D.P. (ed.), Hydro-Geomorphology - Models and Trends. IntechOpen, 81-112 p. DOI: 10.5772/intechopen.68447 IF=0.017

[A-2] Szypuła B., 2016. Geomorphometric comparison of DEMs built by different interpolation methods. Landform Analysis 32:45-58. DOI: 10.12657/landfana.032.004

[A-3] Szypuła B., 2017. Quantitative studies of the morphology of the south Poland using Relief Index (RI). Open Geosciences 9:509-524. DOI: 10.1515/geo-2017-0039 IF=1.229

[A-4] Szypuła B., 2019. Quality assessment of DEM derived from topographic maps for geomorphometric purposes. Open Geosciences, 11:843-865. DOI: 10.1515/geo-2019-0066 IF=1.229

[A-5] Szypuła B., Wieczorek M., 2019. Geomorphometric relief analysis with the *k*-median method, Silesian Upland, southern Poland. Frontiers of Earth Science. DOI: 10.1007/s11707-019-0765-9 IF=2.031

[A-6] Szypuła B., 2023. Accuracy of UAV-based DEMs without ground control points. Geoinformatica. DOI: 10.1007/s10707-023-00498-1 IF=2.773

Publikacja [A-1] stanowi rozdział wydany w indeksowanej monografii wydawnictwa IntechOpen, a kolejne cztery publikacje [A3, A4, A5, A-6] ukazały się w czasopismach indeksowanych w bazie Journal Citation Reports. Jestem jedynym autorem pięciu publikacji [A-1, A-2, A-3, A-4, A-6] oraz pierwszym autorem jednej pracy [A-5]. Mój wkład w powstanie pracy [A-5] polegał na sformułowaniu problemu badawczego, wytypowaniu terenu badań, opracowaniu kartograficznym, analizie uzyskanych wyników i sformułowaniu wniosków, zredagowaniu tekstu artykułu i wykonaniu rycin, co jest zgodne z oświadczeniem Współautorki (Załącznik 7).

### **Wprowadzenie**

Rzeźba terenu ma bardzo istotne znaczenie dla przebiegu procesów geomorfologicznych, hydrologicznych, ale także atmosferycznych i ekologicznych. Obecnie dostępne narzędzia komputerowe analizujące powierzchnię terenu bazują na cyfrowych modelach wysokości, przez co umożliwiają stosowanie wyrafinowanych technik badawczych i efektowną wizualizację topografii. Cyfrowe modelowanie i analizy terenu są szybko rozwijającym się obszarem badawczym w naukach o Ziemi, ze względu na stosowane technologie (Wilson, 2012). Coraz lepszy sprzęt i metody wykorzystywane do pozyskiwania przestrzennych danych wysokościowych skutkują powstawaniem

nowych cyfrowych modeli terenu, co z kolei stymuluje rozwój współczesnej geomorfometrii, która koncentruje się na wydobywaniu miar opisowych (parametrów powierzchni Ziemi) i cech przestrzennych (obiekty powierzchni Ziemi) z cyfrowej topografii. Wartości tych parametrów i obiektów przyjmują różne wartości, w zależności od jakości materiału źródłowego tj. cyfrowego modelu terenu. Precyzyjne matematyczne odwzorowanie kształtu powierzchni Ziemi za pomocą cyfrowych modeli terenu pozwala na jego ilościową analizę. Pochodne parametry i wskaźniki obliczane z różnych modeli umożliwiają pokazanie czasowej i przestrzennej dynamiki zmian zachodzących na danym obszarze. Aby takie badania były skuteczne, a ich wyniki wiarygodne – niezbędne jest odpowiednie przygotowanie i sprawdzenie modeli pod kątem jakości i adekwatności zastosowania do planowanych analiz (Wise, 2000; Das i in., 2016). Do określenia przydatności modelu do badań geomorfologicznych nie wystarczy sprawdzenie jego dokładności wysokościowej. Model należy sprawdzić także pod kątem poprawności przedstawienia charakterystycznych cech topografii (Wilson i in., 2008), np. jej chropowatości, rozkładu wklęsłości, wypukłości, nachyleń, ekspozycji (Reuter i in., 2009) czy klasyfikacji rzeźby z uwzględnieniem form (zespołów form) występujących na danym obszarze. Wielu badawczy słusznie podkreśla konieczność oceny błędów podczas pracy z cyfrowymi modelami terenu (Höhle & Höhle, 2009; Yastikli i in., 2011, Wise, 2011; Contreras i in., 2017) w związku z tym moje naukowe zainteresowania skupiły się w ostatnich latach na wykorzystywaniu cyfrowych modeli terenu, a **głównym celem prowadzonych przeze mnie badań była analiza jakości modeli w świetle zastosowań do badań rzeźby terenu**. Moje prace badawcze przedstawione w niniejszym osiągnięciu naukowym skupiły się na kilku kwestiach:

- analizie porównawczej cyfrowych modeli terenu utworzonych różnymi metodami interpolacyjnymi (jak różne interpolatory wpływają na tworzone modele?; jak zmienia się uzyskany obraz przedstawianej przez nie rzeczywistości?) oraz badaniach, które pozwalają określić gęstość próbkowania wysokości badanego obszaru, aby wynikowy model prawidłowo odzwierciedlał charakter topografii (tzw. dokładność geomorfologiczna),
- prezentacji założeń i zastosowań autorskiego wskaźnika morfometrycznego – indeksu rzeźby RI (Relief Index) oraz zbadaniu wpływu rozdzielczości modelu i podstawowych pól obliczeniowych na wartości tego wskaźnika,
- analizie jakości cyfrowego modelu terenu uzyskanego na podstawie digitalizacji wielkoskalowych map topograficznych w zestawieniu z wolno dostępnymi modelami globalnymi oraz wysokorozdzielczym modelem referencyjnym pochodzącym z lotniczego skanowania laserowego (ALS),
- analizie bezwzględnej dokładności cyfrowego modelu terenu, cyfrowego modelu powierzchni terenu i ortofotomozaik utworzonych z danych UAV
- geomorfometrycznej klasyfikacji rzeźby obszaru Wyżyny Śląskiej wykonanej metodą *k*-median na bazie cyfrowego modelu terenu.

### **Prezentacja osiągnięcia naukowego**

Pierwsza publikacja [A-1] ma charakter przeglądowy i jest wprowadzeniem w tematykę cyfrowych modeli terenu, które porządkuje wiedzę na temat znaczenia cyfrowych modeli terenu w geomorfologii, ich źródeł danych, rodzajów modeli terenu oraz omawia obecnie dostępne darmowe modele globalne. Szczególny nacisk położyłem na cechy morfometryczne form terenu, które opisywane są przez parametry oraz wskaźniki morfometryczne. W tej pracy omówiłem też najważniejsze istniejące systemy klasyfikujące rzeźbę terenu na poszczególne formy (i/lub zespoły form) na podstawie cyfrowych danych wysokościowych.

Współczesne nauki o Ziemi zajmują się widzialną przestrzenią, w której żyje i funkcjonuje człowiek. Geomorfologia, jako jedna z dziedzin badawczych nauk o Ziemi bada formy powierzchni terenu, ich powstanie, rozmieszczenie i ewolucję. Jednym z ważnych zagadnień geomorfologii jest charakterystyka form rzeźby. Do połowy XX w. był to zwykle opis jakościowy, który nie umożliwiał porównywalności (oraz powtarzalności) studiów prowadzonych na jednym obszarze – z innym. Wraz z dostępnością map topograficznych zaczęła się w geomorfologii rozwijać **morfometria** - zajmująca się pomiarami form rzeźby powierzchni Ziemi. Na początku były to czasochłonne pomiary wykonywane na szczegółowych mapach topograficznych, a następnie przy zastosowaniu analiz statystycznych dokonywano różnych przeliczeń wyprowadzając wskaźniki charakteryzujące np. rzeźbę fluwialną (Strahler 1952, 1956, 1964, Schumm, 1954, Chorley, 1969), krasową (Williams, 1972) czy glacialną (Evans, 1969, 1974). Dalszy rozwój metod ilościowych w geomorfologii zaowocował wypracowaniem nowych podstaw teoretycznych i metodycznych. Lustig (1969) rozróżnił dwa podejścia do ilościowej analizy i charakterystyki powierzchni terenu: 1) charakterystykę indywidualnych form, opartą w znacznej mierze na pomiarach terenowych oraz 2) analizę powierzchni terenu jako całości, bazującą na analizie map. Kilka lat później Evans (1972) zaproponował podział geomorfometrii na ogólną (*general*) i szczegółową (*specific*). Geomorfometria ogólna odnosi się do pomiarów i analizy tych cech form terenu, które można zastosować do każdej ciągłej i zróżnicowanej powierzchni. Natomiast geomorfometria szczegółowa dotyczy pomiarów wybranych typów rzeźby lub form powierzchni, służących do określania ich geometrii oraz wykrywania szczegółowych praw rządzących ich powstawaniem i rozwojem.

Dopiero powszechny rozwój komputerów osobistych i odpowiedniego specjalistycznego oprogramowania umożliwił realny rozwój geomorfometrii – dziedziny badań obejmującej pomiary, opis i analizę cech rzeźby terenu metodami w pełni ilościowymi. Współczesna geomorfometria jest interdyscyplinarną dziedziną, która rozwinęła się z matematyki, nauk o Ziemi oraz nauk informatycznych. Z jednej strony jest nauką o ilościowych analizach powierzchni terenu, a z drugiej - nowoczesnym, analityczno-kartograficznym podejściem do przedstawiania powierzchniowej topografii za pomocą komputerowych analiz i wizualizacji (Pike et al., 2009). **Podstawowym źródłem danych w geomorfometrii są cyfrowe dane wysokościowe.** Na początku były to informacje pozyskiwane z map topograficznych (punkty wysokościowe, linie transekcyjne). Obecnie, dzięki dostępności specjalistycznego sprzętu pomiarowego (GPS-RTK, skanery, technologie UAV) możliwe jest stosunkowo szybkie i precyzyjne pozyskiwanie informacji o wysokościach poszczególnych punktów danego obszaru. Te informacje są następnie wykorzystywane do tworzenia cyfrowych modeli terenu, które są bazą do badań geomorfometrycznych. To właśnie cyfrowe modele terenu stały się

początkiem rozwoju nowych metod badawczych we współczesnej geomorfologii, czy szerzej – naukach o Ziemi, włączając w to geologię, geografę, architekturę krajobrazu, zagospodarowanie przestrzenne, a nawet biologię. Aby uniknąć zamieszania terminologicznego obecnego w literaturze nie tylko polskiej (por. Pike et al., 2009; Hengl & Evans, 2009; Zwoliński, 2010) przez **cyfrowy model terenu** (*digital elevation model*) rozumiem tutaj pełne odwzorowanie fragmentu powierzchni Ziemi przez zestaw danych cyfrowych opisujących jego wysokości oraz algorytm interpolacyjny umożliwiający odtworzenie (aproksymację) sytuacji rzeczywistej. Odwzorowanie to może zawierać również informacje o charakterze tej powierzchni. Pełne odwzorowanie fragmentu ciągłej powierzchni Ziemi oznacza, że wysokości muszą być obliczalne dla dowolnego punktu położonego na analizowanym obszarze. W przeciwnym wypadku zajmujemy się jedynie próbkami wysokości w tzw. dyskretnych lokacjach (punkty lub linie takie jak poziomicę), a nie modelami powierzchni Ziemi.

Obecnie mamy do czynienia z coraz powszechniejszym dostępem do darmowych cyfrowych danych wysokościowych, w tym modeli terenu, zarówno o zasięgu globalnym, jak i regionalno-lokalnym. Zasadne staje się więc świadome z nich korzystanie. Z jednej strony w tych danych drzeмиą olbrzymie możliwości obliczeniowe i poznawcze, gdyż modelowanie parametrów rzeźby terenu niesie ze sobą sporo informacji na temat dynamiki zmian, jakie w niej zachodzą, pozwala porównać wyniki z innymi obszarami, albo zestawić je z danymi archiwalnymi. Z drugiej jednak strony należy mieć świadomość ograniczeń czy uproszczeń wynikających ze stosowania tych metod i narzędzi oraz możliwości ewentualnych błędów, które mogą prowadzić do mylnych wniosków o charakterze ogólnym. Nieprawidłowości w posługiwaniu się cyfrowymi modelami terenu mogą wynikać wielu czynników:

- zastosowania nieodpowiedniego układu współrzędnych (który wymusza geometrię piksela/pola podstawowego);
- rozdzielczości poziomej modelu (która wpływa na skalę, w jakiej przeprowadzane są analizy danego obszaru);
- rozdzielczości pionowej modelu i związanego z nią ograniczenia dokładności wysokości (często użytkownicy modelu terenu nie znają dokładności pionowej i poziomej modelu);
- sposobu pozyskania danych wysokościowych, które posłużyły do utworzenia modelu (np. skaning laserowy, pomiary GPS-RTK, pomiary tachymetryczne, digitalizacja topograficznych map poziomicowych, analiza stereogramów, itd.);
- zastosowania niewłaściwego algorytmu interpolacyjnego, który w efekcie wytworzył nieprawdziwy obraz rzeczywistości (błędnie zinterpretowane formy czy wręcz artefakty);
- błędów pomiarów czy podczas wprowadzania danych;
- zastosowania niewłaściwej wielkości pola podstawowego podczas tworzenia modelu (która może zbyt ogólnie generalizować obraz rzeźby lub sztucznie zawyżać rozdzielczość, ale bez wyraźnego polepszenia jakości),
- niewłaściwego pozyskiwania danych do dalszej pracy (np. podczas digitalizacji map – tworzenie się sztucznych teras na stokach);
- powstawania błędów podczas łączenia różnych modeli;
- niewłaściwej rektyfikacji modeli (błędy przesunięcia, lokalizacji);

- stosowania nieodpowiednich modeli do prowadzonych studiów (nieadekwatność posiadanych modeli/danych do potrzeb badawczych);
- porównywania ze sobą modeli opisujących różne sytuacje (np. modelu powierzchni z modelem terenu);
- braku świadomości błędów (a tym samym dokładności) podczas interpretacji wyników modelowania czy map pochodnych uzyskanych na bazie modeli.

W związku z tym uważam, że z racji coraz powszechniejszego wykorzystywania cyfrowych modeli terenu w naukach o Ziemi, ich jakość jest kwestią niezwykle ważną. Jakość modeli czyli stopień ich zgodności z rzeczywistością określa możliwości i ograniczenia w użyciu tego rodzaju danych. Jakość modeli jest zdeterminowana z jednej strony przez ich dokładność wysokościową i rozdzielczość przestrzenną, a z drugiej przez poprawne odzwierciedlenie charakteru topografii badanego obszaru, co jest kluczowe w zastosowaniach do analiz rzeźby terenu.

Druga publikacja [A-2] stanowi krytyczną **analizę porównawczą różnych metod interpolacyjnych** zastosowanych do przetworzenia tego samego zestawu danych wysokościowych. Posłużyłem się następującymi metodami interpolacji: odwrotne odległości ważone (*Inverse Distance Weighting*), naturalnego sąsiedztwa (*Natural Neighbour*), funkcje sklejące (*Spline*), funkcje podstaw radialnych (*Radial Basis Functions*), wielomian lokalny (*Local Polynomial*) oraz kriging. Pierwszym celem było sprawdzenie **jak różne interpolatory wpływają na tworzone modele**; jak zmienia się obraz przedstawianej przez modele rzeczywistości? Ocena modeli odbyła się najpierw w sposób wizualny (por. A-2, Ryc. 5), następnie poprzez charakterystyki ilościowe podstawowych parametrów morfometrycznych, a potem przez porównanie ich dokładności wysokościowej (A-2, Tab. 6).

Drugim celem było zbadanie, **jaka powinna być gęstość próbkowania wysokości** w badanym obszarze (ilość punktów na m<sup>2</sup> lub km<sup>2</sup>), aby wynikowy model prawidłowo odzwierciedlał charakter topografii (tzw. dokładność geomorfologiczna). Poszczególne modele porównałem z modelem reperowym, którym był wysokorozdzielczy model utworzony na bazie danych ze skaningu lotniczego (ALS). Podczas porównywania ze sobą modeli posłużyłem się m.in. własnym pomysłem obliczając **tzw. indeks zgodności wyników** (result conformity index). Zgodność wyników obliczana jest przez porównanie wartości wysokości wszystkich komórek jednego modelu z odpowiadającymi im przestrzennie komórkami drugiego modelu z założoną dokładnością (tutaj było to  $\pm 0,1$  m). Rezultat zgodności wyników wyrażany jest procentowo i opisuje ile procent komórek danego modelu jest zgodnych z odpowiadającymi im komórkami modelu reperowego. W niniejszym badaniu najwyższą zgodność z modelem reperowym wykazał Kriging (prawie 12%), naturalne sąsiedztwo, Spline i wielomian lokalny 10%, metoda IDW około 7%, a najmniejszą - funkcje podstaw radialnych (4%) (A-2, Tab. 8).

Najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań:

- Wszystkie metody interpolacji (oprócz metod Spline i IDW) zawyżają wartości wysokości terenu w miejscach głównych wyniesień i obniżają w najniższych miejscach. Powoduje to wzrost wysokości względnych w modelu, a więc uwypukla (wzmacnia) relief analizowanego obszaru.
- **Metoda Spline** wykazała największe dodatnie różnice wysokości w wyrobisku piaskowni, a ujemne - na obszarze płaskim, natomiast w miejscach najwyższych elewacji różnice sięgały kilku metrów (plus lub minus). Można więc powiedzieć, że ta metoda, z wyjątkiem artefaktów, które mogą wystąpić, **ogólnie wygładza rzeźbę**.
- Największe błędy wystąpiły w modelach utworzonych metodami Spline i wielomianu lokalnego. Te błędy to szereg miejscowych artefaktów o dużych różnicach wysokości w stosunku do rzeczywistych (od -115 do +181 m). Biorąc jednak pod uwagę wartości błędu średniokwadratowego RMSE (od 1,5 do 3,0 m) i obliczoną zgodność wyników wysokości z modelem reperowym, należy stwierdzić, że **obie metody poprawnie scharakteryzowały morfologię w ujęciu statystycznym**.
- **Wszystkie zastosowane techniki interpolacji bardzo dobrze poradziły sobie z ilościowymi charakterystykami ekspozycji badanego obszaru**. Bez względu na zastosowaną metodę interpolacji lub rozdzielczość - różnice udziału danej ekspozycji obliczone z modeli i zestawione z modelem reperowym wynosiły do 3,5%, a zwykle mniej niż 2%.
- Okazało się, że modele IDW, naturalnego sąsiedztwa oraz Kriging utworzone w dwóch różnych rozdzielczościach (10x10 i 17x17 m) miały zaskakująco podobne wartości zmiennych geomorfometrycznych. Wartości wysokości, średnich wysokości względnych, spadków i krzywizn były takie same (lub prawie takie same) w obu rozdzielczościach. Maksymalne wysokości względne były wyższe w modelach 17x17 m (co wynika z faktu uwzględnienia większej powierzchni do obliczeń), a maksymalne wartości spadków i krzywizn są większe w modelach 10x10 m (co jest również zgodne z obserwacjami, ponieważ mniejsze pole analizy skutkuje większą różnorodnością krzywizn, tj. mniejszym uśrednianiem nachylenia).
- Po przeprowadzonych badaniach (wizualnej ocenie modeli 3D, porównaniu zmiennych geomorfometrycznych, dokładności pionowej i zgodności wyników z modelem reperowym) należy stwierdzić, że **najlepszymi metodami interpolacji** (spośród wybranych) do analizy rzeźby powierzchni okazały się **techniki naturalnego sąsiedztwa i Krigingu**. Utworzone modele ze względu na niższą rozdzielczość (niż model reperowy) są znacznie mniej szczegółowe, ale **nie stworzyły żadnych artefaktów** ani rażących błędów. Chociaż obie metody różnią się pod względem obsługi (naturalne sąsiedztwo jest proste i intuicyjne w użyciu, a jedynymi wymaganymi danymi wejściowymi są dane wysokości punktu, podczas gdy Kriging jest potężnym narzędziem geostatystycznym z wieloma definiowanymi parametrami) – są technikami, które bardzo dobrze radzą sobie z poprawnym odwzorowaniem rzeźby badanego obszaru.
- Podsumowując można powiedzieć, że aby scharakteryzować relief wybranego obszaru posługując się właściwościami geomorfometrycznymi wyprowadzonymi z modelu, nie jest konieczne posługiwanie się ogromnymi zbiorami (chmurami) danych wysokościowych pochodzących z LiDARa. Okazuje się, że **aby utworzyć model, który prawidłowo odzwierciedla obszar o umiarkowanie urozmaiconej rzeźbie** w danej skali dokładności (np. 1:10.000-1:25.000), można

przerzedzić gęste zbiory punktów i pozostawić **punkty rozmieszczone mniej lub bardziej regularnie na całym obszarze badań, w odstępach co około 100 m**. Dane LiDAR o gęstości do 12 pkt/m<sup>2</sup>, oczywiście pozwalają na stworzenie modelu o rozdzielczości nawet 0,1×0,1 m, natomiast dane o średniej gęstości 64 pkt/km<sup>2</sup> umożliwiają stworzenie modelu o maksymalnej rozdzielczość 10×10 m (tj. rozdzielczości 10.000 razy mniejszej). Niewątpliwie ma to znaczenie przy analizie małych form i mikroform czy analizach szorstkości w dużej skali, ale w standardowych badaniach geomorfologicznych nie jest konieczne.

Następna publikacja [A-3] omawia założenia i zastosowanie **autorskiego wskaźnika morfometrycznego – indeksu rzeźby RI (Relief Index)**. Indeks rzeźby to stosunek całkowitej długości linii poziomic i planimetrycznej powierzchni obszaru, w którym występują. Ten łatwo obliczalny parametr zapewnia obiektywną miarę ilościowej zmienności rzeźby, jako ważnej cechy w badaniach geomorfologicznych. Aby osiągnąć ten cel, przeprowadziłem szczegółową analizę morfometryczną przy użyciu cyfrowego modelu terenu o wysokiej rozdzielczości (1×1 m). Badaniu poddałem 21 obszarów testowych w południowej Polsce, o charakterystycznej morfologii zgodnie z typem rzeźby. Każdy typ rzeźby reprezentowany był przez kilka lokalizacji: górski (6 obszarów), kotlin przedgórskich (4 obszary), wyżynny (6 obszarów) i nizinny (5 obszarów). Rzeźba w obszarach testowych była analizowana przy użyciu podstawowych parametrów geomorfometrycznych (spadki, wysokości względne, krzywizny poziome). Ponadto **zbadalem wpływ rozdzielczości modelu i podstawowych pól obliczeniowych na wartości wskaźnika indeksu rzeźby RI**.

Indeks rzeźby (RI) obliczany jest jako stosunek sumarycznej długości poziomic z danego obszaru do jego powierzchni planimetrycznej (tj. w rzucie prostokątnym) według wzoru:

$$RI = C_L/pA [m/m^2]$$

gdzie:  $C_L$  jest całkowitą długością poziomic, a  $pA$  jest powierzchnią planimetryczną.

Idea indeksu rzeźby RI opiera się na kombinacji rzeźby lokalnej (ilości poziomic i zmian wysokości) oraz na stopniu rozcięcia powierzchni (długości i kształtach poziomic) w odniesieniu do powierzchni obszaru zrzutowanej na płaszczyznę. Jest to proste matematyczne narzędzie do szybkiej oceny zróżnicowania rzeźby, a także obiektywna miara „ilości” rzeźby za pomocą jednej wartości. Aby uniknąć zbyt dużych lub zbyt małych wartości – indeks rzeźby RI wyrażony jest w metrach na metr kwadratowy (całkowita długość linii poziomic w cięciu 1-metrowym na każdy metr kwadratowy badanego obszaru).

#### Etapy pracy podczas obliczania indeksu rzeźby RI:

- przygotowanie cyfrowego modelu terenu (zmozaikowanie poszczególnych arkuszy cyfrowego modelu terenu w jedną całość dla danego obszaru testowego i bezstratna konwersja do formatu ESRI Grid),



- przygotowanie danych do obliczeń: 1) wygenerowanie poziomicy w cięciu 1-metrowym i obliczenie ich sumarycznej długości; 2) usunięcie błędnych poziomicy o długości  $\leq 3$  m (przy rozdzielczości modelu 1x1 m obwód koła wpisanego w kwadrat o długości boku 1 metra ma wartość około 3,14 m); tak przygotowane poziomice stały się podstawą do dalszych obliczeń,
- utworzenie siatki kwadratów (10x10 m), które stały się polami podstawowymi dla wszystkich obliczeń: statystyk długości poziomicy, rzeźby lokalnej (wysokości względnej), spadków (zmian wysokości wraz z odległością między komórką a jej sąsiadami), krzywizny planarnej (druga pochodna powierzchni i nachylenia stoków), wskaźnika wilgotności topograficznej TWI (stosunku między nachyleniem a obszarem zlewni) i w końcu wartości indeksu rzeźby RI.

#### Klasy indeksu rzeźby RI:

Na podstawie wyników indeksu rzeźby z 21 przeanalizowanych obszarów testowych oraz wyników obliczonych relacji z rzeźbą lokalną i spadkami zaproponowałem następujące klasy indeksu rzeźby RI (A-3, Tab. 4):

- Klasa 1 ( $RI = \leq 0,05$ ) - to obszary o najmniej zróżnicowanej rzeźbie terenu, płaskie lub prawie płaskie, zwykle są to wyrównane szerokie doliny rzek i obszary nizinne o bardzo małych wysokościach względnych i minimalnych spadkach (do  $1^\circ$ );
- Klasa 2 ( $RI = 0,06 \div 0,09$ ) - jest to już wyraźnie zaznaczona rzeźba, obejmuje głównie obszary kotlin przedgórskich oraz wyżyn z niską i średnią rzeźbą (SD wysokości 5 ÷ 30 m) i spadkami ( $< 3^\circ$ );
- Klasa 3 ( $RI = 0,10 \div 0,40$ ) - miejsca z bardzo urozmaiconą rzeźbą: przedgórze i niskie góry, z dużymi lokalnymi różnicami wysokości (SD wysokości 60 ÷ 200 m) i średnimi spadkami (do  $20^\circ$ );
- Klasa 4 ( $RI = > 0,40$ ) - opisuje obszary o najwyższej amplitudzie wysokości (SD wysokości  $> 200$  m), są to krajobrazy wysokogórskie z cechami alpejskimi i pionowymi ścianami skalnymi.

Zaproponowany powyższy podział odnosi się tylko do przebadanych obszarów i ma charakter arbitralny. Zaprezentowane klasy indeksu rzeźby RI są umowne; znacznie ważniejsze są same wartości indeksu RI od 0,05 do 0,40 ( $m/m^2$ ), które pokazują jak zróżnicowana jest rzeźba. Niewątpliwie brakuje tu innych typów rzeźby (np. młodoglacjalnej pagórkowatej i pofalowanej z północnej Polski czy płaskich porozcinanych meandrującymi rzekami nizin środkowej Polski).

#### Indeks rzeźby RI a rozdzielczość modelu i pola podstawowe

Podczas analiz obszaru za pomocą map lub cyfrowych danych wysokościowych, zawsze pojawia się pytanie o skalę opracowania i związaną z nią dokładność. W przypadku pracy z cyfrowymi modelami terenu powinniśmy raczej mówić o rozdzielczości poziomej i dokładności pionowej, które określają precyzję modelu (tj. najmniejszą możliwą do zidentyfikowania formę terenu). Postanowiłem sprawdzić, **czy rozdzielczość modelu i rozmiar pola podstawowego obliczeń znacząco wpływają na wyniki wartości indeksu rzeźby RI**. W tym celu wybrałem obszar testowy (2x2 km) z obszaru

Tatr i przekonwertowałem 1-metrowy model do niższych rozdzielczości: 10x10 m, 25x25 m, 50x50 m (obliczenia wykonałem również dla modelu 100x100 m, ale wyniki okazały się niezadowalające). Wartości indeksu rzeźby RI obliczyłem dokładnie w taki sam sposób dla każdego modelu. Jediną różnicą było wstępne filtrowanie długości poziomic uznanych za błędne: z modelu 10x10 m usunąłem poziomicę o długości  $\leq 31,25$  m, z modelu 25x25 poziomicę  $\leq 78,5$  m, a z modelu 50x50 m poziomicę  $\leq 157$  m. Oczywiście działanie to wpłynęło na uogólnienie obrazu przestrzennego.

Ryc. 8 [A-3] pokazuje, że im wyższa jest rozdzielczość modelu, tym dokładniejsze jest odzwierciedlenie rzeźby. Potwierdzają to dane w tabeli (A-3, Tab. 5), gdzie maksymalne wartości indeksu rzeźby RI wynoszą od 7,5 (1x1 m) do 1,8 (50x50 m). Podobna sytuacja występuje w przypadku pól podstawowych o wymiarach 50x50 m (od 2,4 dla modelu 1x1 m do 1,5 dla modelu 50x50 m). Jednak maksymalne wartości RI są istotne tylko w odniesieniu do małych form terenu. Kiedy spojrzymy na wartości średnie RI, zobaczymy, że kształtują się one na zbliżonym poziomie ( $RI = 0,6 \div 0,7$ ). Oznacza to, że **pomimo różnych rozdzielczości cyfrowych modeli terenu, wartości RI dobrze odzwierciedlają ogólne (tj. przeciętne) zróżnicowanie rzeźby - statystyczny charakter topografii.**

Najlepiej prezentuje się mapa indeksu rzeźby RI obliczona na podstawie modelu 1x1 m (A-3, Ryc. 8A). Na pozostałych trzech rycinach (A-3, 8B-D) występują artefakty. Na rycinach (A-3, 8B i C) występują równoległe jasnoniebieskie poziome i pionowe linie. Ponadto wartości RI są znacznie niższe w miejscach, gdzie powinny być maksymalne (białe strzałki na A-3, 8D). Powyższe błędy są wynikiem zastosowania nieprawidłowego (zbyt małego) rozmiaru pola podstawowego w porównaniu z rozdzielczością używanych modeli. Taka sytuacja nie występuje, jeśli zwiększymy rozmiar pola podstawowego tzn. dostosujemy do rozdzielczości modelu. Należy więc pamiętać, że **rozmiar pola podstawowego służący do obliczeń statystycznych na modelu terenu nie może być mniejszy, niż rozdzielczość pozioma modelu.**

Najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań:

- **Indeks rzeźby RI zapewnia szybki i obiektywny pomiar zróżnicowania rzeźby powierzchni Ziemi** i wydaje się, że można go stosować do szerokiego zakresu sytuacji. Całkowita długość poziomic na powierzchni  $1m^2$  dobrze odzwierciedla charakter powierzchni. Najlepszym modelem wejściowym dla tych obliczeń jest wysokorozdzielczy DEM z danych LiDAR, ze względu na wysoką rozdzielczość pionową i poziomą.
- Wyniki wykonanych obliczeń wykazały, że **istnieje istotna korelacja między indeksem rzeźby RI a rzeźbą lokalną i spadkami**; nie ma natomiast korelacji między RI a krzywiznami poziomymi i indeksem wilgotności TWI. Dla gór zanotowano wysoki i bardzo wysoki współczynnik korelacji pomiędzy RI a rzeźbą lokalną ( $R \approx 0,93$ ); dla pozostałych obszarów umiarkowany, ale istotny: wyżyny  $R \approx 0,52$ , kotliny przedgórskie  $R \approx 0,50$  i niziny  $R \approx 0,45$ . Współczynnik korelacji między RI a spadkami również był wysoki (średnio był niższy o  $0,02 \div 0,19$  niż korelacja z rzeźbą lokalną).

- Dla lepszej interpretacji uzyskiwanych wyników można, a nawet wskazane byłoby wyróżniać klasy indeksu rzeźby RI. W swoich badaniach **wyróżniłem 4 klasy indeksu rzeźby RI, które dobrze opisały analizowane typy reliefu powierzchni.**
- Zbadałem wpływ rozdzielczości cyfrowego modelu terenu na obliczenia indeksu rzeźby RI i stwierdziłem, że **zmiana rozdzielczości modelu skutkuje zmianą szczegółowości przedstawionej rzeźby** (wartości minimalne i maksymalne wskaźnika), natomiast **nie wpływa negatywnie na przeciętne wartości RI i ich rozkład przestrzenny.** Należy przy tym pamiętać, aby dopasować odpowiedni rozmiar podstawowych pól obliczeniowych do rozdzielczości modelu.

Podsumowując, indeks rzeźby RI może być stosowany do szybkiej oceny zróżnicowania morfologii dowolnego obszaru, ponieważ cechuje się prostotą założeń i obliczeń, minimalnymi wymaganiami związanymi z danymi wejściowymi, dobrą korelacją z wysokościami względnymi i spadkami oraz (przez swój ilościowy charakter) umożliwia powtarzalność i łatwe porównywanie wyników obliczeń pomiędzy różnymi obszarami. Dostępność cyfrowych modeli terenu (w tym wysokorozdzielczych z danych LiDAR dostępnych w GUGiKu) są dodatkowym wskazaniem do używania tego wskaźnika w badaniach rzeźby.

W kolejnej pracy [A-4] skupiłem się na **analizie jakości cyfrowego modelu terenu uzyskanego na podstawie digitalizacji map topograficznych** w skali 1:10 000. Wielkoskalowe mapy topograficzne z detaliczną informacją wysokościową (poziomice w cięciu co 1,25 m oraz punkty z przypisaną rzędną) stanowią doskonały materiał do tworzenia cyfrowych modeli terenu w dużej rozdzielczości. Celem przeprowadzonych analiz była ocena jakości tak utworzonego modelu terenu w porównaniu z: a) wolno dostępnymi modelami globalnymi (SRTM, ASTER GDEM, AW3D30, EU-DEM) oraz polskim (DTED-2); b) wysokorozdzielczym modelem referencyjnym pochodzącym z lotniczego skanowania laserowego (ALS).

Przeprowadzone przeze mnie analizy związane z oceną jakości modelu z map topograficznych przebiegały według następujących trzech podstawowych etapów:

1) **wstępnej oceny wizualnej** na podstawie samych map topograficznych (m.in. porównałem przebieg poziomicy wygenerowanych z modelu z oryginalnymi poziomiami z map topograficznych oraz porównałem wysokości odczytane z mapy topograficznej i z modelu terenu dla losowo wygenerowanych 100 punktów kontrolnych),

2) **analizy dokładności wysokościowej** wszystkich cyfrowych modeli terenu. Dokładność pionowa jest jedną z najważniejszych cech modeli wykorzystywanych do badań rzeźby terenu i można ją oceniać za pomocą punktów kontrolnych. Punkty zostały przygotowane zgodnie z zaleceniami Höhle & Höhle (2009), tj. punkty kontrolne powinny być co najmniej trzy razy bardziej dokładne niż oceniane wysokości modelu, rozmieszczone losowo oraz ich liczba powinna być wystarczająco duża w celu uzyskania wiarygodnych miar dokładności. Ponadto Amerykańskie Towarzystwo Fotogrametrii i Teledetekcji (Flood, 2004) zaleca co najmniej 20 punktów kontrolnych w każdej z głównych kategorii

form terenu. W sumie zmierzyłem w terenie 149 punktów kontrolnych za pomocą sprzętu GPS RTK Leica Viva CS10 z dokładnością poziomą 0,01 m i pionową 0,013 m (A-4, Tab. 6). Porównując różnice wysokości, zastosowałem następujące miary statystyczne: średni błąd absolutny (mean absolute error MAE), średnia kwadratowa błędu (root mean square error RMSE) i odchylenie standardowe (standard deviation SD),

3) **szczegółowego porównania ilościowego i statystycznego dokładności wysokościowej i geomorfologicznej** modelu na podstawie map topograficznych z wysokorozdzielczym modelem z danych LiDAR. Oprócz standardowych metod oceny absolutnej dokładności modelu, w geomorfometrii i geomorfologii często bardziej interesują nas parametry powierzchni ziemi. Modele o wysokiej rozdzielczości nie zawsze są najlepszym źródłem do analizy geomorfometrycznej (por. Fisher & Tate, 2006). Nierzadko ważniejsze jest, aby cyfrowy model terenu poprawnie odzwierciedlał rzeczywiste kształty oraz procesy (spływu/osadzania się materiału) na powierzchni Ziemi. Ta cecha określana jest jako „względna” lub „geomorfologiczna” dokładność modelu (por. Wise, 2000). Dokładność geomorfologiczna określa z jednej strony ogólną sytuację topografii danego obszaru, podkreślając najważniejsze cechy reliefu, a z drugiej strony wiernie odtwarza niuanse i szczegóły rzeźby, w zależności od rozdzielczości przestrzennej modelu i wielkości obszaru badań. W tym celu wybrałem najczęściej używane lokalne parametry geomorfometryczne (wysokość, ekspozycje, spadki, krzywizny) i miary statystyczne (relief miejscowy, odchylenie standardowe, itp.). Aby lepiej dopasować oba modele - przekonwertowałem model z danych LiDAR do niższej rozdzielczości, odpowiadającej modelowi z map topograficznych (10x10 m). W ostatnim etapie dokonałem klasyfikacji rzeźby terenu na podstawie obu modeli, dzięki czemu możliwa była realna ocena przydatności modelu z map topograficznych do celów geomorfometrycznych. W oparciu o swoje wcześniejsze doświadczenia (Szypuła & Wieczorek, 2011) posłużyłem się indeksem pozycji topograficznej (topographic position index TPI). Indeks TPI (Fels & Zobel, 1995; Weiss, 2001) to prosty system klasyfikacji rzeźby oparty na różnicy pomiędzy wartością wysokości danej komórki modelu rastrowego a średnią wysokością zdefiniowanego sąsiedztwa wokół tej komórki. Wartości dodatnie oznaczają, że komórka jest położona wyżej niż jej otoczenie (szczyt lub w pobliżu szczytu, wzgórze, grzbiet), natomiast wartości ujemne oznaczają, że leży poniżej (dno doliny, zagłębienie). Wartości indeksu TPI bliskie zera mogą oznaczać obszar płaski lub o jednostajnym nachyleniu.

#### Najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań:

- **Dokładność wysokościowa analizowanego modelu z map topograficznych w rozdzielczości 10x10 m odpowiada dokładności źródłowych map topograficznych (1: 10 000)** ze średnim błędem 1-2 m (-1,68 do +2,06 m, MAE wynosi 0,10 m, RMSE 0,16 m). Wyniki te zostały potwierdzone pomiarami GPS RTK: średni błąd absolutny MAE wyniósł 0,72 m, a błąd średniokwadratowy RMSE i odchylenie standardowe SD <1 m. Następnie porównano je z modelem reperowym z pomiarów LiDAR, gdzie: średni błąd absolutny MAE wyniósł 1,16 m, błąd średniokwadratowy RMSE 1,69 m, a odchylenie standardowe SD 1,83 m.

- **Spośród porównywanych wolno dostępnych modeli najlepszy** pod względem jakości **okazał się model DTED-2**. Maksymalne różnice wysokości nie przekraczały 6 m, podczas gdy średni błąd absolutny MAE wyniósł 1,3 m, a błąd średniokwadratowy RMSE 1,7 m. W przypadku modelu o rozdzielczości 25x25 m są to bardzo dobre wyniki, zwłaszcza jeśli wiadomo, że model DTED-2 powstał z digitalizacji wojskowych map topograficznych 1: 50 000.
- **Model reperowy o rozdzielczości 1x1 m**, nawet przekonwertowany do 10x10 m (downsampling), jest modelem bardzo dobrej jakości i dokładności, ale okazało się, że **jest zbyt szczegółowy dla obszaru wielkości kilkudziesięciu kilometrów kwadratowych**. Miało to szczególnie niekorzystny wpływ na mapy pochodnych parametrów geomorfometrycznych (spadki, krzywizny, ekspozycje) oraz klasyfikacje form terenu. Zbyt duża szczegółowość spowodowała przeładowanie informacji, tym samym mapy wynikowe były nieczytelne.
- **Model z map topograficznych** prawidłowo przedstawił topografię: podkreślił i **odzwierciedlił najbardziej charakterystyczne i dominujące cechy reliefu**. Mapy pochodnych parametrów geomorfometrycznych i klasyfikacji form terenu bardzo dobrze pokazały statystyczny i przestrzenny rozkład rzeźby. Wyniki te potwierdziły znaczenie dokładności geomorfologicznej w analizie geomorfometrycznej, w której **prawidłowe odzwierciedlenie charakteru i wiodących cech morfologii jest ważniejsze niż absolutna dokładność wysokościowa modelu** i jego szczegółowa zgodność z rzeczywistością.
- Powyższe informacje o modelu z map topograficznych są niezwykle istotne, gdy:
  - dla danego obszaru nie ma cyfrowego modelu terenu o wysokiej rozdzielczości (np. z danych ALS), ale istnieją mapy topograficzne, których można użyć do utworzenia modelu – taki model będzie wiarygodny i dokładny;
  - istnieje potrzeba stworzenia cyfrowego modelu terenu danego obszaru na podstawie historycznych map topograficznych i porównania go z modelem współczesnym, jest to ważne podczas badania obszarów silnie przekształconych przez człowieka w ciągu ostatnich dziesięcioleci;
  - model z map topograficznych może być wykorzystywany jako wiarygodne dane do redukcji błędów w ogólnie dostępnych modelach (np. dla niektórych obszarów w Polsce globalny model SRTM ma wiele błędów).

Przedmiotem badań, których wyniki zaprezentowano w artykule [A-5] była **geomorfometryczna klasyfikacja rzeźby** obszaru Wyżyny Śląskiej o zróżnicowanym reliefie strukturalnym z naprzemianległymi długimi progami typu kuesty i szerokimi zagłębieniami erozyjno-denudacyjnymi wypełnionymi osadami czwartorzędowymi, w dużej mierze wodnolodowcowymi. W tym celu posłużono się **metodą k-median** (zidentyfikowano klastry z obiektami o podobnych cechach matematycznych), a następnie na bazie obliczonych klastrów dokonano klasyfikacji rzeźby. W pierwszym kroku dokonano przekształcenia cyfrowego modelu terenu DTED-2 z wartości całkowitych na rzeczywiste, zgodnie z propozycją Urbańskiego (2012). W rezultacie otrzymano nowy, poprawny hydrologicznie model o rozdzielczości 20×20 m. Następnie obliczono cztery podstawowe parametry morfometryczne: spadki, ekspozycje oraz krzywizny poziome i pionowe. Ponadto wyliczono rzeźbę

lokalną (wysokości względne) w podziale 5x5 komórek modelu (100x100 m), ponieważ ten rozmiar najlepiej oddaje naturalną amplitudę topografii dla obszaru tej wielkości (zob. Szypuła, 2007). Dla wszystkich zmiennych morfometrycznych (z wyjątkiem ekspozycji) zastosowano filtr medianowy, aby usunąć losowo izolowane wartości skrajne. Jeśli chodzi o ekspozycję, nie można było zastosować regularnej funkcji mediany ze względu na kierunkowy charakter ekspozycji (od 0 do 360 stopni). Zamiast tego obliczono wektor średni. Ta filtracja nie miała żadnego wpływu na rozkład statystyczny danych. Rezultatem tych przekształceń był zestaw warstw, które następnie podlegały ostatecznemu klastrowaniu (grupowaniu). Klastrowanie to proces umieszczania podobnych typów danych w klastrach (grupach) przy użyciu przyjętych miar fizycznych lub ilościowych (Larose, 2005). Jedną z metod grupowania są  $k$ -mediany, które są modyfikacją popularniejszej metody  $k$ -średnich. **Celem grupowania danych metodą  $k$ -median jest rozdzielenie danych na odrębne klastry w oparciu o różnice w danych przy użyciu median, jako miar każdego centrum podzbioru.** Metoda  $k$ -median, w przeciwieństwie do  $k$ -średnich, jest odporna na wartości odstające, przez co daje zwarte klastry. Dane ilościowe opisujące rzeźbę i parametry morfometryczne bardzo rzadko mają charakter symetryczny (zob. Evans, 1972; Evans & Cox, 1999). Dlatego do wielowymiarowego grupowania parametrów morfometrycznych wybrano metodę  $k$ -median z systemem metrycznym Manhattanu. Wszystkie zmienne miały taką samą wagę przy ocenie odległości od centrum klastra, a więc wartości były standaryzowane przy użyciu odchylenia standardowego. Każda obserwacja była sześciowymiarowym wektorem sześciu przefiltrowanych zmiennych morfometrycznych dla każdej komórki modelu terenu. Analizę skupień przeprowadzono przy użyciu oprogramowania specjalnie przygotowanego do tej operacji.

Z powodu „wrażliwości” wyników operacji obliczeniowych na ustawienia parametrów wejściowych postanowiono przed obliczeniami dla całej Wyżyny Śląskiej przeprowadzić wstępne kalkulacje w różnych wariantach dla małych obszarów testowych (5 podobszarów 2x2 km reprezentujących różne rodzaje rzeźby). Pozwoliło to na wybranie optymalnych ustawień obliczeniowych, które dałyby najlepsze wyniki. Postanowiono zastosować grupowanie na 4, 6 i 8 klastrów (A-5, Tab. 3). We wszystkich eksperymentach korzystano z tych samych zmiennych morfometrycznych, ale były one definiowane przez różne ustawienia parametrów wejściowych. Ze względu na wysoki poziom mozaikowania (szumy tła) na mapach wyjściowych, zastosowano różne typy filtrowania (mediana, statystyki ogniskowe, statystyki blokowe). Dla każdego z 7 nazwanych eksperymentów stworzono kilkanaście alternatywnych wariantów obliczeniowych.

**Najlepsze wyniki uzyskano przy ustawieniach eksperymentu nr 5.** Wyznaczone klastry prawidłowo odzwierciedlały morfologię pól testowych dla 4 i 6 klastrów. Podział na 8 klastrów był wątpliwy - w niektórych częściach wyglądał lepiej niż podział na 6 klastrów, w innych znacznie gorzej, ale finalnie postanowiono wykonać obliczenia dla wszystkich trzech podziałów (4, 6 i 8 klastrów). Ponadto zauważono, że **stosowanie filtrowania medianowego skutecznie usuwa szumy tła.** Ponadto lepsze wyniki uzyskano, gdy mediana okna filtrowania była tego samego rozmiaru, co okno analizy podstawowej (w eksperymencie 5 mamy ten sam rozmiar komórek 7x7). Jest to prawdopodobnie matematyczna konsekwencja zastosowanego rozmiaru okna analizy.

### Klasyfikacja rzeźby w świetle metody *k*-median

Wyniki klasyfikacji rzeźby terenu Wyżyny Śląskiej opisano dla każdego klastra (A-5, Tab. 4). Aby zdefiniować wyróżnione w klastrach formy terenu, zastosowano pozycję topograficzną wg Speighta (1990) oraz dodatkowo najnowszą mapę geomorfologiczną (Jania i in., 2014), która obejmowała około 20% badanego obszaru.

Trzeba pamiętać, że klastry o tej samej nazwie (A, B, C, itd.), ale w różnych podziałach (4, 6, 8 klastrów) nie odpowiadają sobie dokładnie, (np. klastr B w obrębie podziału na 4 klastry nie jest identyczny z klastrem B w obrębie podziału na 6 lub 8 klastrów). Klastry te mogą być do siebie podobne, ale nigdy nie będą dokładnie takie same ze względu na różnice w metodzie obliczania podobieństwa (tzn. podobieństwo jest definiowane inaczej dla mniejszej liczby klastrów niż dla większej).

Niezależnie od liczby klastrów **zastosowanie metody *k*-median poprawnie sklasyfikowało formy rzeźby Wyżyny Śląskiej**; odzwierciedliło główne cechy morfologiczne badanego obszaru, a przeprowadzone obliczenia pozwoliły na przedstawienie relacji przestrzennych (A-5, Ryc. 4, 5, 6) i ich cech ilościowych (A-5, Tab. 4). Choć klastry składają się z różnych form terenu, **każdy klastr jest zbiorem fragmentów obszaru badań o podobnych właściwościach matematycznych**, które wynikały z obliczonych zmiennych.

### Najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań:

- **Wyniki klasyfikacji form rzeźby metodą *k*-median prawidłowo pokazują ogólne zróżnicowanie morfologii Wyżyny Śląskiej.** Ze względu na rozdzielczość przestrzenną modelu (20×20 m) klasyfikacja ta odpowiada skali mapy 1:25.000-1:50.000. Mniejsza liczba klastrów (4) wyraźnie pokazuje kluczowe elementy rzeźby obszaru. Podział na 6 klastrów zachowuje wyraźny obraz i zapewnia więcej szczegółów zróżnicowania morfologicznego poprzez rozróżnienie charakterystycznych elementów form terenu (np. strome zbocza o ekspozycji NE, osie małych dolin, wcięcia erozyjne, itp.). Wyniki dla 8 klastrów powodują znaczny szum informacyjny i są niejednoznaczne (tj. podobne formy terenu znalazły się w różnych klastrach), co utrudnia ich identyfikację. Niestety wyniki *k*-median nie dały się dobrze porównać z danymi geologicznymi, ponieważ mają one charakter jakościowy.
- **Zastosowanie ekspozycji, jako jednej ze zmiennych morfometrycznych w analizie rzeźby metodą *k*-median jest uzasadnione**, ponieważ **skutkuje bardziej uporządkowanym i spójnym przestrzennie obrazem form terenu** (szczególnie w przypadku podziału na 6 i 8 klastrów). Dla badań Wyżyny Śląskiej dobrze sklasyfikowane zostały nachylenie terenu na NE i przebieg najważniejszych wzniesień (długich grzbietów) o przebiegu NW-SE. Z geomorfologicznego punktu widzenia - włączenie ekspozycji do obliczeń zapewnia pełniejszy obraz morfologii badanego obszaru.
- **Porównanie wyników klasyfikacji rzeźby metodą *k*-median z metodą indeksu TPI dało ogólnie podobny obraz przestrzenny** - kluczowe elementy morfologii zostały dobrze odzwierciedlone. Analiza przeprowadzona metodą TPI pokazała bardzo uproszczony obraz

rzeźby, wiele niuansów lub szczegółów morfologii zostało pominiętych. Jednak dla wnikliwego geomorfometry, posługującego się cyfrowym modelem terenu wysokiej rozdzielczości, **metoda *k*-median okazała się lepiej różnicować badaną rzeźbę**. Klasyfikacja ukształtowania terenu jest wyraźnie lepsza, szczególnie w przypadku mniej widocznych form (łagodne zbocza i niższe stoki) lub form ukrytych w większych formach (małe dna dolin i linie ciekowe oraz nacięcia między grzbietami).

- **Wyniki obliczeń uzyskane za pomocą metody *k*-median dla 4 klastrów są zgodne z obrazem hipsometrycznym Wyżyny Śląskiej** i nie pozostawiają wątpliwości, co do wyróżnionych form terenu. **Porównanie** tych danych **z klasycznymi mapami geomorfologicznymi** 1:50 000 -1:100 000 (Klimaszewski, 1959; Jania i in., 2014) oraz ze szczegółowym podziałem na regiony geomorfologiczne w skali 1:100 000 (Karaś - Brzozowska, 1960) **wykazuje dużą zgodność**. Mimo, że metoda *k*-median odnosi się do kształtu i pomiarów kształtów terenu (określonych przez zmienne) - zarys klastrów odpowiada wyżej wspomnianym mapom geomorfologicznym.
- Metoda *k*-median jest analizą wielowymiarową. Zasada takiej analizy polega na jednoczesnym badaniu całego zestawu danych. Te informacje i obserwacje dostarczają dowodów, że dla tych samych ustawień i **przy zastosowaniu metody *k*-median ostateczne wyniki zależą w dużej mierze od zakresu i ilości analizowanych danych**. Ważne jest, aby w badaniach uwzględniono całą jednostkę geomorfologiczną (w tym przypadku Wyżynę Śląską), a nie tylko wybraną część, ponieważ metoda *k*-median jest wrażliwa na parametry wejściowe, a wyniki mogą nie być zadowalające i jednoznaczne. Aby zmaksymalizować poprawność wyników, należy wybrać rozmiar badanego obszaru, aby był reprezentatywny dla danych form terenu, które mają być wyróżniane. Taka procedura pozwala uchwycić jednorodność geomorfologiczną badanego obszaru.
- Podczas **stosowania metody *k*-median wraz ze zmniejszeniem rozmiaru okna filtrującego zwiększa się stopień dokładności klasyfikacji i odwrotnie**. Należy jednak pamiętać, że zbyt małe okno filtrowania nie rozpoznaje dużych form terenu. Po różnych próbach i eksperymentach wydaje się, że dla tak dużego obszaru, jakim jest Wyżyna Śląska (6500 km<sup>2</sup>) najbardziej optymalny rozmiar okna filtrującego wynosi nie mniej niż 7×7 komórek cyfrowego modelu terenu o rozdzielczości 20×20 m.
- Metoda *k*-median ma podkreślone powyżej zalety (ilościowy charakter, powtarzalność, obiektywność i minimalne wymagania dotyczące danych wejściowych), jednakże należy brać także pod uwagę jej ograniczenia (jakość danych wejściowych, zasięg powierzchni, ustawienia wejściowe). Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, **że metoda *k*-median jest szybkim narzędziem matematycznym do grupowania form terenu** (kompleksów form terenu) w klastry (grupy) o podobnych właściwościach morfograficznych (kształtach) i morfometrycznych (wymiarach), które poprawnie odzwierciedlają rzeźbę obszaru. Dzięki temu można ją wykorzystywać w badaniach geomorfologicznych.

Ostatni artykuł wchodzący w skład dzieła [A-6] zajmuje się zagadnieniem **jakości cyfrowych modeli terenu oraz ortofotomozaik** tworzonych **na podstawie danych z bezzałogowych statków**



**powietrznych** (UAV). Wysokorozdzielcze zdjęcia z systemów UAV są świetnym materiałem, na podstawie którego w stosunkowo łatwy i szybki sposób można utworzyć cyfrowy model terenu, cyfrowy model powierzchni terenu czy ortofotomapę/ortofotomozaikę. Duża rozdzielczość materiału wejściowego z jednej strony oraz objęcie zainteresowaniem obszaru o dużym zasięgu z drugiej powodują, że systemy bezzałogowych statków powietrznych szereguje się pomiędzy kosmicznymi systemami teledetekcyjnymi, a szczegółowymi pomiarami terenowymi. Jakość produktu końcowego (model terenu, ortofotomapa) zależą od wielu zmiennych, m.in. rozdzielczości zdjęć, zastosowanego czujnika wielo- albo hiperspektralnego, warunków oświetleniowych, rodzaju fotografowanej powierzchni, pokrycia poprzecznego i podłużnego zdjęć, itd. Jeśli jednak mówimy o zwiększaniu dokładności wynikowych modeli zwykle stosuje się: 1) kontrolne punkty naziemne (ground control points), zmierzone za pomocą sprzętu klasy GPS RTK i wykorzystanie ich podczas wstępnego przetwarzania danych; 2) połączenie z systemami skaningu naziemnego (TLS) lub 3) stosuje się system z czujnikiem LiDAR podwieszanym pod statek powietrzny (niestety te systemy są wciąż bardzo drogie). Znając typowe potrzeby i zakres dokładności danych, jakie wykorzystuje się w naukach o ziemi **za cel badań postawiłem sobie sprawdzenie jaka jest matematyczna dokładność modeli i ortofotomozaik uzyskanych na podstawie danych z nalotów UAV**. Dokładność przeanalizowano tu w kontekście pionowym (obliczonym w odniesieniu do danych ze skaningu lotniczego ALS) oraz poziomym (obliczonym na bazie wysokorozdzielczych referencyjnych ortofotomap). Modele i ortofotomozaiki postanowiono utworzyć najprostszą metodą, tzn. bez namierzania naziemnych punktów kontrolnych. Naloty przeprowadzono w 21 obszarach testowych Wyżyny Katowickiej o zróżnicowanej rzeźbie, z różnicami wysokości przekraczającymi 35 m (dla cyfrowych modeli terenu) i ponad 60 m (dla cyfrowych modeli powierzchni terenu).

Analiza relacji wysokościowych pomiędzy modelami uzyskanymi z nalotów UAV a modelami referencyjnymi (z lotniczego skaningu laserowego ALS) wykazała, że są one bardzo podobne. Wysokości minimalne dla modeli UAV i modeli ALS średnio różnią się między sobą o 2,5 m; średnie różnice wysokości maksymalnych dla tych samych modeli wynoszą 3,1 m, natomiast wysokości średnie różnią się między sobą o 2,4 m. Pokazuje to zakres różnic wysokości (błędu) związany z wartościami minimalnymi i maksymalnymi. **Wartości odchylenia standardowego dla modeli UAV i modeli ALS są bardzo zbliżone**, co potwierdza duże podobieństwo w rozkładzie odległości od wartości średniej oraz zmienności wartości wysokości w samym zbiorze danych. Ponadto **obraz przestrzenny rzeźby powierzchni ukazuje dużą zgodność detali topograficznych dla wszystkich testowanych obszarów**. Jedyne różnice jakie występują związane są z niedoskonałym odfiltrowywaniem zwykle obszarów zadrzewionych, budynków, kominów, linii wysokiego napięcia, mostów, itp.

Do porównań wartości pomiędzy modelami posłużono się standardowymi narzędziami statystycznymi, tj. średnią kwadratową błędu (odchylenie od wartości dokładnej – RMSE root mean square error) oraz średnim błędem absolutnym (MAE mean absolute error). Dla cyfrowych modeli terenu wartości MAE i RMSE tylko w jednym przypadku przekroczyły 10 m, natomiast większość nie przekroczyła 2 m, ze średnią wartością dla wszystkich obszarów testowych 2,7 m (A-6, Tab. 3). **Wartości RMSE są nieznacznie większe niż MAE, co sugeruje, że znakomita większość błędów**

posiada tą samą wartość (Everitt, 2010). Wartości MAE i RMSE dla cyfrowych modeli powierzchni terenu wyglądają bliźniaczo, więc ogólny rozkład błędów dla wszystkich testowanych obszarów jest bardzo podobny. **Różnice występują tylko w wartościach skrajnych, które jednak nie mają istotnego wpływu na cały zbiór danych** (można je traktować jako tzw. wartości odstające), ponieważ wartości przeciętne (MAE i RMSE) są niemal identyczne jak dla cyfrowych modeli terenu (A-6, Tab. 3, Ryc. 5). Generalnie można powiedzieć, że **średnia dokładność wysokościowa modeli na bazie pomiarów UAV wynosi 2,7-2,8 m**. Wartości MAE są niemal identyczne z wartościami RMSE, co wskazuje, że większość błędów w modelach ma zbliżone wartości (zbiór z wartościami błędów jest statystycznie mało zróżnicowany). Potwierdzają to dodatkowo modele różnicowe (A-6, Ryc. 4, 5).

Ostatnim wskaźnikiem wykorzystanym do oceny dokładności wysokościowej w ujęciu przestrzennym był **indeks zgodności wyników** (zaproponowany wcześniej w pracy Szypuła, 2016). Zgodność wyników pokazuje ile procent analizowanego modelu jest zgodna z modelem reperowym na zasadzie porównywania komórka po komórce obu modeli. Indeks ten bazuje na modelach różnicowych i poprzez swój charakter (przedziały wartości) niejako generalizuje obraz błędów wysokości, sprawiając że model różnicowy staje się bardziej czytelny przestrzennie. Z drugiej strony prezentuje on zestawienie ilościowe – tj. procentowy udział powierzchni, jakie zajmują poszczególne przedziały wartości błędów. Okazało się, że miejsca, w których **błędy wysokości** są najmniejsze (przedział **od -0,5 m do +0,5 m**) **średnio dla wszystkich 21 obszarów testowych zajęły 21%**. Jeśli zakres najmniejszych błędów wysokości rozszerzyliśmy od -1 m do +1 m, to w sumie objął on średnio 41% powierzchni każdego modelu. Największą powierzchnię (52%) zajęły błędy powyżej +1 m. Znaczący to, że przeciętnie połowa powierzchni każdego utworzonego modelu jest 1 m lub więcej powyżej rzeczywistej powierzchni terenu. Obszary o błędzie -1 m i niższe zajęły średnio niecałe 17%.

Ciekawie natomiast wyglądał rozkład przestrzenny wartości wskaźnika indeksu zgodności wyników. Po pierwsze dominowały powierzchnie zajęte przez największe błędy dodatnie, o czym była mowa powyżej. Po drugie – **błędy często rozkładały się koncentrycznie, w postaci okręgów ze środkiem w centrum obszaru** (A-6, Ryc. 6) Błędy wysokości rozkładające się w okręgi związane były z obszarami płaskimi lub nieznacznie nachylonymi, zwykle zaoranymi polami, niskimi łąkami, itp. Obszary wyraźnie nachylone lub zupełnie płaskie (np. parking) – w większości posiadały błędy dodatnie powyżej 1 m. Natomiast **obszary łąk z wysokimi trawami cechował największy chaos**, jeśli chodzi o rozkład różnic wysokości. **Mimo tego okazały się to najbardziej dokładne modele** - przedział błędu od -0,5 do +0,5 m zajął na nich największy udział (34-47%).

Do przeanalizowania dokładności poziomej (błędów przesunięcia) posłużono się wysokorozdzielczymi ortofotomapami referencyjnymi (5x5 cm). Dla każdego obszaru testowego, na każdej parze obrazów wybrano od 10 do 30 charakterystycznych, jednoznacznie zidentyfikowanych punktów i zmierzono różnicę ich położenia. W sumie zmierzono 371 punktów, w których wartości przesunięcia, które wahały się od 0,18 m do ponad 5 m, średnio wyniosły 2,1 m (A-6, Tab. 6).

Jeśli chodzi o przestrzenny rozkład błędów przesunięcia, to najmniejsze średnie wartości zanotowano dla obszarów 1, 3, 18 i 21 (1,1 – 1,5 m; A-6, Tab. 6). O ile dla obszarów 1 i 18 jest to związane z występowaniem najmniejszych błędów wysokościowych, o tyle dwa pozostałe obszary (18

i 21) cechują się błędami dodatnimi wysokości na całej powierzchni (zob. A-6, Ryc. 6, 7 i Tab. 4, 5). Analizując mapy błędów przesunięcia wszystkich testowanych obszarów (A-6, Ryc. 7) trudno jest zauważyć jakąś przestrzenną prawidłowość – bez względu na pokrycie powierzchni czy rzeźbę terenu.

#### Najważniejsze wnioski z przeprowadzonych badań:

- **Średnia dokładność wysokościowa** wszystkich utworzonych modeli terenu **wyniosła około 2,8 m**. Dokładność +/- 1 m objęła swym zasięgiem średnio 41% powierzchni każdego modelu, natomiast przeciętnie połowa powierzchni każdego modelu miała zawyżone wartości wysokości o 1 m lub więcej. Mimo tego przestrzenny **obraz rzeźby powierzchni w utworzonych modelach ukazuje dużą zgodność detali topograficznych z rzeczywistością**. Jedyne różnice jakie występują związane są z elementami infrastruktury (kominy, linie wysokiego napięcia, budynki) lub obszarami z roślinnością średnią (krzewy) i wysoką (drzewa), które często są niewłaściwie filtrowane podczas tworzenia ortofotomozaik.
- Jeśli chodzi o **dokładność poziomą**, to uzyskane wartości przesunięcia średnio wynosiły od 1,1 m do 3,6 m (**średnia wartość ze wszystkich pomiarów wyniosła 2,1 m**). Co ciekawe - podczas analizy okazało się, że ortofotomozaiki z danych UAV mają zdecydowanie lepszą jakość odnośnie identyfikacji szczegółów, niż ortofotomapy referencyjne tej samej rozdzielczości (5x5 cm). Okazało się również, że **szybka georeferencja ortofotomozaik z danych UAV kilkakrotnie poprawiła ich dokładność poziomą**, co może być prostą i szybką metodą znacznej poprawy jakości danych UAV pod warunkiem dostępności wysokorozdzielczych ortofotomap.
- Porównując modele uzyskane z pomiarów UAV z modelami utworzonymi na podstawie digitalizacji map topograficznych (por. Szypuła, 2019) można stwierdzić, że ich dokładność jest zbliżona (modele z map topograficznych mają dokładność wysokościową < 2m). Może to mieć ważne znaczenie w momencie analiz porównawczych rzeźby z różnych okresów czasu, kiedy tworzone są modele na podstawie archiwalnych map topograficznych.

#### **Podsumowanie**

Opisane powyżej badania opublikowałem jako serię sześciu artykułów powiązanych tematycznie i składających się na osiągnięcie naukowe zatytułowane: „**Ocena jakości i zastosowanie cyfrowych modeli terenu do geomorfometrycznych analiz rzeźby powierzchni**”. Osiągnięcie, w przeważającej części, ma charakter aplikacyjno-metodyczny (publikacje A-1, A-2, A-3, A-4, A-6), co wynika z istoty podjętych badań, ale nie zabrakło tu również klasycznego podejścia geomorfologicznego, którego celem była klasyfikacja form rzeźby Wyżyny Śląskiej (publikacja A-5). Przeprowadzone przeze mnie badania i wyniki uzyskane w omawianym cyklu prac można następująco podsumować:

**1)** potwierdziłem, że zastosowanie odpowiedniej metody interpolacji istotnie wpływa na uzyskiwane rezultaty (obraz przestrzenny modelu terenu). Wskazałem, że większość metod interpolacyjnych

„rozciąga” rzeźbę w profilu pionowym (wzmacnia relief), natomiast metoda Spline generalnie niweluje nieznacznie wartości maksymalne i minimalne (wygładza rzeźbę). Wykazałem, że (spośród analizowanych) tylko metody naturalnego sąsiedztwa i krigingu nie tworzą artefaktów. Większość technik interpolacji tworzy modele poprawnie charakteryzujące rzeźbę w ujęciu statystycznym, w tym bardzo dobrze odzwierciedlane są ekspozycje (różnice do 3,5%). Ponadto moje analizy wykazały, że aby utworzyć model terenu prawidłowo odzwierciedlający obszar o umiarkowanej rzeźbie, wystarczy zestaw punktów wysokościowych rozmieszczonych regularnie na całym obszarze badań w odstępach  $\leq 100$  m; taki model cechuje się dokładnością odpowiadającą mapie w skali 1:10.000-1:25.000.

**2) zaproponowałem wskaźnik „indeks rzeźby” RI**, który zapewnia obiektywną miarę ilościowej zmienności rzeźby, jako ważnej cechy w badaniach geomorfologicznych, a ponadto cechuje się prostotą założeń i obliczeń oraz minimalnymi wymaganiami związanymi z danymi wejściowymi. Wykazałem, że dla tego wskaźnika istnieje silna korelacja z wysokościami względnymi i spadkami. Wyróżnione przeze mnie klasy indeksu rzeźby RI dobrze scharakteryzowały analizowane typy reliefu powierzchni. Udowodniłem, że zmiana rozdzielczości modelu skutkuje zmianą szczegółowości przedstawionej rzeźby (wartości minimalne i maksymalne wskaźnika), natomiast nie wpływa negatywnie na przeciętne wartości indeksu rzeźby RI i ich rozkład przestrzenny. Zwróciłem uwagę również na to, że kluczową kwestią metodyczną pozostaje odpowiedni rozmiar podstawowych pól obliczeniowych w stosunku do rozdzielczości poziomej modelu.

**3) dokonałem oceny jakości cyfrowego modelu terenu uzyskanego na podstawie digitalizacji map topograficznych i udowodniłem, że prawidłowo przedstawił on morfologię:** podkreślił i odzwierciedlił najbardziej charakterystyczne i dominujące cechy reliefu. Mapy pochodnych parametrów geomorfometrycznych i klasyfikacji form terenu bardzo dobrze pokazały statystyczny i przestrzenny rozkład rzeźby, a wyniki analiz dokładności wysokościowej wykazały błąd rzędu 1-2 m. Potwierdziłem w ten sposób, że mapy topograficzne mogą być bardzo wydajnym źródłem do tworzenia wiarygodnych i dokładnych cyfrowych modeli terenu przydatnych do badań geomorfologicznych czy analiz porównawczych materiałów historycznych.

**4) wykonałem geomorfometryczną klasyfikację rzeźby** obszaru wyżynnego średnich szerokości geograficznych **przy zastosowaniu metody k-median** w podziale na 4, 6 i 8 klastrów. Po porównaniu wyników z metodą topograficznego indeksu pozycji wykazałem, że klasyfikacja rzeźby metodą *k*-median jest wyraźnie dokładniejsza, szczególnie w przypadku mniej widocznych form lub form ukrytych w większych formach. Skuteczność metody *k*-median potwierdziły wyniki obliczeń w podziale na 4 klastry. Okazały się one zgodne z obrazem hipsometrycznym obszaru i nie pozostawiły wątpliwości, co do wyróżnionych form terenu, a porównanie z klasycznymi mapami geomorfologicznymi i szczegółowym podziałem na regiony geomorfologiczne wykazało dużą zgodność wyników. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że metoda *k*-median jest szybkim narzędziem do grupowania form terenu w klastry o podobnych właściwościach morfograficznych i morfometrycznych, które poprawnie odzwierciedlają rzeźbę obszaru.

**5) zbadałem jakość cyfrowych modeli terenu**, cyfrowych modeli powierzchni terenu oraz ortofotomozaik **utworzonych z danych UAV**; obliczona bezwzględna dokładność pionowa wyniosła średnio 2,8 m, natomiast dokładność pozioma 2,1 m. Stwierdziłem także dużą zgodność modeli UAV z

danymi reperowymi, co pozwala wykorzystywać te modele w naukach o ziemi z założonym progiem dokładności.

Podsumowując mogę stwierdzić, że wyniki moich badań mogą być wykorzystane do cyfrowej charakterystyki parametrów rzeźby różnych badanych obszarów (indeks rzeźby RI), wspomóc kartowania geomorfologiczne (automatyzacja procesu przez zastosowanie analizy *k*-median) czy przyczynić się do powszechniejszego korzystania z wielkoskalowych map topograficznych i nalotów bezzałogowymi systemami powietrznymi, jako źródeł danych wysokościowych do tworzenia cyfrowych modeli terenu i analiz geomorfometrycznych. Ponadto moja współpraca z badaczami z innych specjalności (biologia, historia i archeologia, studia krajobrazowe i inne) uświadamia mi, jak ważnym elementem w badaniach środowiska są cyfrowe modele terenu, czy szerzej – wysokorozdzielcze dane przestrzenne. Współczesne badania środowiska przyrodniczego mają coraz częściej charakter interdyscyplinarny i nie mogą się obyć bez szczegółowej analizy przestrzennej, która powinna opierać się o dane jak najlepszej jakości.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.

Już podczas studiów magisterskich zainteresowałem się nowymi narzędziami badawczymi dostępnymi w naukach o ziemi – Systemami Informacji Geograficznej (GIS). Zaowocowało to pracą magisterską, w której posłużyłem się oprogramowaniem ArcView GIS, w celu wykonania analizy zależności pomiędzy podstawowymi komponentami środowiska geograficznego projektowanego Ogrodu Botanicznego w Mikołowie Mokrem.

Po uzyskaniu tytułu magistra geografii podjąłem pracę na Wydziale Nauk o Ziemi w Katedrze Geomorfologii na stanowisku asystenta, co pozwoliło mi wdrożyć się w rytm pracy akademickiej oraz dało impuls do rozpoczęcia działań związanych z przyszłym doktoratem. W roku 2001 rozpocząłem studia doktoranckie, podczas których rozwijałem swoje zainteresowania związane z nowoczesnymi narzędziami i technikami badawczymi. Efektem tego była rozprawa doktorska (obroniona w 2007 r.), w której podjąłem tematykę strukturalności rzeźby Wyżyny Śląskiej w oparciu o metody terenowe (badanie odporności skał młotkiem Schmidta) oraz techniki kameralne z użyciem nowoczesnych narzędzi (geostatystyka, cyfrowe modele terenu i techniki GIS).

Na początku, w trakcie trwania i po doktoracie, w kręgu moich zainteresowań naukowych dominowała **geomorfologia strukturalna i kartograficzne metody prezentacji danych**. Pokłosem prac nad doktoratem były artykuły oraz udział w kilku konferencjach (2004-2010), w których sprawozdawałem wyniki dysertacji. Z jednej strony zajmowała mnie rzeźba strukturalna Wyżyny Śląskiej i związane z nią kwestie odporności skał na wietrzenie tj.: skala odporności i pomiar odporności skał metodą młotka Schmidta (Szypuła, 2009). Z drugiej strony interesowały mnie **kartograficzne metody wizualizacji danych** i możliwości drzemiące w narzędziach oprogramowania GIS (Szypuła, 2008). Do tej tematyki powróciłem w jednym ze swoich późniejszych artykułów (Szypuła, 2013), w którym przeanalizowałem wpływ kształtu i wielkości podstawowego pola analizy, na wizualizację i ocenę wyników na przykładzie liniowych form antropogenicznych. Najlepszym kształtem pola podstawowego, spośród analizowanych, okazał się heksagon (sześciobok) – jako

najlepiej oddający relacje przestrzenne (te same odległości do środków wszystkich sześciu sąsiadów), mimo, że rzadko jest wykorzystywany w analizach, z racji powszechności użycia kwadratów.

Okolo 2009 zacząłem pogłębiać swoje zainteresowania **geomorfometrią i cyfrowymi modelami terenu**, jako głównym źródłem danych do badań oraz ich wizualizacji (Szypuła, 2010). Zająłem się wtedy po raz pierwszy kwestią ilościowej i obiektywnej klasyfikacji rzeźby terenu na podstawie cyfrowych modeli terenu (Szypuła, Wieczorek, 2011). Zastosowałem metodę topograficznego indeksu pozycji (*Topographic Position Index* TPI) zaproponowaną przez Weissa (2001) do prostej klasyfikacji rzeźby dla fragmentu Wyżyny Śląskiej. Wskaźnik TPI porównuje wysokości każdej komórki w cyfrowym modelu terenu do średniej wysokości określonego sąsiedztwa wokół tej komórki. W efekcie uzyskiwany jest obraz różnic wysokości względnych pomiędzy analizowanymi pikselami modelu terenu, a dzięki następnym etapom przetwarzania - klasyfikacja rzeźby terenu.

Obszar Wyżyny Śląskiej, który od początku leży w kręgu moich zainteresowań naukowych jest mocno naznaczony działalnością człowieka. Spowodowało to zajęcie się przeze mnie tematyką **rzeźby antropogenicznej** obecnej powszechnie na Wyżynie Śląskiej. Celem prac (Szypuła, 2011, 2014) była ilościowa i przestrzenna analiza wybranych elementów rzeźby antropogenicznej południowej części Wyżyny Śląskiej. Wyniki pracy (Szypuła, 2011) wykazały, że w przedziale czasowym 1881-1995 zaznaczył się wyraźny wzrost antropoforn. Na uwagę zasługuje współczesna ogromna liczba różnych cieków powierzchniowych i związanych z nimi wcięć oraz nowopowstałych zbiorników wodnych, natomiast największymi elementami wyróżniającymi się w krajobrazie są bez wątpienia różnej wielkości i kształtu zwałowiska (mimo iż są one coraz częściej ostatnio likwidowane) oraz wyrobiska.

Kontynuacją tych prac był kolejny artykuł (Szypuła, 2014), gdzie potwierdziłem, że ogólna tendencja w całkowitej długości i powierzchni wszystkich antropogenicznych form terenu wciąż rośnie, w wyniku stałej aktywności człowieka na tym gęsto zaludnionym obszarze. Zmieniła się struktura ilościowa antropogenicznych form terenu: całkowita liczba form znacznie się zmniejszyła (wyłączając zbiorniki wodne), ale średnie długości i ich powierzchnie - podwoiły się (np. składowiska w wyniku nagromadzenia materiału). Ponadto wartości odchylenia standardowego i rozkładu częstotliwości wykazały dużą zmienność ilościową, tzn. nie ma dominujących form o podobnej wielkości, za to występuje dyspersja ilościowa.

Niewątpliwym sukcesem, jeśli chodzi o rozpoznanie i zdefiniowanie na nowo form rzeźby antropogenicznej był mój aktywny udział w latach 2013-2014 w grupie eksperckiej, która opracowała warunki techniczne wykonania kartograficznych opracowań tematycznych w postaci cyfrowych map geomorfologicznych. Wymagało to od naszego zespołu nowego zdefiniowania wcześniej nierzejstrowanych antropoforn (np. zrównań antropogenicznych – *anthropogenic flats*). Efektem finalnym było stworzenie przez nas arkusza **Cyfrowej mapy geomorfologicznej Polski 1:100 000, Katowice** (Jania i inni, 2014), na którym ujęliśmy aktualny stan rzeźby powierzchni – w tym, silnie zaznaczonej rzeźby antropogenicznej fragmentu Wyżyny Śląskiej.

Ponadto, wraz z nieocenioną pomocą grupy naszych studentów, zdigitalizowaliśmy 20 arkuszy archiwalnej Mapy Geomorfologicznej GOP (wydanej w 1959 r. pod redakcją

M.Klimaszewskiego). Utworzyliśmy w ten sposób geobazę opisującą rzeźbę powierzchni centralnej części Wyżyny Śląskiej wraz z uwzględnionymi formami antropogenicznymi, co było niezwykle w tamtym okresie. Rezultatem tych wysiłków stała się finalnie opracowana przeze mnie i wydana w wersji cyfrowej **Mapa geomorfologiczna GOP** (Szypuła red., 2017). Ponadto część tych danych już wcześniej posłużyła do czasowej i ilościowej analizy zmian w rzeźbie antropogenicznej (Szypuła, 2011, 2014). Mapa została także bardzo pozytywnie oceniona przez czterech recenzentów specjalnego numeru Journal of Maps, do którego poproszono mnie o artykuł (Szypuła, 2020).

Od 2014 r. rozpocząłem również (trwającą do tej pory współpracę z B. Gądkiem), której efektem jest **mapa współczesnej kriosfery obszaru Tatr 1:250 000** wykonana dla wielolecia 1999-2010 (Gądek, Szypuła, 2015). Jest to pionierskie opracowanie kriosfery obszaru wysokogórskiego. Obecnie pracujemy nad kolejną mapą, na której rozszerzymy zakres czasowy do lat współczesnych oraz skalę opracowania (1:100.000). Ponadto opublikowaliśmy artykuł (Gądek, Szumny, Szypuła, 2019) związany z **klasyfikacją taksonomiczną jezior tatrzańskich**, opartą m.in. na różnicach topograficznych, morfometrycznych, czasem trwania zlodzenia oraz solarnym potencjałem energetycznym.

Związanym z obszarem Tatr był również opublikowany wraz z E. Łupikaszą artykuł (2019), w którym zajęliśmy się **czasowymi zmianami konfiguracji pionowych pasów klimatycznych w Tatrach w wyniku aktualnych zmian klimatycznych**. Temperatura powietrza modelowana była oddzielnie dla stoków północnych i południowych oraz dla wypukłych i wklęsłych form terenu, zgodnie z założeniami Hessa (1966, 1968). Temperatury powietrza dekadowego wykorzystano dodatkowo do wyznaczenia pięciu pasów klimatycznych wyróżnionych wcześniej przez Hessa (1974) na podstawie wartości progowych rocznej temperatury powietrza. Porównano zakres przestrzenny i położenie granicznych izoterm +6, +4, +2, 0 i -2°C dla wielolecia 1951–2010. Wyniki okazały się na tyle obiecujące, że planowane są dalsze prace dla obszaru Tadżykistanu.

Współpraca z koleżanką biologką z Uniwersytetu Wrocławskiego zaowocowała dwoma artykułami (Stefańska-Krzaczek i in., 2016, 2018). W pracach tych wykorzystując swoje doświadczenie jako geograf przeanalizowałem rzeźbę Polski w kontekście przestrzennego rozkładu grup współlistniejących reliktowych gatunków leśnych (tzw. CAFS groups) oraz dokonałem analizy klimatu Borów Tucholskich w okresie 1975-2010 na podstawie danych pozyskanych z IMGW.

Ponadto nawiązałem współpracę z kolegami z naszego Instytutu Nauk o Ziemi w badaniach, których celem było wykorzystanie technik dendrochronologicznych do opracowania **mapy zagrożenia osuwiskowego** dla obszaru Suchej Góry w Beskidzie Żywieckim (Łuszczynska i in., 2018). Moim zadaniem było przetestowanie różnych metod interpolacji danych dendrochronologicznych w oparciu o cyfrowy model terenu, co w efekcie pozwoliło uzyskać przestrzenny obraz obszarów zagrożonych potencjalnymi osuwiskami.

Również moje działania, jako tutora akademickiego, przyniosły wymierne efekty, w postaci dwóch opublikowanych artykułów oraz prezentacji na konferencjach ze studentem J. Godźkiem (obecnie doktorant). W pierwszym z artykułów (Godziek, Szypuła, 2018) przeanalizowano **dynamikę zmian lesistości** w Dolinie Ochotnicy (Gorce) w okresie 1879-2015 z wykorzystaniem historycznych źródeł kartograficznych (mapy z 1879, 1934, 1978 r.) oraz współczesnej ortofotomapy i cyfrowego

modelu terenu. W kolejnej opublikowanej pracy (Godziek, Szypuła, 2020) opracowano **mapy trwałości lasów** wybranych stanowisk w Beskidach (Dolina Solinki w Bieszczadach i Dolina Ochotnicy w Gorcach) w przedziale czasowym XVIII-XX w. Przez trwałość rozumiano okres, w którym dany obszar był stale zajęty przez las. Zastosowano cyfrowy model terenu (DEM) i cyfrowy model pokrycia terenu (DSM) o rozdzielczości 1x1 m, aby zbadać związek między trwałością pokrywy leśnej a wysokością, nachyleniem, aspektem i średnią wysokością drzew. Różnorodność struktury przestrzennej trwałości pokrywy leśnej wynika głównie z różnic dostępności do badanych dolin. Dla obu dolin stwierdzono dodatnią korelację między trwałością pokrywy leśnej a średnią wysokością drzew i wysokością. W dolinie Solinki występują również wprost proporcjonalne zależności między trwałością pokrywy leśnej a nachyleniem terenu.

W ciągu ostatnich trzech lat nawiązałem także współpracę z U. Mygą-Piątek i M. Sobalą, czego efektem są jak dotychczas dwa opublikowane artykuły (Sobala, Myga-Piątek, Szypuła, 2020; Myga-Piątek, Sobala, Szypuła, 2022). Pierwszy dotyczy określenia wpływu wtórnej sukcesji lasu (w obszarze byłych pastwisk) na zmiany zakresu widzenia rozumianego, jako cecha fizjonomiczna krajobrazu. Posłużyłem się w nim **analizami widoczności**, aby w ilościowy sposób ocenić współczesne i historyczne walory krajobrazowe obszaru Beskidów. Szczegółowe badania przeprowadziliśmy dla Beskidu Śląskiego i Żywieckiego (6 polan śródleśnych, 24 punkty widokowe) m.in. na podstawie wysokorozdzielczego cyfrowego modelu terenu, cyfrowego modelu pokrycia terenu oraz ortofotomapy. W drugim artykule zajęto się z kolei **przestrzenną analizą stopnia antropogenicznego przekształcenia krajobrazów naturalnych**. Użyta przez nas metoda może być zastosowana do każdego typu jednostki przestrzennej i tym samym stanowić podstawę do wyznaczania obszarów, które powinny być chronione. Obecnie przygotowujemy kolejny artykuł związany z parkami narodowymi w całych Karpatach.

Nawiązałem również współpracę z W. Dobińskim i J. Szafraniec, czego efektem jest nasz opublikowany wspólny artykuł (Dobiński, Szafraniec, Szypuła, 2022) omawiający tematykę zasięgu wiecznej zmarzliny na Antarktydzie oraz kwestiami związanymi z jej powierzchnią w świetle najnowszych danych georadarowych (cyfrowe modele podłoża Antarktydy) oraz satelitarnych danych obrazowych. Niezbędna tutaj okazała się szczegółowa analiza modeli terenu z różnych źródeł oraz satelitarnych ortofotomap, aby precyzyjnie ustalić zasięg zlodowaczonej jak i niezlodowaczonej Antarktydy.

Ostatnie dwa lata (i nadal), to również czas bardzo intensywnej współpracy z J. Wagą i M. Fajer. Zajęliśmy się tematyką specyficznej **rzeźby antropogenicznej związanej z działaniami militarnymi w czasie II wojny światowej (leje po bombach)** w okolicach Kędzierzyna Koźła. Efektem tego jest grant „Małe Projekty 2022” finansowany z rezerwy Dyrektora INoZ (*Anthropogenic landforms derived from LiDAR data in the woodlands of Koźle Basin (Southern Poland)*) i opublikowane wyniki w 3 artykułach (Waga i in., 2022 a,b,c) (kolejny artykuł aktualnie w recenzji). Ponadto efekty naszych działań przedstawiliśmy na 3 konferencjach, gdzie spotkały się one z dużym zainteresowaniem. Zostało to docenione przez przyznanie mi nagrody „Złoty Piksel” za najlepszy referat wygłoszony w trakcie XXIV Ogólnopolskiej Konferencji Fotointerpretacji i Teledetekcji w 2021 r. Z drugiej strony interesujemy się i analizujemy **rzeźbę antropogeniczną zapisaną w obszarach**



**leśnych** okolic Kotlarni oraz na terenach leśnych Parku Krajobrazowego „Cysterskie Kompozycje Krajobrazowe Rud Wielkich” (Waga i in., 2022 d, e, kolejny w recenzji, następne w przygotowaniu). To wszystko przy użyciu wysokorozdzielczych cyfrowych modeli terenu, ortofotomap z bezzałogowego statku powietrznego oraz skanowania LiDAR.

Podsumowując moją aktywność naukową, opublikowałem (autorstwo i współautorstwo):

- **37 artykułów naukowych** (19 artykułów w czasopismach posiadających współczynnik wpływu Impact Factor; 10 artykułów w punktowanych czasopismach międzynarodowych; 8 innych publikacji naukowych)
- **3 mapy**
- **2 skrypty dla studentów**
- **2 ekspertyzy na zamówienie.**

Ponadto w trakcie recenzji jest 6 artykułów, a kolejne 4 artykuły powinny zostać ukończone jeszcze w tym roku.

Szczegółowe zestawienie wszystkich opublikowanych prac naukowych zamieszczono w **Załączniku 4.**

Informacje naukometryczne – stan na dzień **11.04.2023**:

<b>Źródło</b>	<b>Liczba cytowań</b>	<b>Indeks Hirscha</b>	<b>Sumaryczny IF</b>
Scopus	<b>126</b>	<b>6</b>	
Researchgate	<b>224</b>	<b>8</b>	<b>48.752</b>
Google Scholar	<b>257</b>	<b>8</b>	

#### **6. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury.**

W czasie prac nad doktoratem i po uzyskaniu stopnia doktora uczestniczyłem w sumie w **4 projektach badawczych (grantach) jako wykonawca**. Pierwszy z nich (2004-2007) dotyczył ekstremalnych zdarzeń meteorologicznych i hydrologicznych w Polsce oraz prognozowania ich skutków dla środowiska życia człowieka, gdzie zajmowałem się analizą i opracowywaniem danych kartograficznych.

Następny grant (*Zmiany przebiegu sedymentacji osadów pozakorytowych Górnej Odry w Kotlinie Raciborskiej w okresie historycznym*, 2005-2008) **obejmował rekonstrukcję sposobu pionowego przyrostu równiny zalewowej w strefie przykorytowej Górnej Odry w korycie przedregulacyjnym oraz współczesnym**. Uczestniczyłem we wszystkich badaniach terenowych oraz opracowywałem wszystkie dane przestrzenne i finalne rezultaty kartograficzne.

W trzecim projekcie (*Analysis of morphometric conditions of navigation on the Odra River in the reach: Chałupki to confluence with the Warta River*, 2006-2007) **dokonałem morfometrycznej**

**analizy warunków nawigacyjnych wzdłuż całego współczesnego kryta Odry**; wiązało się to z precyzyjną analizą wielu materiałów topograficznych (mapy topograficzne i wysokiej rozdzielczości ortofotomapy) w dużej skali w środowisku GIS.

Czwarty projekt (2013-2014) obejmował **opracowanie warunków technicznych do wykonania kartograficznych opracowań tematycznych w postaci cyfrowych map geomorfologicznych**. Była to owocna współpraca w ogólnopolskim zespole ekspertów, która najpierw skupiła się na opracowaniu założeń merytorycznych, redakcyjnych i technicznych, a następnie zaowocowała wydaniem w sumie 8 arkuszy Cyfrowej mapy geomorfologicznej Polski w skali 1:100.000. Osobiście jestem współautorem arkusza Katowice (Jania i in., 2014).

Ponadto byłem/jestem wykonawcą w dwóch mniejszych projektach realizowanych na mojej macierzystej Uczelni. Pierwszy z nich to 'Małe Projekty' (2022-2023), w którym zajęliśmy się formami antropogenicznymi rozpoznanymi z wysokorozdzielczych danych LiDAR w Niece Kozielskiej (Waga i inni, 2022 d, e). Drugi z nich 'Swoboda badań III' (2023-2024) dotyczy identyfikacji pozostałości kampanii lotniczej z II wojny światowej w gruntach Niecki Kozielskiej, ale tym razem będziemy chcieli się skupić na weryfikacji przydatności metod geofizycznych do tego typu działań, co będzie wstępem do złożenia grantu do NCN.

Elementem mojej stałej działalności naukowej jest aktywne uczestnictwo w konferencjach. Ogółem **w latach 2000-2022 wziąłem udział w 32 krajowych i zagranicznych konferencjach**, kongresach oraz warsztatach, gdzie wygłaszałem referaty i przedstawiałem postery dotyczące prowadzonych przeze mnie badań.

Ponadto byłem współorganizatorem I Warsztatów Geomorfologii Strukturalnej (Podlesice, 2010), 12 konferencji popularnonaukowych związanych z Systemami Informacji Geograficznej - GIS Day (Uniwersytet Śląski, 2010-2022) oraz członkiem komitetów organizacyjnych 4 krajowych konferencji naukowych (2017-2019).

Od 2006 r. jestem członkiem **Stowarzyszenia Geomorfologów Polskich**, a od 2010 – członkiem **International Society for Geomorphometry (geomorphometry.org)** – międzynarodowej asocjacji naukowców zajmujących się geomorfometrią oraz cyfrowymi modelami terenu.

W ramach doskonalenia mojego warsztatu naukowca odbyłem **miesięczny staż w ramach programu Central European Exchange Program for University Studies (CEEPUS) na Uniwersytecie Palackého, Czechy (2007)**, gdzie brałem udział w badaniach terenowych związanych z analizą dynamiki i morfologii koryta rzecznej rzeki Morawy w okolicach Ołomuńca, pod kierunkiem prof. Ondřeja Bábka.

W latach 2019-2020 współpracowałem z Czeską Akademią Nauk (dr Tomas Grygar i dr Martin Faměra z Laboratory of Environmental Geochemical Analysis) oraz z Akademią Górniczo-Hutniczą im. S.Staszica z Krakowa (prof. D.Ciszewski) przy projekcie „*The study of transboundary pollution of river sediments on the examples of Odra and Olza Rivers*”, w którym zajmowaliśmy się

opracowywaniem **dystrybucji zanieczyszczeń osadów powodziowych metalami ciężkimi wzdłuż koryta Odry** na pograniczu polsko-czeskim. Efektem wspólnych działań jest opublikowana praca (Famera i in., 2021).

W ramach działań międzyuczelnianych, od 2021 intensywnie współpracuję z M. Marciakiem z Uniwersytetu Jagiellońskiego, jako specjalista od **ilościowych analiz rzeźby terenu na podstawie cyfrowych modeli terenu dla obszaru północnego Iraku**. Pokłosiem naszych działań są 3 opublikowane artykuły (Marciak i in., 2020, 2021; Pirowski i in., 2022), kolejne 4 w trakcie recenzji i 2 kolejne w trakcie przygotowań. Ponadto jestem członkiem międzynarodowej interdyscyplinarnej rady doradczej w projekcie M. Marciaka SONATA BIS 10 Travel and Mobility in Hellenistic and Early Roman Palestine.

Jednym z ważnych efektów współpracy publikacyjnej był mój udział, jako współautora, w opracowanej międzynarodowej monografii (Cieślak i in., 2015) dotyczącej tematyki miejskiej, jako **przestrzeni zarządzanej przez Systemy Informacji Geograficznej (GIS)**, zgodnie z ideą nowoczesnego miasta - **Smart City** wydanej przez Croatian Information Technology Society, GIS Forum. Moim zadaniem było nakreślenie koncepcji wdrożenia systemów GIS do zarządzania zielenią miejską oraz wskazanie możliwości dostępu i wykorzystania danych przestrzennych, które funkcjonują w przestrzeni publicznej.

Należy wspomnieć, że w ramach działań, jako recenzent mam na swoim koncie **60 recenzji w naukowych czasopismach, głównie międzynarodowych**, m.in: Remote Sensing, Open Geosciences, Geomorphology, Journal of Maps, Geosciences Journal, Transaction in GIS, Water, Applied Sciences, Geo-spatial Information Science, International Journal of Geo-Information, Quaestiones Geographicae, Environmental Earth Sciences, Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego, Landform Analysis czy Contemporary Trends in Geoscience.

Szczegółowe zestawienie wszystkich powyższych aktywności zawarte jest w **Załączniku 4**.

## **7. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.**

Istotną częścią mojej pracy naukowej była, i nadal jest, **aktywna działalność dydaktyczna** na kierunkach: Geografia, Inżynieria Zagrożeń Środowiskowych, Ochrona Środowiska oraz Gospodarka Przestrzenna. Do tej pory, średnio, co roku przeprowadzam około 350 godzin zajęć dydaktycznych. Przez ostatnie lata prowadziłem 14 różnych zajęć laboratoryjnych, 6 autorskich wykładów, 3 rodzaje ćwiczeń terenowych oraz 3 zajęcia tutoringowe. Dowodem moich sukcesów dydaktycznych są coroczne, stale bardzo wysokie, oceny ankietowe mojej pracy przez studentów. Ponadto **w latach**

**2009-2015** równoległe **pracowałem na stanowisku adiunkta w Szkole Wyższej im. B. Jańskiego w Warszawie** prowadząc zajęcia dydaktyczne na kierunku Gospodarka Przestrzenna.

Jestem recenzentem 20 prac magisterskich, 12 prac inżynierskich, 9 prac licencjackich oraz promotorem 1 pracy inżynierskiej i 1 magisterskiej (kolejne w trakcie).

Dzięki doświadczeniom dydaktycznym i specjalistycznym kompetencjom opracowaliśmy z Koleżanką z zespołu **dwa podręczniki dla studentów** (Piechota, Szypuła, 2014, 2019) omawiające podstawy pracy z oprogramowaniem ArcGIS 10 i umożliwiające zdanie egzaminu i uzyskanie certyfikatu ECDL EPP GIS. W planach mamy także wydanie podręcznika z obsługą darmowego open source'owego oprogramowania QGIS.

**Funkcje pełnione na Uczelni:** w latach 2006-2011 byłem oraz 2020-2023 jestem opiekunem roku na kierunku geografia, w latach 2012-2015 brałem udział w pracach przy wdrażaniu Krajowych Ram Kwalifikacji (KRK) na kierunku geografia, a od 2016 do 2019 w Wydziałowym Zespole Zapewnienia Jakości Kształcenia (WZZJK). W październiku 2019 zostałem powołany do Rady Dydaktycznej Kierunków Geograficznych na Wydziale Nauk Przyrodniczych UŚ oraz znalazłem się w zespole modyfikującym program studiów II stopnia kierunku Geografia w ramach Zintegrowanego Programu Rozwoju Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach (umowa POWR.03.05.00-00-z117/17-00). Za działalność organizacyjną otrzymałem **w 2019 r. Nagrodę Zespołową Rektora II stopnia**, a **w 2021 wyróżnienie Kreator Nauki** za zaangażowanie w proces kształcenia i znaczące sukcesy tutoringowe.

Poza prowadzeniem zajęć dydaktycznych i działalnością organizacyjną na Uczelni nie zaniedbuję również własnego rozwoju: w latach **2001-2022 uczestniczyłem w 26 różnych kursach i szkoleniach podnoszących moje kwalifikacje i kompetencje zawodowe**. Główny nacisk kładłem zawsze na uczestnictwo w wąsko specjalizowanych szkoleniach z obsługi najnowszego oprogramowania (np. Introduction to Earth Vision and the Workflow Manage (2005); Grass OpenSource (2012); Kurs rozszerzony QuantumGIS (2013); ISOK. Szkolenia LiDAR (2014); ArcGIS 3: Wykonywanie analiz (2015); Szkolenie AVO BVLOS z uprawnieniami MR (multiwornikowce) do 25kg (2018); Wprowadzenie do ArcGIS Pro dla specjalistów GIS (2018); ArcGIS Pro: Efektywne wykorzystywanie narzędzi GIS (2019) i inne). Uzyskałem dzięki temu: Certyfikat ECDL EPP GIS (2011), Certyfikat egzaminatora ECDL EPP GIS (2011), Certyfikat ECDL Expert (2016) oraz Certyfikat Urzędu Lotnictwa Cywilnego AVO BVLOS MR (2018).

Regularnie zajmuję się również **działalnością popularyzującą naukę** poprzez cyklicznie prowadzone wykłady i zajęcia warsztatowe dla szkół średnich w ramach Dni Ziemi, Dni Otwartych Wydziału Nauk o Ziemi oraz działalności Muzeum Nauk o Ziemi.

Ponadto **współorganizowałem i przeprowadziłem ponad 20 specjalistycznych szkoleń** z obsługi oprogramowania GIS w latach 2011-2023, zarówno dla studentów (Uniwersytet Śląski,

Wydział Nauk o Ziemi, Wydział Nauk Biologicznych) jak i pracowników naukowych (Uniwersytet Śląski, Instytut Geofizyki PAN w Warszawie, Uniwersytet Opolski, Uniwersytet Kard. S. Wyszyńskiego w Warszawie). Kursy te odbywały się m.in. w ramach projektu „Zwiększenie udziału osób dorosłych w kształceniu w zakresie narzędzi informatycznych i technologii NITKA, Priorytet IV – „Szkolnictwo wyższe i nauka” czy w europejskim programie „JPGOW – Uniwersytet Partnerem Gospodarki Opartej na Wiedzy” – Działanie 4.1 „Wzmocnienie i rozwój potencjału dydaktycznego”. Poza instytucjami naukowymi prowadziłem również szkolenia specjalistyczne na zamówienie dla firm zewnętrznych: LogoSoft (Zabrze, 2016), PGNiGE (Wisła, 2019), ARiMR (Wrocław, 2019), Fundacja Sendzimira (2021), Wody Polskie (2022).

Zdobytą wiedzę fachową i doświadczenie wykorzystałem również w dwóch **zleconych opracowaniach (ekspertyzach)**. Pierwsze (Brański i inni, 2007) dotyczyło hydrologicznych i morfologicznych uwarunkowań oraz skutków rozwoju Odrzańskiej Drogi Wodnej. Mój wkład polegał na analizie morfometrycznej (szerokość i głębokość) koryta Odry na odcinku od Chałupek do ujścia Warty. Obliczone zostały również krętości i spadki koryta dla poszczególnych odcinków rzeki. Wymienione parametry, uzyskane na podstawie współczesnych materiałów kartograficznych, zestawiono z archiwalnymi, co pozwoliło na wychwycenie trendów zmian zachodzących w korycie Odry i na wskazanie miejsc o gwałtowniejszej dynamice, które przy planowaniu ewentualnych inwestycji powinny być poddane szczegółowej obserwacji.

W drugiej pracy (Sitek i inni, 2019) zajęliśmy się delimitacją obszarów zdegradowanych oraz obszarów do planowanej rewitalizacji w Sosnowcu. Moja rola skupiona była na analizach materiałów dotyczących miasta Sosnowca, głównie w formie bazodanowej (dane z Urzędu Miasta Sosnowiec, geoportali, dane z GUGiK, dane z GUS, itd.), na podstawie których dokonałem analizy przestrzennej i opracowania kartograficznego oraz cyfrowych map z nowo utworzonymi warstwami.

Ponadto wiedzę i doświadczenie eksperckie wykorzystuję w trwających (2021-2023) pracach przy **audycie krajobrazowym województwa śląskiego**, gdzie jestem jednym z wykonawców i zajmuję się tworzeniem, analizą oraz wizualizacją wektorowej geobazy cech przyrodniczych oraz kulturowych krajobrazu.

Szczegółowe zestawienie wszystkich powyższych aktywności zawarte jest w **Załączniku 5**.

Moje dalsze plany naukowe obejmują opracowanie polskiego podręcznika do geomorfometrii dla studentów kierunków z zakresu geografii, nauk o Ziemi i zagrożeń środowiskowych oraz adeptów badań geomorfologicznych. Od kilku lat, od kiedy prowadzę autorskie wykłady i laboratoria z geomorfometrii i cyfrowych modeli terenu – zauważam dotkliwy brak, polskiej literatury w tym zakresie. Ponadto bliska mi jest wciąż tematyka wykorzystywania geomorfometrii do ilościowych analiz rzeźby terenu, którą chciałbym kontynuować w swoim dalszym rozwoju naukowym dla innych obszarów Polski. Rozpocząłem również badania związane z analizą osiadań terenu dolin rzecznych na silnie

zantropogenizowanych terenach w Europie (Polska, Czechy, Słowenia) na podstawie dostępnych radarowych zdjęć satelitarnych za pomocą metod interferometrycznych i z wykorzystaniem metod geomorfometrycznych. W chwili obecnej jestem zaangażowany w prace nad czterema nowymi artykułami.

Obecnie zaangażowany jestem również w ogólnopolski projekt pilotowany przez Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich, którego celem jest wykonanie bazy danych i finalnie **Cyfrowej Mapy Geomorfologicznej Polski w skali 1:500 000** oraz opublikowanie książki **Geomorfologia regionalna Polski**. Pełnię funkcję regionalnego konsultanta naukowego (koordynator zespołu UŚ) oraz jestem jednym z wykonawców mapy i współautorem przyszłej książki.

Ponadto bardzo aktywnie rozwija się moja współpraca międzyuczelniana z prof. Marciakiem z UJ, z którym realizujemy pomysły historyczno-archeologiczno-przyrodnicze związane z północnym Irakiem i Izraelem (3 opublikowane artykuły, 4 w recenzji i 2 kolejne w trakcie przygotowań oraz pomysł na wspólny projekt). Podobnie kontynuuję współpracę z prof. Wagą i prof. Fajer przy analizach obszarów po lejach po bombach z II wojny światowej (5 artykułów opublikowanych, 2 w recenzji, 2 przygotowywane, 2 projekty zrealizowane – w planie złożenie grantu do NCN we współpracy z kolegami z Czech). Owocnie również układa mi się współpraca z prof. Rahmonovem i prof. Czajką (1 artykuł opublikowany, 1 artykuł na ukończeniu, 2 w trakcie przygotowania – w najbliższym czasie złożenie projektu do NCN).

#### Literatura cytowana:

- Brański J., Czajka A., Kadłubowski A., Maciążek E., Mierkiewicz M., Sasim M., Szypuła B., Żelaziński J., 2007. Hydrologiczne i morfologiczne uwarunkowania oraz skutki rozwoju odrzańskiej drogi wodnej, Projekt badawczo-wdrożeniowy, 89 s. Zleceniodawca: WWF - Światowy Fundusz Na Rzecz Przyrody Projekt No. 542100/54000/umowa nr 07224
- Chorley R.J., 1969. The drainage basin as the fundamental geomorphic unit. [In]: Chorley R.J. (ed), Water, Earth and Man. London: Methuen, pp. 77-100
- Cieślak I., Dobińska M., Jankowska M., Kiedrowicz M., Kowalczyk A., Kulawiak M., Szuniewicz K., Szypuła B., Zwirowicz-Rutkowska A., 2015. Enhancing a city via GIS: Issues and challenges. Croatian Information Technology Society, GIS Forum. Nacionalna knjižnica, Zagreb. ISBN 978-953-6129-53-9. 78 p.
- Contreras M.A., Staats W., Yiang J., Parrott, D., 2017. Quantifying the Accuracy of LiDAR-Derived DEM in Deciduous Eastern Forests of the Cumberland Plateau. Journal of Geographic Information System, 9, 339-353. DOI: 10.4236/jgis.2017.93021
- Das S., Patel P.P., Sengupta S., 2016. Evaluation of Different Digital Elevation Models for Analyzing Drainage Morphometric Parameters in a Mountainous Terrain: A Case Study of the Supin-Upper Tons Basin, Indian Himalayas. SpringerPlus, 5, 1544. DOI: 10.1186/s40064-016-3207-0
- Dobiński W., Szafranec J.E., Szypuła B. 2022. Area and borders of Antarctic permafrost - A review and synthesis. Permafrost and Periglacial Processes. DOI: 10.1002/ppp.2170
- Evans I.S., 1969. The geomorphology and morphometry of glacial and nival areas. [In]: Chorley R.J. (ed), Water, Earth and Man. London: Methuen, pp. 369-380
- Evans I.S., 1972. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. [In]: Chorley R.J. (ed), Spatial Analysis in Geomorphology. Harper & Row, New York. pp. 17-91
- Evans I.S., 1974. The geomorphometry and asymmetry of glaciated mountains [Unpubl. Ph.D.Thesis]. University of Cambridge

- Evans I.S., Cox N.J., 1999. Relation between Land Surface Properties: Altitude, Slope and Curvature. [In]: Hergarten S., Neugebauer H.J. (eds.), Process Modelling and Landform Evolution. Heidelberg: Springer, 13–45
- Everitt, B.S., Skrondal A., 2010. The Cambridge Dictionary of Statistics, Cambridge University Press, UK. 480 p.
- Famera M., Grygar T.M., Ciszewski D., Czajka A., Álvarez-Vázquez M.A., Hron K. Fačevicová K., Hýlová V., Tůmová Š., Světlík I., Zimová K., Dvořáková K., Szypuła B., Hošek M., Henych J. 2021. Anthropogenic records in a fluvial depositional system: the Odra River along the Czech-Polish border. *Anthropocene*, 34, 100286. DOI: 10.1016/j.ancene.2021.100286
- Fels J.E., Zobel R., 1995. Landscape position and classified landtype mapping for statewide DRASTIC mapping project. North Carolina State University technical report VEL.95.1.
- Fisher P.F., Tate N.J., 2006. Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography*, 30, 467-489. DOI:10.1191/0309133306pp492ra
- Flood M., (ed), 2004. ASPRS Guidelines Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data v.1.0. ASPRS Lidar Committee (PAD), 20 p.
- Gądek B., Szumny M., Szypuła B., 2019. Classification of the Tatra Mountain lakes in terms of the duration of their ice cover (Poland and Slovakia). *Journal of limnology*, DOI:10.4081/jlimnol.2019.1920
- Gądek B., Szypuła B., 2015. Współczesna kriosfera. Mapa 1: 250.000. [W]: Atlas Tatr - Przyroda nieożywiona, arkusz V-1. Wydawnictwa Tatrzańskiego Parku Narodowego, Zakopane.
- Godziek J., Szypuła B., 2018. Zmiany lesistości w Dolinie Ochotnicy w XIX-XX w. na podstawie materiałów kartograficznych. *Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego*, 39(1):189-206. DOI: 10.30450/201811
- Godziek J., Szypuła B., 2020: Durability of forest cover in the Ochotnica Valley (Gorce Mts) and in the Solinka Valley (Bieszczady Mts) in 18th – 21st centuries. *Geographia Polonica*, 93(1).
- Hengl T., Evans I.S., 2009. Mathematical and digital models of the land surface. [In]: Hengl T., Reuter H.I. (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*. Elsevier, pp 31-64. DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00002-0
- Hess M., 1966. O mezoklimacie wypukłych i wklęsłych form terenowych w Polsce Południowej. *Przegląd Geofizyczny* 11(19), 1:23–35.
- Hess M., 1968. Metoda określania ilościowego zróżnicowania mezoklimatycznego w terenach górskich. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego CLXXIX. Prace Geogr Problemy Klimatologii Gór i Wyżyn* 18(40):7–26.
- Hess M., 1974. Piętra klimatyczne Tatr. *Czasopismo Geograficzne* 45(1):75–95.
- Höhle J., Höhle M., 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4), 398-406. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.02.003
- Jania J., Dulias R., Szypuła B., Tyc A., 2014. Cyfrowa mapa geomorfologiczna Polski 1:100.000, arkusz Katowice. GUGiK, Gepol.
- Karaś-Brzozowska C., 1960. Geomorfologiczna charakterystyka Górnosląskiego Okręgu Przemysłowego. Warszawa: Biuletyn PAN.
- Klimaszewski M. (red.), 1959. Mapa Geomorfologiczna Górnosląskiego Okręgu Przemysłowego 1:50.000. Komitet itd. GOP PAN, Warszawa.
- Larose D.T., 2005. *Discovering knowledge in data: an Introduction to data mining*. New York: John Wiley & Sons, 240 p.
- Lustig L.K., 1969. Quantitative analysis of desert topography. *Arid Lands in Perspective*, 45-48
- Łupikasza E., Szypuła B., 2019. Vertical climatic belts in the Tatra Mountains in the light of current climate changes. *Theoretical and Applied Climatology*, 136(1-2):249-264. DOI: 10.1007/s00704-018-2489-2
- Łuszczynska K., Wistuba M., Malik I., Krąpiec M., Szypuła B., 2018. Dendrochronological dating as a basis for developing a landslide hazard map – an example from Western Carpathians, Poland. *Geochronometria*, 45:173-184. DOI: 10.1515/geochr-2015-0093
- Marciak M., Głogowski P., Szypuła B., Pirowski T., Gomiero G. 2020. Gaugamela in the Plains of Nineveh? The Southern Location of the Battle of Gaugamela Reconsidered. *Anabasis. Studia Classica et Orientalia*, 11: 60-110.
- Marciak M., Szypuła B., Sobiech M., Pirowski T. 2021. The battle of Gaugamela and the question of visibility on the battlefield. *Iraq*, 83:87-103. DOI: 10.1017/irq.2021.11
- Myga-Piątek U., Sobala M., Szypuła B., 2022. Do national parks protect natural landscapes? *Journal for Nature Conservation*, 68, 126229. DOI: 10.1016/j.jnc.2022.126229

- Pike R.J., Evans I.S., Hengl T., 2009. Geomorphometry: A Brief Guide. [In]: Hengl T., Reuter H.I. (Eds.), *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*. Elsevier, pp 3-30. DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00001-9.
- Pirowski T., Szypuła B., Marciak M. 2022. Interpretation of multispectral satellite data as a tool for detecting archaeological artefacts (Navkur Plain and Karamleis Plain, Iraq). *Archaeological and Anthropological Sciences*, 14:166. DOI: 10.1007/s12520-022-01637-9
- Reuter H.I., Hengl T., Gessler P., Soille P., 2009. Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis. In: Hengl T., Reuter H.I. (eds), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science 33*, Elsevier, Amsterdam, 87–120. DOI: 10.1016/S0166-2481(08)00004-4
- Schumm S., 1954. The relation of drainage basin relief to sediment loss. *International Association of Hydrological Sciences Publications*, 36:216-219
- Sitek S., Pytel S., Sitek A., Soczówka A., Szczepańska-Góra A., Szypuła B., Zuzańska-Żyśko E., 2019. Delimitacja obszaru zdegradowanego oraz obszaru rewitalizacji w Sosnowcu. *Fundacja AXIS - Forum Inicjatyw, Sosnowiec*. 80 s. Zleceniodawca: Urząd Miasta Sosnowiec
- Sobala M., Myga-Piątek U., Szypuła B., 2020. Assessment of changes in a watershed in the Western Carpathians landscape as a result of reforestation. *Land*, 9 (11), 430. DOI:10.3390/land9110430
- Speight J.G., 1990. Landform. [In]: McDonald R.C., Isbell R.F., Speight I.G., Walker J., Hop M.S. (eds.), *Australian Soil and Land Survey Field Handbook*. Melbourne: Inkata Press, 9–57
- Stefańska-Krzaczek E., Fałtynowicz W., Szypuła B., Kącki Z., 2018. Diversity loss of lichen pine forests in Poland. *European Journal of Forest Research*, 137, 4: 419-431. DOI: 10.1007/s10342-018-1113-4
- Stefańska-Krzaczek E., Kącki Z., Szypuła B., 2016. Coexistence of ancient forest species as an indicator of high species richness in Central Europe. *Forest Ecology and Management*, 365:12–21. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.01.012
- Strahler A.N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63:1117-1142. DOI: 10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2
- Strahler A.N., 1956. Quantitative slope analysis. *Geological Society of America Bulletin*, 67:571-596
- Strahler A.N., 1964. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. [In]: Chow V.T (ed), *Handbook of Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill. pp. 439-476
- Szypuła B. (red.), 2017. Mapa Geomorfologiczna GOP 1:50 000 - wersja cyfrowa. WNoZ UŚ, Sosnowiec. ISBN 978-83-939308-1-4 <http://hdl.handle.net/20.500.12128/6338>
- Szypuła B., 2007. Rzeźba strukturalna Wyżyny Śląskiej w świetle badań geostatystycznych. *Maszynopis rozprawy doktorskiej*. WNoZ UŚ, Sosnowiec, 220 s.
- Szypuła B., 2008. Przykłady zastosowań analiz kartograficzno-GISowych w badaniach rzeźby Wyżyny Śląskiej. [W]: Żyszkowska W., Spallek W. (red): *Analizy przestrzenne w kartografii*. Uniwersytet Wrocławski IGiRR, Zakład Kartografii. Wrocław s. 79-94.
- Szypuła B., 2009. Badanie odporności skał Wyżyny Śląskiej z zastosowaniem młotka Schmidta. *Geographia. Studia Et Dissertationes*, 31: 65-80.
- Szypuła B., 2010. Cyfrowe modele terenu jako główne źródło danych w geomorfometrii. [W]: Żyszkowska W., Spallek W. (red), 2010: *Numeryczne modele terenu w kartografii*. Uniwersytet Wrocławski IGiRR, Zakład Kartografii. Wrocław. s. 110-121.
- Szypuła B., 2011. Analiza rzeźby antropogenicznej Wyżyny Śląskiej w świetle danych kartograficznych. *Kształtowanie środowiska geograficznego i ochrona przyrody na obszarach uprzemysłowionych i zurbanizowanych*, 43: 89-98.
- Szypuła B., 2013. Spatial distribution and statistic analysis of the anthropogenic line forms in the different basic fields. *Environmental & Socio-economic Studies*. Vol. 1, Issue 2, 1–14. DOI: 10.1515/environ-2015-0007
- Szypuła B., 2014. Quantitative changes of anthropogenic relief over the last 100 years in the Silesian Upland (south Poland). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 58(2):175-183. DOI: 10.1127/0372-8854/2013/0111
- Szypuła B., 2016. Geomorphometric comparison of DEMs built by different interpolation methods. *Landform Analysis* 32:45-58. DOI: 10.12657/landfana.032.004
- Szypuła B., 2017a. Digital elevation models in geomorphology. [In]: Shukla D.P. (ed.), *Hydro-Geomorphology - Models and Trends*. IntechOpen, 81-112 p. DOI: 10.5772/intechopen.68447



- Szypuła B., 2017b: Quantitative studies of the morphology of the south Poland using Relief Index (RI). *Open Geosciences* 9:509-524. DOI: 10.1515/geo-2017-0039
- Szypuła B., 2019. Quality assessment of DEM derived from topographic maps for geomorphometric purposes. *Open Geosciences*, 11:843-865. DOI: 10.1515/geo-2019-0066
- Szypuła B., 2020. Digital adaptation of Geomorphological Map of GOP: old map – new possibilities. *Journal of Maps*, 16(2), 614-624. DOI: 10.1080/17445647.2020.1800528
- Szypuła B., 2023. Accuracy of UAV-based DEMs without ground control points. *Geoinformatica*. DOI: 10.1007/s10707-023-00498-1
- Szypuła B., Wieczorek M., 2011. Geomorfometryczna analiza rzeźby Wyżyny Śląskiej metodą wskaźnika TPI. [W]: Żyszkowska W., Spallek W. (red.), Główne problemy współczesnej kartografii. Zastosowanie statystyki w GIS i kartografii. Wrocław, 73–82
- Szypuła B., Wieczorek M., 2019: Geomorphometric relief analysis with the k-median method, Silesian Upland, southern Poland. *Frontiers of Earth Science*, DOI: 10.1007/s11707-019-0765-9
- Urbański J., 2012. GIS w badaniach przyrodniczych. Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk. 252 s.
- Waga J.M., Fajer M., Szypuła B., 2022a. The scars of war: A programme for the identification of the environmental effects of World War II bombings for the purposes of spatial management in the Koźle Basin. *Environmental & Socio-economic Studies*, 10, 1: 57-67. DOI: 10.2478/enviro-2022-0005
- Waga J.M., Szypuła B., Fajer M., 2022b. Heritage of war: Analysis of bomb craters using LiDAR (Kędzierzyn-Koźle, Poland). *International Journal of Conservation Science*, 13, 2: 593-608
- Waga J.M., Szypuła B., Fajer M., 2022c. The archaeology of unexploded WWII bomb sites in the Koźle Basin, southern Poland. *International Journal of Historical Archaeology*. DOI: 10.1007/s10761-022-00672-5
- Waga J.M., Szypuła B., Sendobry K., Fajer M., 2022d. Ślady działalności człowieka na terenach leśnych Parku Krajobrazowego „Cysterskie Kompozycje Krajobrazowe Rud Wielkich” odczytane z obrazów LiDAR oraz ich znaczenie w ochronie dziedzictwa kulturowego i przyrodniczego. *Czasopismo Geograficzne*, 93,1: 107-138. DOI: 10.12657/czageo-93-05
- Waga J.M., Szypuła B., Sendobry K., Fajer M. 2022e. Anthropogenic landforms derived from LiDAR data in the woodlands near Kotlarnia (Koźle Basin, Poland). *Sensors*, 2022, 22, 8328. DOI: 10.3390/s22218328
- Weiss A., 2001, Topographic Position and Landform Analysis. Poster presentation, ESRI User Conference. San Diego.
- Weiss A., 2001. Topographic positions and landforms analysis (Conference Poster). ESRI International User Conference. San Diego, CA, 9-13.
- Williams P.W., 1972. Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. *Geological Society of America Bulletin*, 83:761-796
- Wilson J.P., 2012. Digital terrain modeling. *Geomorphology*, 137:107–121. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.03.012
- Wilson J.P., Aggett G.R., Deng Y.X., Lam C.S., 2008. Water in the landscape: a review of contemporary flow routing algorithms. [In]: Zhou Q., Lees B.G., Tang G.A. (eds.), *Advances in Digital Terrain Analysis*. Springer Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, Berlin. pp. 213–236.
- Wise S.M., 2000. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological Processes*, 14(11–12), 1909–1929. DOI: 10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12<1909::AID-HYP45>3.0.CO;2-6
- Wise S.M., 2000. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological Processes*, 14(11–12), 1909–1929. DOI: 10.1002/1099-1085(20000815/30)14:11/12<1909::AID-HYP45>3.0.CO;2-6
- Yastikli N., Esirtgen F., Sefercik U.G., 2011. Quantitative assessment of digital topographic data from different sources. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXVIII-4/W19, 2011. ISPRS Hannover Workshop, 14-17 June 2011, Hannover, Germany.
- Zwoliński Z., 2010. O homologiczności polskiej terminologii geoinformacyjnej. [W]: Zwoliński Z. (red.), *GIS – woda w środowisku*. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, s. 21-30.

