

Zastosowanie cyfrowego modelu terenu (DEM) w badaniach geologicznych na przykładzie obszaru między Dobczycami a Mszaną Dolną (polskie Karpaty zewnętrzne)

Rafał Chodyń*

Digital Elevation Model (DEM) applied to geological research: a case study of the area between Dobczyce and Mszana Dolna (Polish Outer Carpathians, southern Poland). Prz. Geol., 52: 315–320.

S u m m a r y. This paper is a preliminary report on using the Digital Elevation Model (DEM) and Shaded Relief Image in geological mapping in the Carpathians. Digital processing of the topographical maps in 1:25 000 scale enabled 3D visualization of a fragment of Polish Outer Carpathians, situated between Dobczyce and Mszana Dolna villages. This permitted a preliminary interpretation of lineaments occurring in the study area and recognition of correlation between the lineaments and geological structure of the Carpathians Flysch Units. The picture of the Shaded Relief Image was compared with existing remote sensing data such as radar and satellite images, and with results of geological mapping carried out by author in the field. The recognized lineaments can reflect fault zones in the flysch cover and in the consolidated basement. The correlation of lineaments detected in the digital models with discontinuities confirmed in outcrops demonstrates the value of digital methods in geological cartography.

Key words: Polish Outer Carpathians, Silesian Nappe, remote sensing, Shaded Relief Image, lineaments, tectonics

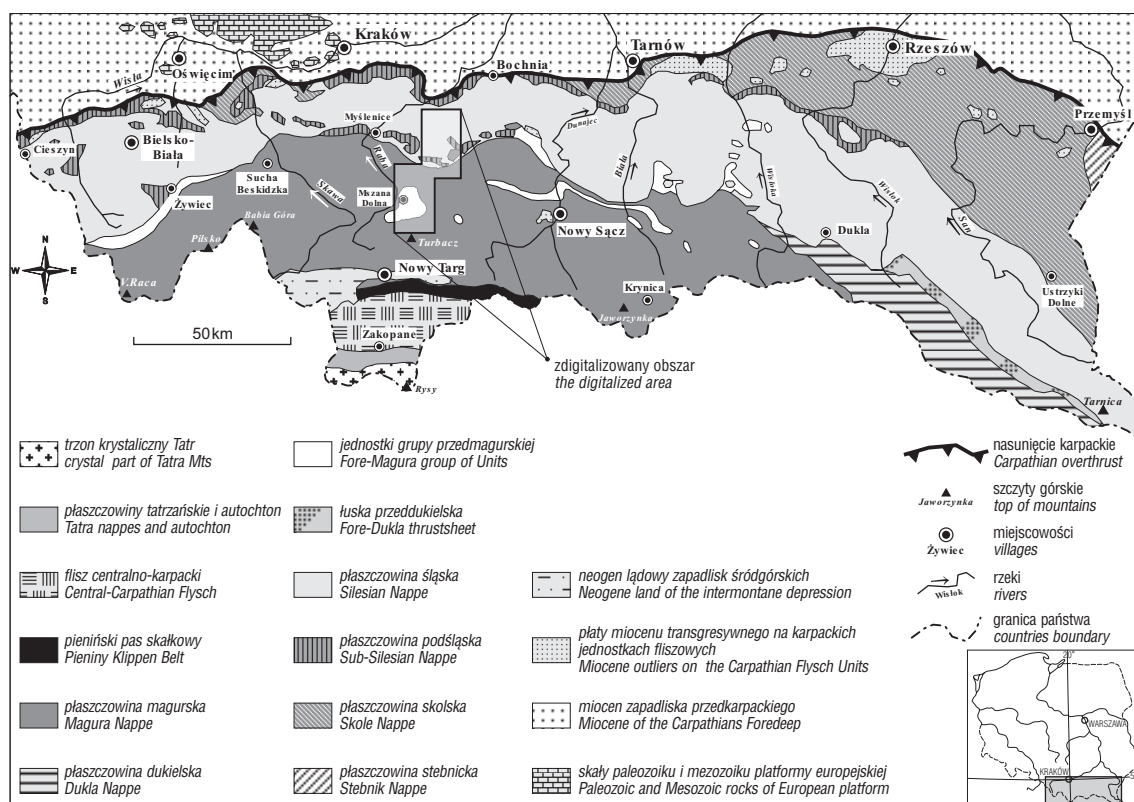
Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie cyfrowego modelu terenu 3D oraz cieniowanego reliefu terenu sporządzonego dla fragmentu polskich Karpat zewnętrznych między Dobczycami a Mszaną Dolną. Podobnie jak metody teledetekcyjne (np. zdjęcia lotnicze, satelitarne, radarowe) również cyfrowe modele terenu (DEM) oparte są na rejestracji, przetwarzaniu i interpretacji danych cyfrowych, i mają szereg zastosowań w szeroko rozumianych badaniach geologiczno-kartograficznych w Karpatach. Jednocześnie uzupełniają one w istotny sposób interpretacje materiałów teledetekcyjnych. Wraz z rozwojem cyfrowych technik teledetekcyjnych korzyści płynące z ich wykorzystania w standardowych, terenowych badaniach geologicznych stały się oczywiste. O ile analizy zdjęć lotniczych dla obszaru Karpat stanowią już integralną część badań geologicznych, o tyle wizualizacja przestrzenna (3D) terenu nie jest w pracach geologicznych w Karpatach powszechnie znaną i stosowaną metodą przedstawiania i interpretowania budowy geologicznej. Przy użyciu metod teledetekcyjnych wyznacza się najczęściej lineamenty. Podobnie jest w przypadku cyfrowych modeli terenu, aczkolwiek możliwości wykorzystania tej metody są znacznie szersze. Wieloznaczność terminu „lineament”, wprowadzonego do literatury geologicznej przez Hobbsa (1904), sprowokowała dyskusję wśród geologów nad sprecyzowaniem znaczenia tego sformułowania (m.in. Graniczny 1989; Dadlez & Jaroszewski 1994). W Polsce przyjęto (Ostaficzuk, 1981; Bażyński, 1982) definicję lineamentu w ujęciu O’Leary i in. (1976). Definicję tą zastosowano też w niniejszej pracy. Przez termin „lineament” w tej definicji rozumie się „możliwą do zinterpretowania cechę liniową powierzchni (lub ich kompozycję) zorientowaną w całości lub na pewnych odcinkach prostoliniowo i odzwierciedlającą prawdopodobnie pewne zjawiska w podłożu”. Kontrowersje dotyczące zależności między przebiegiem lineamentów a budową geologiczną danego obszaru nie zmieniają faktu istnienia liniowych form zarówno na mapach topograficznych, zdjęciach lotni-

czych, satelitarnych jak i radarowych. Problemem jest natomiast właściwa interpretacja tych form. Do terminu „lineament” Bażyński & Graniczny (1978) dodali przedrostek „foto” aby podkreślić iż termin ten użyty został w znaczeniu interpretacji fotogeologicznej. Ze względu na swój liniowy charakter lineamenty mają szczególne znaczenie dla interpretacji tektoniki struktur nieciągłych. Dzięki interpretacji geologicznej m.in. obrazów satelitarnych Landsat 1 i 2, Meteor 25, 27 i 28 zaobserwowano, iż Karpaty poprzecinane są szeregiem lineamentów. Lineamenty te korelują się na pewnych odcinkach, a czasami na większej przestrzeni ze znanymi strefami uskoku (por. m.in. Motyl-Rakowska & Ślącza, 1984). Istnieją jednak uskoki, które nie mają swojego odzwierciedlenia na zdjęciach satelitarnych czy innych materiałach teledetekcyjnych. Mimo to z dotychczasowej literatury (m.in. Doktor i in., 1987) wynika, że większość fotolineamentów jest związana z elementami strukturalnymi podłoża geologicznego.

W prezentowanej pracy wyznaczono wstępnie przebieg lineamentów na obszarze między Dobczycami a Wilkowiskiem. Jest to jeden z przykładów możliwości zastosowań cyfrowego modelu terenu. Wyniki tego modelowania porównano z niektórymi istniejącymi już materiałami geologicznymi i teledetekcyjnymi m.in. (Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski, ark. Mszana Dolna 1:50 000, Burtan, 1974; Mapa Fotogeologiczna Polski 1: 1 000 000, Bażyński i in., 1984), a także z efektami własnych, terenowych prac geologiczno-kartograficznych autora.

Obszar dla którego wykonano cyfrowy model terenu (DEM) obejmuje fragment polskich Karpat zewnętrznych (ryc. 1), reprezentowanych tu głównie przez twory płaszczowin: podśląskiej, śląskiej i magurskiej. Budowa geologiczna tych płaszczowin składa się na obraz strukturalny omawianego obszaru obejmujący zapadlisko szczyrzyckie (Kuźniar, 1935), fragment strefy lanckorońsko-żegocińskiej z zatoką Skrzydlnej oraz okno tektoniczne Mszany Dolnej. Badania geologiczno-kartograficzne wykonywane przez autora obejmują co prawda fragment płaszczowiny śląskiej, w którym występuje zapadlisko szczyrzyckie oraz obszary bezpośredniego doń przyległe, ale dla dokładniejszego wyjaśnienia anomalnego układu strukturalnego depresji

*Uniwersytet Jagielloński, Instytut Nauk Geologicznych, ul. Oleandry 2a, 30-063 Kraków; chodyn@geos.ing.uj.edu.pl



Ryc. 1. Główne jednostki strukturalne Karpat zewnętrznych
Fig. 1. The main structural units of the Outer Carpathians

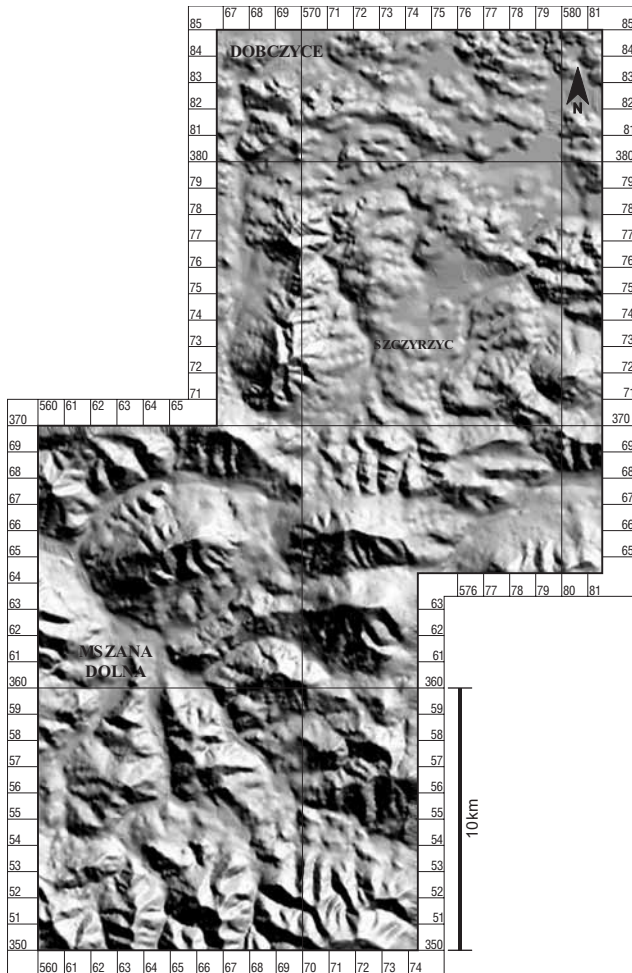
Szczyrzyca, obróbką cyfrową terenu objęto także sąsiednie fragmenty Karpat zewnętrznych. Depresja Szczyrzyca jest poprzeczną depresją strukturalną, której oś zorientowana jest prostopadłe do równoleżnikowo układających się tu osi głównych struktur fałdowych Karpat fliszowych. Depresja ta wyraźnie zaznacza się na mapach geologicznych 1: 50 000, 1: 200 000, a nawet 1: 500 000 (por. m.in. Sokołowski, 1954; Burtan, 1974; Burtan i in., 1981), a także na materiałach teledetekcyjnych, np. zdjęciach satelitarnych Landsat 1 i 2.

Materiały i metodyka

W ujęciu Gaździckiego (2001) — *Numeryczny Model Rzeźby Terenu* — *digital terrain model (DTM)*, *digital elevation model (DEM)*, to numeryczna reprezentacja fragmentu powierzchni ziemskiej, utworzona zazwyczaj przez zbiór punktów powierzchni oraz algorytmy służące do aproksymacji jej położenia i kształtu na podstawie współrzędnych x , y , z punktów. Podstawowe grupy modeli terenu to: modele analogowe, numeryczne, matematyczne, a także modele cyfrowe, czyli zbiory punktów o określonych współrzędnych wraz z określonym identyfikatorem (Adamczewski, 1998). Źródłem danych dla sporządzonego cyfrowego modelu terenu obejmującego obszar między Dobczycami a Mszaną Dolną były arkusze mapy topograficznej Polski w skali 1:25 000: Dobczyce (173.14), Królówka (173.23), Limanowa (173.43), Mszana Dolna (173.34) oraz Niedźwiedz (183.12). Przy użyciu programu Surfer 7 przeprowadzono digitalizację ekranową (*Map Digitize*) wymienionych arkuszy. Ponieważ zamiarem autora było przestrzenne odwzorowanie morfologii badanego terenu, dlatego cyfrowano kolejno poziomicę morfologiczną wyznaczającą wysokości odległe co 25 m w

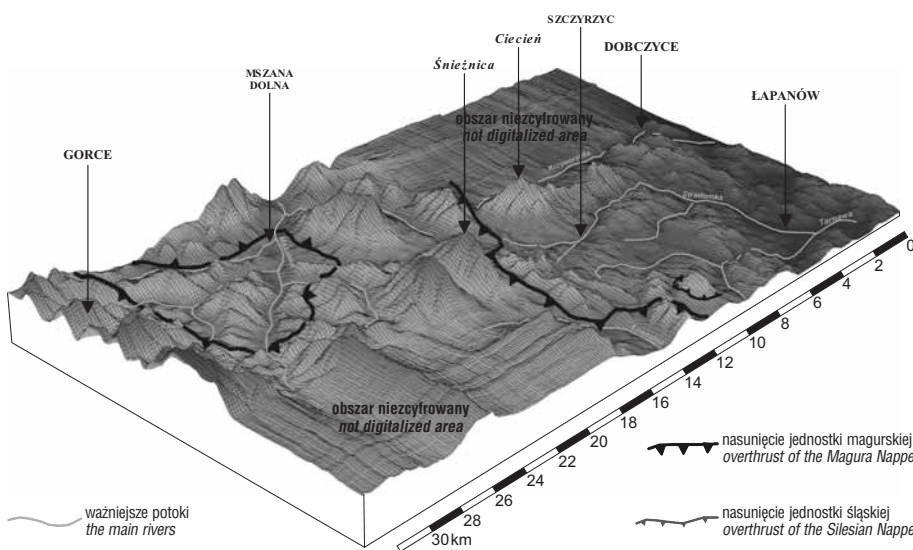
pienie zaczynając od poziomu o wartości 200 m n.p.m, a kończąc na poziomie 1250 m n.p.m, co odpowiadało wartościom względnym najniższej i najwyższej położonych punktów w badanym terenie. Dla każdego zaznaczonego punktu (węzła siatki) otrzymano współrzędne „ x ” i „ y ” odpowiadające długości i szerokości geograficznej. Następnie dla każdego z tych węzłów siatki wprowadzono odczytaną z mapy topograficznej wartość „ z ”, odpowiadającą wysokości tego punktu n.p.m. W ten sposób powstała siatka interpolacyjna (grid) 86 000 punktów o współrzędnych (x, y, z), która w dalszym etapie była wykorzystana do aproksymacji różnymi metodami dostępnymi w programie Surfera w tym metodą minimalnej odległości od punktu (*Inverse Distance to a Power*), minimalnej krzywizny (*Minimum Curvature*), metodą Sheparda (*Modified Shepard's Method*), czy metodą funkcji podstaw radialnych (*Radial Basis Functions*). Do analizy otrzymanej mapy siatkowej zastosowano ostatecznie aproksymację krigingiem liniowym, bowiem metoda ta oddaje regionalny kształt powierzchni morfologicznej najbardziej zbliżony do rzeczywistego obrazu morfologii terenu, a powstały obraz jest najbardziej zbliżony do rysunku poziomicowego mapy topograficznej. Dokładność odwzorowania rzeźby terenu zależy w dużym stopniu od skali cyfrowanych podkładów topograficznych, a także od gęstości siatki interpolacyjnej zależnej, np. od przyjętej odległości pomiędzy kolejnymi digitalizowanymi poziomiami (np. co 2, 5, 25 czy co 50 m).

Efektom końcowym opisanego wyżej procesu obróbki cyfrowej map topograficznych jest cieniowany relief terenu (*Shaded Relief Image*) (ryc. 2), który jest jedną z pierwszych prób przedstawienia w tej formie morfologii fragmentu polskich Karpat zewnętrznych i wykorzystania go w badaniach geologicznych. Zastosowaną metodą cieniowania było odbicie Lamberta (*Lambertian Reflection*).



Ryc. 2. Cieniowany relief terenu między Dobczycami a Mszaną Dolną (skala 1 : 25 000), oświetlenie z NE, kąt padania światła — poziomy 48° , pionowy 37°

Fig. 2. Shaded Relief Image for area between Dobczyce and Mszana Dolna villages (scale 1:25 000), light position angles — horizontal 48° , vertical 37°



Ryc. 3. Cyfrowy (3D) model terenu między Dobczycami a Mszaną Dolną z liniami nasunięć płaszczowin magurskiej i śląskiej (skala 1:25 000), widok z SE, projekcja perspektywiczna, nachylenie 30° , obrót 317°

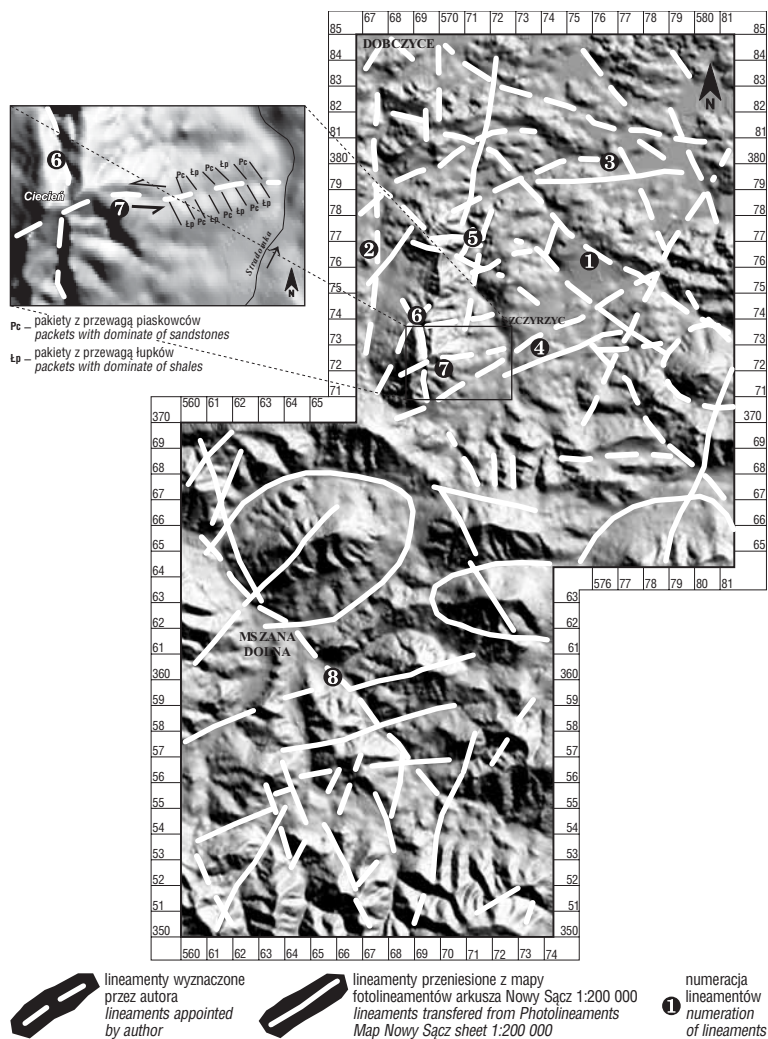
Fig. 3. Digital Elevation Model (3D) of the area between Dobczyce and Mszana Dolna villages with the thrust lines of the Magura and Silesian Nappe (scale 1:25 000), towards from SE, perspective projection, tilt 30° , rotation 317°

Podstawową zaletą cieniowanego reliefu jest wysoka wierność w odwzorowaniu rzeźby terenu i możliwość jej obserwacji z pominięciem, np. szaty roślinnej czy zabudowy, sieci komunikacyjnych itp. Ze względu na dokładność cyfrowania map topograficznych, kartometryczność cieniowanego reliefu terenu jest wysoka. Obraz cieniowanego reliefu w sposób bardziej czytelny eksponuje liniowe struktury geologiczne, takie jak: uskoki, spękania czy granice kompleksów zróżnicowanych litologicznie, w stosunku np. do map topograficznych. Dodatkowym ułatwieniem jest możliwość dowolnego obrotu modelem oraz dowolnej zmiany wysokości i kierunku oświetlenia terenu. Ze względu na technikę przygotowania modelu cyfrowego, ważny jest również fakt, iż wykonanie takiego modelu nie jest uzależnione od pory dnia ani pory roku, jak ma to miejsce np. w przypadku zdjęcia lotniczego.

Zastosowanie cieniowanego reliefu terenu może być pomocne przy interpretacji zdjęć lotniczych czy satelitarnych, a także map geologicznych, ponieważ można połączyć obraz rzeczywistej rzeźby terenu z np. powierzchniową budową geologiczną. Analizując możliwości interpretacyjne cieniowanego reliefu terenu należy wspomnieć także o metodzie, tzw. zagęszczonych poziomach, która była stosowana przez geologów już wcześniej (m.in. Ostaficzuk, 1975; Badura, 1996). Jej celem jest wychwycenie, np. anomalii tektonicznych przez stopniowe pomniejszanie podkładu topograficznego, a co za tym idzie zagęszczanie poziomów morfologicznych do momentu kiedy ewentualne zaburzenia, czy struktury tektoniczne ujawniają się w postaci ciemniejszych stref. Ta metoda ma jednak swoje techniczne ograniczenia. Przy zbyt dużym pomniejszeniu podkładu topograficznego, poziomice morfologiczne zaczynają się ze sobą zlewać, co w konsekwencji powoduje zaciemnienie obrazu uniemożliwiające niejednokrotnie interpretację. W przypadku cieniowanego reliefu terenu jest możliwe zarówno pomniejszanie, jak i powiększanie otrzymanego obrazu bez utraty czytelności struktur liniowych, przy założeniu że dobierana jest odpowiednia rozdzielczość interpretowanego obrazu. Do interpretacji

obszaru badań opisywanego w niniejszym artykule zastosowano również metodę zagęszczonych poziomów, co potwierdziło fakt, iż przebieg części mniejszych lineamentów nie jest tak dobrze czytelny, jak w przypadku cyfrowo przetworzonego cieniowanego reliefu terenu.

Korzystając z tych samych danych cyfrowych dzięki którym wykonano cieniowany relief terenu opracowano także przestrzenny (3D) model rzeźby terenu (ryc. 3) dla obszaru na S i SE od Dobczyc. Na rycinie tej zaznaczono linię nasunięcia płaszczowiny magurskiej na płaszczwinę śląską. Warto podkreślić, iż opisywane w niniejszym artykule cyfrowe metody wizualizacji przestrzennej nadają się m.in. do sporządzania przestrzennych map strukturalnych, powierzchni nasunięć, powierzchni stropu czy



Ryc. 4. Wstępna interpretacja lineamentów z uwzględnieniem mapy fotoliniamentów arkusza Nowy Sącz 1:200 000 (Doktór i in., 1984) oraz lineamentów wyznaczonych przez autora przy użyciu cieniowanego reliefu terenu dla obszaru między Dobczycami a Mszaną Dolną (skala 1:25 000)

Fig. 4. Preliminary interpretation of the lineaments against the background of Photolineaments Map Nowy Sącz sheet 1:200 000 (Doktór et. al., 1984) and lineaments appointed by author used with the aid of Shaded Relief Image for area between Dobczyce and Mszana Dolna villages (scale 1:25 000)

spągu poszczególnych jednostek litostratygraficznych itd. Takie modelowania są obecnie wykonywane (m.in. Chodyń, 2002; Graniczny & Mizerski, 2003; Grygar & Jelinek, 2002; Polak, 1999; Ryłko & Tomasz, 1999; Tomasz, 2003), ale — jak już wspomniano wcześniej — nie są one powszechne.

Istniejące już cyfrowo przetworzone dane satelitarne dla różnych obszarów ziemi w postaci cieniowanego reliefu terenu, dostępne są na kilku stronach internetowych, np. USGS <http://edcwww.cr.usgs.gov/landdaac/gtopo30/gtopo30.html>. Ze względu jednak na skalę odwzorowania powierzchni terenu (30° łuku ~ 1 km) nadają się one raczej do interpretacji rzeźby powierzchni ziemi w skali makroregionalnej czy kontynentalnej.

Przedstawiony w niniejszym opracowaniu cyfrowy relief terenu jest w chwili obecnej poszerzany i obejmuje również obszar na południe od okna tektonicznego Mszana Dolna (Gorce) i obszar rozciągający się na wschód od tego okna, po południk Nowego Sącza. Równocześnie jest

wykonywana przez autora mapa cyfrowa tych obszarów w skali 1 : 10 000.

Lineamenty

Przedstawiony w niniejszej pracy cieniowany relief terenu oraz przestrzenny model 3D dla obszaru między Dobczycami a Mszaną Dolną posłużył do wstępnej interpretacji rzeźby badanego terenu i zakodowanych w niej sieci lineamentów (ryc. 4). Autor ograniczył się do samodzielnego wyznaczenia oraz interpretacji lineamentów (linia przerywana) znajdujących się tylko w górnej części ryc. 4, bezpośrednio objętej terenowymi badaniami geologicznymi. Na rycinie tej przedstawiono także lineamenty (linia ciągła) przeniesione z mapy fotoliniamentów arkusza Nowy Sącz 1: 200 000 (ryc. 5). Na podstawie obserwacji terenowych, jak również analizy cieniowanego reliefu terenu i istniejących materiałów geologicznych, autor wydzielił wiele lineamentów, z których kilka opisano poniżej, a są to:

□ lineament 1 zaznaczający się na odcinku od Nowego Rybia i północnych stoków Kostrzy na ESE, po rejon Dobczyc na WNW, o biegu 125° . Lineament ten przecina południowo-wschodnią część zapadliska szczyrzyckiego tworząc wyraźny próg morfologiczny. Środkowy odcinek stanowiący 1/3 długości całego lineamentu zaznacza się w obrębie warstw krośnieńskich, które po prawej stronie lineamentu zapadają na ogół na S i SSW, natomiast po lewej stronie tego lineamentu na SE. Przebieg omawianego lineamentu jest w przybliżeniu prostopadły do biegu warstw. W strefie, gdzie zaznacza się on w morfologii terenu mamy kontakt tektoniczny oligoceńskich warstw krośnieńskich z utworami dolnej kredy płaszczowiny śląskiej i podśląskiej. Lineament 1 jest prawdopodobnie przejawem strefy uskokuwej, która z kolei może być kontrolowana przez strefę uskokuwej Kraków–Lubliniec zanurzającą się pod nasunięcie karpackie ku SE, a która ogranicza omawiany obszar od NE.

□ lineament 2 o rozciągłości N–S (bieg $\sim 2^\circ$), przebiegający wzdłuż doliny potoku Krzyworzeka, po zachodniej stronie pasma Ciecienia–Grodziska. Lineament ten miejscami pokrywa się z kontaktem tektonicznym płaszczowiny śląskiej z płaszczowiną podśląską, ukazującą się w oknie tektonicznym Wiśniowej. Sama linia nasunięcia płaszczowiny śląskiej na płaszczowinę podśląską przebiega po zachodnim stoku pasma Ciecienia, a nie doliną Krzyworzeka. W swojej północnej części lineament 2 łączy się z lineamentem 1 pod kątem $\sim 80^\circ$;

□ lineament 3 o kierunku WSW–ENE (bieg 65°), przebiegający wzdłuż fragmentu doliny potoku Stradomka i tnący zapadlisko szczyrzyckie w jego północnej części. Zaznaczenie się tego lineamentu w rzeźbie terenu jest prawdopodobnie związane z różnicą litologiczną pomiędzy gruboławicowymi piaskowcami istebniańskimi a łupkami menilitowymi. Redukcja części utworów paleocenu i eocenu ma charakter tektoniczny, a co za tym idzie, dolina potoku Stradomka na tym odcinku wykorzystuje tektoniczne założenia. O strefie uskokuwej w tym rejonie



Ryc. 5. Mapa fotolineamentów arkusza Nowy Sącz 1:200 000 (wg Doktor i in., 1987)

Fig. 5. Map of photolineaments on the Nowy Sącz sheet 1: 200 000 (after Doktor et al., 1987)

może świadczyć przesunięcie N części zapadliska szczyrzyckiego w kierunku SW w stosunku do części położonej na południe od lineamentu 3. Strefa, wzdłuż której kontynuuje się lineament 3, charakteryzuje się równoleżnikową intersekcją warstw.

□ lineament 4, słabiej zaznaczający się w morfologii terenu, przecinający zapadlisko szczyrzyckie w kierunku z SW na NE (bieg 58°), biegnący od południowego podnóża Ciecienia po rejon Mstowa i Sadka. Kierunek tego lineamentu jest w przybliżeniu równoległy do lineamentu 3.

□ lineament 5 o biegu 90° , na kierunku W–E, wyraźnie zaznaczający się w rzeźbie wschodniego stoku góry Grodzisko. Obserwacje terenowe potwierdziły związek omawianego lineamentu z występowaniem w tym rejonie uskoku, którego powierzchnia uskoku o zmiennych parametrach jest dobrze widoczna w odsłonięciach. Parametry tej powierzchni to $120/82$ SW, $268/50$ N i $250/80$ NNW. Na jej powierzchni występują lustra tektoniczne i rysy tektoniczne świadczące o rzutowo-przesuwczym

charakterze tego uskoku. Omawiany uskok rozcina utwory reprezentujące dolną i górną kredę: warstwy godulskie, zlepieniec malinowski i warstwy istebniańskie.

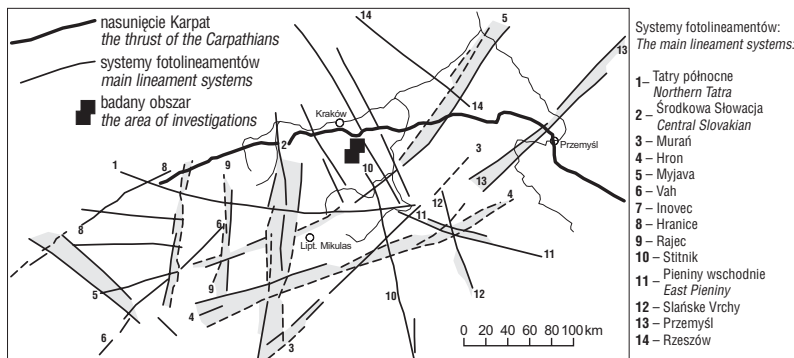
□ lineament 6 o biegu 88° , dobrze widoczny na cieniowanym reliefie terenu, pokrywający się z przebiegiem uskoku o rozciągłości N–S, stwierdzonego w czasie terenowych prac kartograficznych. Uskok ten rozcina warstwy godulskie budujące szczytowe partie masywu Ciecienia i tam parametry powierzchni uskoku określone są wartościami pomiarów zbliżonymi do $165/72$ NE. Uskok ten kontynuuje się na S od Ciecienia, co wynika z analizy rzeźby południowego stoku tej góry, chociaż w występujących tam nienajlepszych odsłonięciach nie udało się go bezpośrednio zidentyfikować.

□ lineament 7 o kierunku WSW–ENE (bieg 80°) związany także ze strefą uskoku rozpoznaną w odsłonięciach. Strefa ta przesuwa względem siebie jednostki litostratygraficzne, reprezentujące prawie kompletny profil sukcesji osadowej płaszczowiny śląskiej, poczynając od utworów dolnej kredy, a kończąc na utworach oligocenu. Opiswana strefa uskoku ma charakter lewoprzesuwczy o parametrach powierzchni uskoku, oscylujących wokół wartości $210/70$ WNW, $180/78$ W, $125/85$ SW.

□ lineament 8 znajdujący się już bezpośrednio poza obszarem badań terenowych autora, widoczny w dolnej części ryc. 5. Lineament ten przebiega przez obszar okna tektonicznego Mszany Dolnej z SE w kierunku NW (bieg 135°) i może być kontynuacją lineamentu Stitnika (ryc. 6).

Przeprowadzone do tej pory badania terenowe oraz analiza dostępnych materiałów geologicznych skłania do stwierdzenia, iż większość wyznaczonych w omawianym terenie lineamentów jest związanych z tektoniką pokrywy fliszowej. Oprócz powierzchniowego odzwierciedlenia struktur tektonicznych występujących w utworach fliszowych, zaobserwowano również związek między przebiegiem lineamentów a przebiegiem granic litologicznych. Często lineamentów widocznych na ryc. 4 wyraźnie zaznacza się w rzeźbie terenu, inne natomiast są słabiej widoczne i ulegają rozmyciu. Można to tłumaczyć w dwojaki sposób, zarówno głębokościowym założeniem struktur tektonicznych, jak i piaskowcowo-lupkowym wykształceniem utworów fliszowych, w różnym stopniu podlegającym procesom wietrzenia i erozji. Strefy gdzie dominują pakiety lupkowe słabiej zaznaczają się w morfologii terenu, a zatem linia przebiegu lineamentu również jest częściowo lub całkowicie zatarta. Inaczej jest w przypadku wychodni, np. piaskowców gruboławicowych, gdzie przebieg uskoku wyraźnie zaznacza się w morfologii terenu. Przykładem może być opisany wcześniej uskok 6 (ryc. 4).

W trakcie analizy obrazu cyfrowego reliefu terenu zaobserwowano jeszcze jedno interesujące zjawisko. W kilku miejscach zauważono występowanie naprzemiennie jaśniejszych i ciemniejszych pasów w obrazie powierzchni morfologicznej badanego obszaru (ryc. 4). Strefy jaśniejsze odpowiadają lepiej oświetlonym wyniesieniom rzeźby terenu. Rzucają one cień na miejsca obniżenia morfologicznych, które ujawniają się przez to jako strefy ciemniejsze. Należy jednak pamiętać, iż w zależności od kierunku i wysokości oświetlenia terenu efekt ten może być odwrócony. Z tego względu należy



Ryc. 6. Główne systemy fotolineamentów Karpat Zachodnich (wg Doktor i in., 1985)

Fig. 6. The main lineament systems of the Western Carpathians (after Doktor et al., 1985)

pomijając kierunki oświetlenia terenu powodujące wrażenie odwrócenia (inwersji) rzeźby, a także konfrontować cieniowany relief terenu z mapą topograficzną i z bezpośrednimi obserwacjami terenowymi. Przy założeniu, iż w omawianym przypadku strefy jaśniejsze to wyniesienia w morfologii, a strefy ciemniejsze obniżenia, można uznać te strefy za miejsca występowania odpowiednio utworów bardziej odpornych na erozję (np. piaskowców) i utworów mniej odpornych na erozję (np. łupków). Taka sytuacja miałyby potwierdzenie w kierunku (NW–SE) osi lokalnych fałdów w stosunku do rozciągłości wyniesień i obniżień terenu w tym rejonie. W przypadku omawianego obszaru badań zjawisko to zaobserwowano przede wszystkim w obrębie warstw krośnieńskich. Oczywiście należy być ostrożnym i nie odnosić takiej interpretacji do każdego podobnego przypadku, bez konfrontacji z rezultatami obserwacji prowadzonych w czasie terenowych prac kartograficznych.

Podsumowanie

Według modelu tektonicznego Karpat postulowanego przez Unruga (1980), główne lineamenty wyznaczone na terenie Karpat charakteryzują się wachlarzowatym rozkładem kierunków (Graniczny & Mizerski, 2003). W części zachodniej dominują kierunki NW–SE, natomiast we wschodniej części łuku karpacciego dominują kierunki NE–SW. Geologiczna ocena wyników analizy komputerowej fotolineamentów arkusza Nowy Sącz *Mapy 1 : 200 000* (Doktor i in., 1987; ryc. 5), wykazała istnienie 4 głównych systemów tektonicznych w obrębie wspomnianego arkusza. Systemy o kierunkach W–E i N–S są związane prawdopodobnie z podłożem Karpat, większość lineamentów o kierunkach NNW–SSE i NNE–SSW natomiast jest przypuszczalnie przejawem tektoniki w karpaccich jednostkach fliszowych. Ten rozkład kierunków potwierdzają częściowo obserwacje terenowe autora oraz analiza cieniowanego reliefu terenu i materiałów geologicznych dla obszaru badań przedstawionego w niniejszym artykule. Część lineamentów niezinterpretowanych na materiałach teledetekcyjnych, a ujawniających się w obrazie morfologicznym terenu, została wyznaczona przy użyciu zaprezentowanego cieniowanego reliefu terenu i modeli 3D. Badania terenowe wykazały, że część z lineamentów wyznaczonych przy użyciu cieniowanego reliefu terenu znajduje swoje odzwierciedlenie w przebiegu uskózków, które zostały rozpoznane przez autora w odsłonięciach. Opisana metoda wizualizacji przestrzennej może być przydatna do wstępnego inicjowania badań tektonicznych o charakterze zarówno lokalnym, jak i regionalnym, wspomagając równocześnie metody teledetekcyjne i klasyczne badania geologiczno-kartograficzne, mające na celu szczegółowe rozpoznanie budowy geologicznej Karpat. Przy zastosowaniu szerokiego spectrum możliwych do wykonania analiz i przetworzeń cyfrowych modeli terenu (DEM) istnieje szansa na bardziej wiarygodne interpretacje charakteru lineamentów w odniesieniu do tektoniki badanych obszarów.

Autor pragnie podziękować Panu dr hab. Markowi Cieszkowskiemu za cenne uwagi i wskazówki przy opracowaniu niniejszego artykułu, jak również anonimowym recenzentom za konstruktywne uwagi i wnikliwą recenzję.

Literatura

- ADAMCZEWSKI Z. 1998 — Wprowadzenie do numerycznego modelowania terenu. Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej, VIII Konferencja Naukowo-Techniczna, Systemy Informacji Przestrzennej, Warszawa.
- BADURA J. 1996 — Morfotektonika Obniżenia Żytawsko-Zgorzeleckiego. *Prz. Geol.*, 44: 1239–1243.
- BAŻYŃSKI J. 1982 — Metody interpretacji geologicznej zdjęć satelitarnych wybranych obszarów Polski. *Instr. i Met. Bad. Geol. Państw. Inst. Geol.*, 44.
- BAŻYŃSKI J. & GRANICZNY M. 1978 — Fotolineamenty i ich znaczenie w geologii. *Prz. Geol.*, 26: 288–296.
- BAŻYŃSKI J., DOKTÓR S. & GRANICZNY M. 1984 — Mapa Foto-geologiczna Polski 1:1 000 000. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- BURTAN J. 1974 — Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski, 1:50 000, Arkusz Mszana Dolna. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- BURTAN J., GOŁONKA J., OSZCZYPKO N., PAUL Z. & ŚLĄCZKA A. 1981 — Mapa Geologiczna Polski 1:200 000, Ark. Nowy Sącz. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- CHODYŃ R. 2002 — Szczyrzyc Synclorium in the Silesian Unit, Outer Carpathians, Poland-case study. *Geologica Carpathica, Spec. Issue 53, Extended Abstracts, Proceedings of the XVII Congress of Carpathian-Balkan Geol. Assoc.*, Bratislava, September 1st – 4th 2002 and Guide to Geological Exursions (electronic version).
- DADLEZ R. & JAROSZEWSKI W. 1994 — Tektonika. PWN, Warszawa.
- DOKTÓR S., DORNIC J., GRANICZNY M. & REICHWALDER P. 1985 — Structural elements of Western Carpathians and their Foredeep on the basis of satellite interpretation. *Kwart. Geol.*, 29: 129–138.
- DOKTÓR S., GRANICZNY M. & KUCHARSKI R. 1987 — Korelacja danych teledetekcyjnych i geofizycznych za pomocą technik cyfrowych. *Prz. Geol.*, 35: 453–461.
- GAŹDZICKI J. 2001 — Leksykon Geomatyczny. Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej, Wydawnictwo „Wieża Jutra”, Warszawa.
- GRANICZNY M. 1989 — Fotolineamenty i ich znaczenie geologiczne. *Instr. i Met. Bad. Geol. Państw. Inst. Geol.*, 50.
- GRANICZNY M. & MIZERSKI W. 2003 — Lineamenty na zdjęciach satelitarnych Polski – próba podsumowania. *Prz. Geol.*, 51: 474–482.
- GRYGAR R. & JELINEK J. 2002 — Complex structure study of mutual interaction of Alpine and Variscan orogeny using digital elevation model morphostructural analysis (Moravo-Silesian region — Czech Republic). *Geologica Carpathica, Spec. Issue 53, Extended Abstracts, Proceedings of the XVII Congress of Carpathian-Balkan Geol. Assoc.*, Bratislava, September 1st – 4th 2002 and Guide to Geological Exursions: 147–149.
- HOBBS W.H. 1904 — Lineaments of the Atlantic Border region. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 15: 483–506.
- KUŹNIAR C. 1935 — Sprawozdanie z badań na obszarze arkusza Wieliczka, wykonanych w r. 1934. *Posiedz. Nauk. Państw. Inst. Geol.* 41.
- MOTYL-RAKOWSKA J. & ŚLĄCZKA A. 1984 — Ważniejsze lineamenty Karpat i ich związek ze znanymi uskózkami. *Prz. Geol.*, 32: 72–77.
- O’LEARY D.W., FRIEDMAN J.D. & POHN H.A. 1976 — Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 87: 1463–1469.
- OSTAFICZUK S. 1975 — Mat. Symp. Współczesne i neotektoniczne ruchy skorupy ziemskiej w Polsce: 77–87. *Wyd. Geol.*
- OSTAFICZUK S. 1981 — Lineamenty jako odwzorowanie zjawisk tektonicznych na tle wybranych przykładów w Polsce. *Biul. Geol. UW*, 29: 195–267.
- POLAK A. 1999 — Budowa geologiczna płaszczowiny śląskiej w okolicy Skrzydlnej. *Prz. Geol.*, 47: 753–763.
- RYŁKO W. & TOMAŚ A. 1999 — Obraz skonsolidowanego podłoża Karpat w świetle badań magnetotelurycznych. *Pr. Państw. Inst. Geol.*, 168: 195–206.
- SOKOŁOWSKI S. 1954 — Mapa Geologiczna Karpat Polskich (Część Zachodnia) 1 : 200 000. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- TOMAŚ A. 2003 — Kształt powierzchni nasunięcia karpacciego i jego związku z tektoniką podkarpacciego podłoża skonsolidowanego. *Prz. Geol.*, 51: 159–162.
- UNRUG R. 1980 — Tectonic rotation of flysch nappes in the Polish Outer Carpathians. *Rocz. Pol. Tow. Geol.*, 50: 27–39.