

Kraków, 30. 09. 2015 r.

Dr hab. inż. Włodzimierz Margielewski, prof. IOP PAN
Instytut Ochrony Przyrody PAN
Al. A. Mickiewicza 33, 31-120 Kraków
margielewski@iop.krakow.pl

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr Olgi Kromuszczyńskiej

p.t Factors controlling hillslope morphology in selected areas of Valles Marineris, Mars

Przedstawiona do recenzji Rozprawa Doktorska dotyczy rzeźby wybranych obszarów planety Mars, w aspekcie analizy czynników wpływających na morfologię stoków. Praca liczy 109 stron tekstu uzupełnionych aneksem będącym integralną częścią rozprawy, w którym na 19 stronach przedstawiono profile topograficzne z Tatr, służące do analizy porównawczej. Pracę zilustrowano 69 rycinami (dodatkowe 7 rycin zestawiono w aneksie) oraz 23 zestawieniami tabelarycznymi. Jest także opatrzona 148 pozycjami literatury.

W dysertacji podjęto próbę określenia zależności pomiędzy czynnikami morfotwórczymi, a rozwojem rzeźby wybranych obszarów powierzchni Marsa. Praca wpisuje się w trend związany z analizą rzeźby powierzchni planet Układu Słonecznego: Marsa, Venus, księżyców Saturna, czy Uranu, w oparciu o dane uzyskane z sond międzyplanetarnych oraz o analogie w rozwoju rzeźby wybranych fragmentów powierzchni Ziemi o budowie geologicznej zbliżonej do analizowanych powierzchni planet, z uwzględnieniem odnośnych różnic w endo- i egzogenicznych czynnikach warunkujących rozwój rzeźby powierzchni tych planet.

Dysertacja, napisana w języku angielskim, ma raczej charakter monografii naukowej podzielonej na rozdziały w sposób przyjęty dla publikacji tego typu, co niewątpliwie stanowi zaletę pracy i świadczy o jej wysokim poziomie edytorskim. Jakkolwiek brak jest wyodrębnionego podrozdziału dotyczącego dotychczasowego stanu badań (typowego dla dysertacji), jednakże przegląd tych badań został wyczerpująco (niekiedy aż nadto) przedstawiony przy prezentacji każdego z zagadnień.

Szczegółowym celem pracy była analiza czynników morfotwórczych mających istotny wpływ na rozwój rzeźby stoków górskich wybranych obszarów Valles Marineris na Marsie: systemu rowów o długości ponad 2 tys. km, szerokości 75-100 km i wysokości ścian

dochodzących do 11 km, ze szczególnym uwzględnieniem procesów zachodzących w trakcie deglacji analizowanego obszaru. Deformacje grawitacyjne stwierdzone na stokach grzbietów występujących w systemie rowów obszaru Valles Marineris, były porównywane do podobnych (aczkolwiek - ze względu na skalę procesów – nie do końca analogicznych) struktur grawitacyjnych występujących na stokach polskich i słowackich Tatr, badanych przez Kandydatkę, z uwzględnieniem różnic w endogenicznych i egzogenicznych uwarunkowaniach rozwoju form rzeźby powierzchni obydwu planet.

Praca podzielona jest na 10 rozdziałów, zaś podział części z nich na podrozdziały znacznie ułatwia orientację w tekście, co powoduje, że dla czytelnika jest on przejrzysty, aczkolwiek układ i następstwo rozdziałów nie zawsze są konsekwentne. Numery rycin nawiązują do numerów rozdziałów do których stanowią ilustracje, co również ułatwia lekturę dysertacji.

Pracę rozpoczyna rozdział 1: **Introduction** w którym, w sposób nieco nietypowy dla tego typu rozdziałów wprowadzających, scharakteryzowano obszar (obszary) badań. Rozdział ten rozpoczyna się krótką inwokacją dotyczącą początków badań powierzchni Marsa, jednakże przedstawione tam warunki fizyczne panujące na Marsie (m.in. skład atmosfery), procesy warunkujące rozwój jego rzeźby, czy stratygrafia utworów budujących tę planetę z podziałem na epoki, stanowią opis obszaru badań i powinny być umieszczone w odnośnym rozdziale. Podobnie jest z porównaniem właściwości fizycznych Marsa i Ziemi (Table 1.1), koniecznym do przeprowadzenia analizy porównawczej procesów morfotwórczych zachodzących na obydwu planetach (a dostępnych do bezpośrednich badań jedynie na drugiej z nich), które powinno znaleźć się w rozdziale dotyczącym charakterystyki obszarów badań.

Wśród wymienionych w rozdziale **Introduction** procesów kształtujących stoki (*hillslope processes*) szczególną uwagę zwrócono na ruchy masowe rozwijane na obszarach wcześniej zlodowaconych, opisane tu terminem *mass wasting processes*, wśród których istotną rolę mają odgrywać, jak to zostało ujęte: *deep seated gravitational spreading* (w dalszych częściach dysertacji, termin ten Kandydatka opatrzyła skrótem DSGS – zob. str. 13, wiersz 21 od dołu i niżej). Rozdział **Introduction** kończy przedstawienie celów rozprawy oraz metod i środków użytych do realizacji tych celów.

Część rozdziału 2: **Hillslopes in terrestrial cold regions** poświęcona analizie stref klimatycznych Ziemi w aspekcie poszukiwań takich obszarów, na których procesy morfotwórcze mogą zachodzić analogicznie jak na Marsie, wydaje się nieco przedwcześnie lokowana. Ta część rozdziału 2, powinna być raczej częścią rozdziału 8: **Terrestrial analogue study**, co wydaje się logiczne z punktu widzenia poszukiwań analogii pomiędzy

rozwojem rzeźby na Marsie i na obszarach Ziemi, na których warunki geologiczne i procesy morfotwórcze są przynajmniej zbliżone do występujących na wybranych powierzchniach planety Mars. Mgr. O. Kromuszczyńska, w oparciu o dane literaturowe, zwróciła uwagę na istotną rolę wieloletniej zmarzliny (szczególnie zaś jej degradacji) na stabilność stromych stoków, zaś nasunięciom lodowców i ich deglacjacji w warunkach ziemskich słusznie przypisała istotne zmiany stanu naprężeń wpływających na deformacje stoku. Wśród typów deformacji stoku (*slope failure*) występujących w warunkach paraglacialnych, Autorka wymienia za McColl (2012): katastrofalne osuwiska skalne (*catastrophic rock slides*), przechył (przewracanie) mas skalnych (*rock topples*) wraz ze skalnymi obrywami (*rock falls*) i trzeci typ zniszczenia/deformacji stoku związany z powolnymi przemieszczeniami grawitacyjnymi, określony przez Kandydatkę jako: *deep seated gravitational spreading*. Jednakże użyty tu przez mgr O. Kromuszczyńską (jak też w późniejszych rozdziałach) termin dotyczący powolnych, rozległych i głębokich deformacji grawitacyjnych stoku (opatrzonej przez Autorkę akronimem DSGS), nie ma odniesienia w powołanej przez Kandydatkę literaturze (m.in. Crosta et al., 2008; Agliardi et al., 2012; 2013; McColl 2012). We wspomnianych pracach, używany jest termin *Deep-Seated Gravitational Slope Deformations* DSGSD. Jest on stosowany także w pracy: Agliardi et al., 2001; zaś w pracy Agliardi et al., 2012 (in: Clague & Stead red.) użyty jest akronim DSGSDs, ze zwróceniem uwagi na liczbę mnogą tych deformacji. Używany jest także skrót: DGSD (deep gravitational slope deformation – Tolomei et al., 2013, Geomorphology 201), jednakże terminologia ta nie odnosi się do ruchów masowych wyłącznie z rozciągania (rozsuwania) (*spreading*). Cytowany przez Kandydatkę McColl (2012), definiuje DSGSD jako powolny, wielkoskalowy spływ lub pełznięcie ośrodka skalnego (*slow flow – creep or sagging*) (tu: powolny spływ skalny – *rockflow* lub zjawisko pełznięcia mas skalnych – *sagging*, *Sackung* – termin wprowadzony przez Zischinskigo, 1966). Spływ skalny (*rock flow*, *Sackung*) wyróżniany przez International Geotechnical Societies UNESCO Working Party for World Landslide Inventory (WP/WLI, 1993 – Multilingual Landslide Glossary, s. 6.2, zob. także Dikau et al., 1996) i zdefiniowany jako: *spatially continuous movement in which surfaces of shear are short lived*, zaś typ przemieszczeń: *lateral spreads* (rozciąganie boczne), zdefiniowany jest jako: *extension of a cohesive soil or rock mass combined with a general subsidence of the fractured mass of cohesive material into softer underlying material*. Co prawda Agliardi et al., 2012, wśród DSGSDs obok spływu skalnego (pełznięcia) typu *sagging* (*Sackung*) wymieniają także *lateral spreads* (rozciąganie boczne) jako typ powolnych przemieszczeń grawitacyjnych zachodzących w poziomych lub niemal poziomo zalegających

gruboławicowych skałach osadowych (także Hutchinson, 1988). Jednakże przemieszczenia typu *spreading* są tu jednym z komponentów DSGSD. Utożsamianie zatem DSGSD wyłącznie ze „spreadingiem”, jest nieuzasadnione w świetle formalnej terminologii przemieszczeń grawitacyjnych (WP/WLI 1993). Rzecz jasna proces pełznięcia skał (*Rock flow*; *Sackung*) może być spowodowany ekstensyjnym rozciąganiem (*spreadingiem*) (i w tym znaczeniu obydwu sformułowań używają Varnes, et al., 1989). Jednakże z punktu widzenia formalnej terminologii ruchów masowych (WP/WLI, 1993), *spreading* i *Sackung* reprezentują różne typy przemieszczeń.

W dotychczas opublikowanych przez siebie pracach, mgr O. Kromuszczyńska traktuje przemieszczenia *Deep-Seated Gravitational Spreading* synonimicznie z przemieszczeniami typu *Sackung* (dosłownie: „*DSGS; known also as Sackung*”)(Kromuszczyńska, Mège, 2014; EPSC Abstract, vol. 9), bądź wręcz z *Deep-Seated Gravitational Slope Deformation* (DSGSD) lub *Sackung* (Kromuszczyńska et al., 2014; In: Zieliński et al. Eds. 2014; Springer publ.). Jednakże w Rozprawie Doktorskiej, kwestia związana z nomenklaturą ruchów masowych stosowaną w Dysertacji, powinna zostać uporządkowana, zaś używana terminologia powinna być adekwatna do stosowanej w cytowanych przez Kandydatkę pracach (Crosta et al., 2008; Agliardi et al., 2012; 2013; McColl, 2012), bądź, w przypadku wprowadzenia zmian, zostać zaproponowana przez Autorkę ze stosownym uzasadnieniem i powołaniem na prace własne (Kromuszczyńska, Mège, 2014; Kromuszczyńska et al., 2014).

Dla typów przemieszczeń analizowanych przez Autorkę, powodujących powstanie *uphill-facing normal faults scarps and crestal graben*, adekwatny byłby także model powolnego spływu skalnego (*sagging, rock creep, deep seated gravitational creep* – Dikau et al., 1996) zaproponowany przez Hutchinsona (1988), z podziałem na *rotational sagging, compound sagging, double-sided sagging (rotational or compound)* (dla wąskich wysokich grzbietów) i *topple sagging* (Hutchinson, 1988, zob. także Dikau et al., 1996, s. 152). Jednakże należy nadmienić, że dla skarp (także uskoków) związanych z *sagging* a skierowanych przeciwnie do spadku stoku, Hutchinson (1988) używa terminu: *up slope, up movement scarp*, zaś w pracy Dikau et al. (1996) w modelu (blokdiagramie) obrazującym *rock flow (Sackung)*, *uphill-facing scarps* są skierowane zgodnie z kierunkiem spadku stoku (Dikau et al., 1996, s. 151).

Inny model tworzenia skarp uskokowych generowanych ruchami masowymi (*gravity faults*) skierowanych przeciwnie do spadku stoku w efekcie przemieszczeń typu *lateral spreading (sensu stricto)* w obrębie wąskiego grzbietu Kelly Range w Alpach Nowozelandzkich, zaproponował Beck (1968) (zob. także Dikau et al., 1996, s. 132).

Rozdział 3: **Valles Marineris as a part of Tharsis region** posiada nieco niefortunny tytuł, raczej właściwy dla jednego z podrozdziałów typowego **Study area**, w którym najpierw należało by scharakteryzować ogólnie planetę Mars, później Tharsis region jako jednostkę nadrzędną, następnie zaś, szczegółowo – Valles Marineris jako jego część. Zatem tutaj właśnie, należałoby umieścić część informacji ogólnych o budowie geologicznej Marsa i właściwościach fizycznych planety, scharakteryzowanych nieco przedwcześnie w rozdziale **Introduction**, gdzie zamieszczono rycinę (Fig. 1.1) na której zilustrowano zasięg czasowy epok geologicznych omawianych w rozdziale 3.

Należy podkreślić, że budowa geologiczna i rzeźba przedstawiona w tym rozdziale, została przez Kandydatkę dobrze udokumentowana literaturowo, nosząc przy tym znamiona prezentacji dotychczasowego stanu badań w odnośnej kwestii, typowej dla dysertacji. Szczególną uwagę zwrócono na przedstawienie i przedyskutowanie różnych hipotez dotyczących rozwoju rozległego systemu rowów Valles Marineris wiązanych m.in. z zapadnięciem dna i ekstensją, ryftingiem zachodzącym w trakcie powstawania potężnego wybrzuszenia skorupy w rejonie Tharsis, lub fleksuralnym ugięciem skorupy Marsa powodującym subsydencję dna rowów. W świetle analizy rozwoju tektonicznego obszaru badań, zwraca uwagę Fig. 3.3, na której zaznaczono sieć czarnych linii bez odnośnych objaśnień. Dopiero sięgając do cytowanej w podpisie pod ryciną pracy Haubera i Kronberga (1999), można się zorientować, że są to uskoki o genezie ekstensyjnej (str. 102 dysertacji). Jednakże przebieg zespołu dyslokacji o kierunku S-N, jest charakterystyczny dla struktury końskiego ogona (*horsetail structure*) i to silnie rozbudowanej, typowej dla układu przestrzennego systemu dyslokacji powstających w silnym reżimie przesuwczym. Przy okazji faktu, o którym wspomina Kandydatka w rozdziale **Introduction**, że system rowów Valles Marineris jest największą tego typu formą w Układzie Słonecznym, należałoby wspomnieć, że góra Olympus Mons o wysokości 26 km, będąca wulkanem tarczowym, zaznaczona na Fig. 3, jest uważana za najwyższą dotychczas znaną górę w Układzie Słonecznym.

W rozdziale 4: **Data and methods** scharakteryzowano zarówno instrumenty (i metody) użyte w trakcie kolejnych międzyplanetarnych misji marsjańskich, jak i typ uzyskanych danych, w zestawieniu tabelarycznym. W kolejnych podrozdziałach, w przejrzysty sposób szczegółowo scharakteryzowano dane instrumentalne wykorzystane w dysertacji, z podaniem parametrów przyrządów, rozdzielczości obrazów, modeli powierzchni Marsa (DTM, DEM) wygenerowanych w oparciu o uzyskane dane, czy oprogramowanie użyte do analizy danych. Metodyka zastosowana do analizy danych, została zilustrowana odnośnymi przykładami (Fig. 4.1).

Do analizy form związanych z *Deep Seated Gravitational Slope Deformation*, Kandydatka wykorzystała profile topograficzne wygenerowane z Cyfrowego Modelu Wysokościowego (DEM) powierzchni Marsa, opracowanego w oparciu o obrazy kamery CTX (CTX DEMs). Analogiczne profile wykonane do analiz porównawczych na Ziemi, wykonano w Tatrach polskich i słowackich z użyciem odbiornika GPS.

W celu określenia geometrii przestrzennej nieciągłości będących efektem DSGSD, analizie porównawczej poddano pionowe i poziome przemieszczenia uskoku normalnych (mających wpływ na rozwój elementów rzeźby) oraz kąt zapadania skarpy uskokowej. W celu wyeliminowania wpływu procesów erozji i akumulacji na falsyfikację rzeczywistych rozmiarów powyższych parametrów uskoku, Autorka zastosowała prosty model na którym przedstawiła parametry uskoku z uwzględnieniem procesów i osadów maskujących rzeczywiste rozmiary przemieszczeń pionowych i poziomych w jego obrębie (Fig. 4.2). Jednocześnie zaproponowała algorytmy do obliczania rzeczywistych parametrów tych dyslokacji, z uwzględnieniem wpływu procesów erozji i akumulacji zacierających powierzchnie uskokowe. Szkoda jedynie, że w przypadku ryciny 4.2, opublikowanej uprzednio przez Autorkę w materiałach konferencyjnych (Kromuszczyńska, Mège, EPSC Abstracts, 2014), mgr O. Kromuszczyńska nie powołała się na odnośną, własną pracę.

W rozdziale 5: **Valles Marineris – morphological factors**, Kandydatka ponownie wraca do opisu geologii obszaru, tym razem bardzo szczegółowo charakteryzując litologię i tektonikę obszaru Valles Marineris, ilustrując je dogłębnym przeglądem bogatej literatury przedmiotu. Jednakże podrozdziały dotyczące litologii i tektoniki obszaru, powinny być częścią rozdziału 3 opisującego geologię i genezę rowów Valles Marineris.

Istotnym zagadnieniem poruszonym przez mgr. O. Kromuszczyńską dotyczącym procesów morfotwórczych na Marsie, jest rola wody (szczególnie w przeszłości) w kształtowaniu rzeźby (podrozdział 5.3), aczkolwiek tytuł podrozdziału (**H₂O – related processes**) jest nieco niefortunny: wzór chemiczny wody powinno się zastąpić słowem: „water” (e.g. *water-related processes*). Obok jezior, czy wezbrań powodziowych występujących tu w przeszłości, istotną rolę, szczególnie w formowaniu elementów rzeźby związanych z DSGSD (skarp przeciwnych do stoku, rowów grzbietowych) typowej dla głębokich grawitacyjnych deformacji stoku, odegrały zlodowacenia obszaru Valles Marineris. Spowodowały one powstanie form rzeźby typowych dla działalności glacialnej (podcięcia, zawieszone doliny, ścięte cokoły skalne), zaś ich pozostałością są współcześnie znaczne ilości kopalnego lodu na obszarze Valles Marineris.

W opisie czynników morfologicznych, dość krótko scharakteryzowano ruchy masowe, zaś ich współczesną aktywność wiązano jedynie z przemieszczeniami grawitacyjnymi zachodzącymi w niewielkiej skali, aczkolwiek istnienie grawitacji na Marsie (niemal trzykrotnie mniejszej niż na Ziemi) nie wyklucza generowania wielkich form ruchów masowych także współcześnie. Zwrócono także uwagę na procesy i formy eoliczne. Brak jest jednak opisu zjawisk impaktowych (meteoryty) i stowarzyszonych z nimi form rzeźby (kratery), widocznych choćby na Fig. 7.1; 7.2; 7.4; 7.23.

W rozdziale 6: **Valles Marineris hillslope morphology**, scharakteryzowano trzy podstawowe typy rzeźby (oraz ich kombinacje) występujące na zboczach grzbietów w obrębie Valles Marineris. Kandydatka wspomina, iż najbardziej powszechnym typem rzeźby jest *spur-and-gully morphology* (rzeźba wąwozowo-ostańcowa) kształtowana (według różnych autorów, których poglądy przedstawia Kandydatka) przez różnorodne procesy morfotwórcze, w zależności od przyjętej koncepcji - z udziałem wody lub bez. Ten typ rzeźby został przez Autorkę zilustrowany na Fig. 6.2, na której grzbiety boczne ewidentnie zakończone są trójkątnymi licami aktywnej skarpy uskokowej (*triangle faceted spur*, *triangular facets*, *flatirons*) uskoku normalnego powstałej wskutek zachodzącej tu elewacji przydyskokacyjnej (*footwall elevation* – Wernicke, Axen, 1988). Tego typu dźwiganie izostatyczne, którego efektem mogą być także zawieszone doliny widoczne na Fig. 6.2, niewątpliwie musiało mieć istotny wpływ na kształtowanie rzeźby obszaru. Podobne trójkątne lica są widoczne na ryc. 7.2 i 7.3., 7.5, 7.17, 7.23. Na rycinie 6.2, czy 7.2 widoczne są wielopoziomowe trójkątne lica, świadczące o kilku etapach elewowania izostatycznego grzbietu. Jakkolwiek Kandydatka wspomina (cytując odnośne prace), że rzeczywiście pierwotnie skarpy te były interpretowane jako uskoki normalne, później jednak przeważały koncepcje wiążące ich genezę z erozją subglacialną, podobnie jak występowanie tu zawieszonych dolin. O roli uskoku normalnych w formowaniu liniowych skarp (bazalnych) występujących u podstawy stoków elewowanych tektonicznie wzdłuż aktywnej skarpy uskokowej, wspomina Autorka wszak w rozdziale **Discussion** bazując na odnośnej literaturze, jako o jednej z koncepcji wyjaśniającej *spur-and-gully morphology* (s. 89, wiersze 6 od dołu). Ponadto uskoki te (zrzutowe normalne, obramujące podstawy grzbietów) przedstawione zostały na przekrojach zamieszczonych na Fig.: 3.5 oraz 5.1.

Szkoda, że Kandydatka nie podjęła próby własnej interpretacji występowania trójkątnych lic na czołach grzbietów bocznych, tym bardziej, że na obszarach górskich Ziemi, formy te są nie tylko dobrze zbadane i udokumentowane, ale stanowią istotny wskaźnik ruchów podnoszących, następujących wzdłuż uskoku normalnych (zob. choćby Hamblin,

1976; Anderson, 1977; Wallace 1978; Gutierrez et al., 1998; Zuchiewicz, McCalpin, 2000). Modelowania tego typu elementów mofrostrukturalnych dają wręcz możliwości określenia wielkości zrzutów w strefach uskoków normalnych (Petit et al., 2009).

Drugi z głównych typów rzeźby występujących na analizowanym obszarze, jest związany z rozwojem *tributary canyons* (kaniony „boczne”, dochodzące do głównych rowów). Skośny zazwyczaj przebieg tych form w stosunku do głównych kanionów (tu: *chasmata*, rozumianych jako głębokich, wydłużonych zagłębień o stromych ścianach) był wiązany (przez cytowanych autorów) z uwarunkowaniami strukturalnymi ich rozwoju i nawiązywał do przebiegu uskoków i fałdów.

Interesującą kwestią rozwoju rozległych osuwisk, których formy rzeźby są trzecim typem morfologicznym analizowanego obszaru, są dyskutowane przez Kandydatkę (w oparciu o dane literaturowe) niekiedy skrajnie odmienne poglądy różnych autorów, na rolę wody (i lodu) w ich formowaniu, jak również na zróżnicowany charakter procesów i zjawisk powodujących inicjację i rozwój ruchów masowych. Długi czas powstawania i rozwoju osuwisk analizowanego regionu, został dotychczas oszacowany przez badaczy zagadnienia, na: 3.5 mld – 50 mln lat temu. W oparciu o analizę literatury przedmiotu, Kandydatka wiązała intensyfikację ruchów masowych z procesami paraglacialnymi, wstrząsami sejsmicznymi, czy działalnością wulkaniczną.

Rozdział 7: **Reshaping of Valles Marineris walls by deep-seated gravitational spreading**, dotyczący przekształcania stoków grzbietów występujących w systemie rowów Valles Marineris przez głębokie grawitacyjne deformacje stoku (DSGSD), zawiera wyniki badań i analiz własnych mgr O. Kromuszczyńskiej. Analizy zostały przeprowadzone na trzech wybranych obszarach w obrębie trzech różnych grzbietów występujących w strefie zespołu rowów Valles Marineris, przedstawionych na Fig. 7.1. Grzbiety te, wznoszące się ponad dnem rowów na wysokość 5.0-6.2 km, były przekształcane przez ruchy masowe: głębokie (głęboko posadowione) grawitacyjne deformacje stoków rozwijane w warunkach ekstensyjnego rozciągania tych grzbietów. Zdaniem Kandydatki, efektem powolnego przekształcania grawitacyjnego tych stoków wskutek oddziaływania DSGSD, są skarpy uskoków normalnych przeciwstawne do stoku (*uphill-facing normal faults scarps*), czy rowy rozpadlinowe rozdzielające wierzchowinowe partie grzbietów. Zdaniem mgr O. Kromuszczyńskiej, powstanie zespołu tych form, jest efektem zmiany naprężeń w obrębie masywów skalnych, spowodowanej zanikiem występujących tu lodowców. Skalę tych przemieszczeń, mgr O. Kromuszczyńska oszacowała w oparciu o obliczenia pionowych i poziomych przemieszczeń uskoków (na bazie analiz profiliów wygenerowanych z cyfrowego

modelu wysokościowego), których skarpy obramują formy morfologiczne powstałe w efekcie DSGSD.

Pierwszy z analizowanych obszarów znajduje się w obrębie grzbietu wewnętrznego występującego w rowie Coprates Chasma i wznosi się na wysokość 5.5 km, osiągając szerokość podstawy 22 km (Fig. 7.2). Drugi z grzbietów dzielących rowy (Chasmatas) Melas i Candor osiąga wysokość 5 km i szerokość 56 km (Fig. 7.3). Trzeci z grzbietów wznosi się pomiędzy rowami Candor i Ophir na wysokość 6.2 km, zaś jego szerokość wynosi 35 km (Fig. 7.4). W obrębie wszystkich analizowanych grzbietów występują rowy grzbietowe (na obszarze 2, rów grzbietowy jest szczególnie rozległy) oraz szereg rowów rozwijanych na stokach z udziałem skarp uskoków przeciwnych do stoku.

Dla każdego z obszarów, w oparciu o cyfrowy model wysokościowy (DEM), Kandydatka wykonała od kilkunastu (grzbiet w obrębie rowu Coprates) do kilku (pozostałe dwa obszary) profilów stoków, wyznaczając w ich obrębie miejsca występowania uskoków normalnych o skarpach przeciwnych do stoku. Poszczególne profile stoków, których lokalizacja i przebieg zostały zaznaczone na Fig. 7.5; 7.17 i 7.23, zostały uzupełnione o szereg szczegółowych profilów.

Dla każdego z uskoków stwierdzonych w obrębie analizowanych profilów, obliczono kąt zapadania powierzchni uskokowej, wartości przemieszczeń poziomych i wartości pionowych przemieszczeń sięgających niekiedy ponad 1.5 km, zestawiając te dane tabelarycznie (Tabele 7.1-7.6). Szkoda jednak, że dysponując takimi danymi, Kandydatka nie wrysowała przebiegu tych uskoków (tak jak to zostało zaprezentowane na ryc. 3.5) na przedstawianych profilach stoków, na których jedynie strzałkami zaznaczono miejsce występowania dyslokacji (nie wiadomo przy tym, czy przy zróżnicowanej orientacji strzałek, ich kierunki wskazują na przebieg powierzchni uskokowej, czy jedynie miejsce występowania uskoku). Na każdym z profilów podano numery uskoków, aczkolwiek nie zostały one ponumerowane na rycinach z ich lokalizacją (Fig. 7.5; 7.17; 7.23). Taka sieć uskoków z przebiegiem i hipotetycznym zasięgiem zestawionych przekrojach, mogłaby być podstawą do przedstawienia choćby jednego, ogólnego modelu charakteru rozwoju DSGSD na analizowanych stokach powierzchni Marsa, adekwatnie do modelu zamieszczonego na ryc. 2.4.b. Tego typu uproszczony model ze szkicowo wrysowaną siecią uskoków, przedstawiła wszak Kandydatka na przekroju Valles Marineris prezentowanym w materiałach z 43 Lunar and Planetary Science Conference 2012 (Kromuszczyńska, et al., 2012). Podobna uwaga dotyczy profilów topograficznych Tatr (jako analogicznych do tych z powierzchni Marsa) na których także zaznaczono jedynie miejsce występowania uskoków.

Rozdział 8: **Terrestrial analogue study** zawiera wyniki badań porównawczych nad występowaniem i naturą DSGSD na obszarze Tatr, w oparciu o badania terenowe mgr Olgi Kromuszczyńskiej. W przeciwieństwie jednak do metodyki badań obszaru Marsa opartej na analizie cyfrowego modeli wysokościowego, na wybranych siedmiu obszarach Tatr, dla określenia pionowych i poziomych przemieszczeń uskoków, Kandydatka użyła techniki pomiarowej GPS o dużej dokładności (szczegółowo charakteryzując metodykę), wykonując profile wybranych stoków Tatr. Przedstawiła także przegląd literatury przedmiotu dotyczący badań DSGSD w Tatrach. Jakkolwiek każde z siedmiu stanowisk, w obrębie których zostały wykonane prace terenowe, zostało scharakteryzowane, ich lokalizacja na Fig. 8.4, która jest nieco nieczytelna (nie zostało objaśnione jaki jest typ zobrazowania – charakter ryciny wskazuje, że jest to monochromatyczne zdjęcie lotnicze), wobec braku nazw miejscowości, czy szczytów, jest enigmatyczna. Słaba jest także jakość rycin (zdjęć lotniczych) poszczególnych obszarów, na których zaznaczono występowanie skarp uskokowych związanych z DSGSD, prezentowanych na barwnych zdjęciach cyfrowych (Figs. 8.5-8.11). Równie nieczytelne są zdjęcia lotnicze, na których zaznaczono przebieg poszczególnych profilów (Figs: 8.12-8.18). Analogicznie, jak w przypadku analizy grzbietów Marsa, przedstawiono profile stoków, na których strzałkami zaznaczono występowanie uskoków związanych z DSGSD (odnośne figury zestawiono w Aneksie). Jednakże w przeciwieństwie do profilów opracowanych dla Valles Marineris, profile tatrzańskie, ze względu na technikę pomiarową, znaczone są punktami o rzadkim niekiedy zagęszczeniu, zaś strzałki wskazujące miejsce występowania uskoków niekiedy są „zawieszone w powietrzu” (Anex, s. 111). Podobnie jak w przypadku stoków na Marsie, nie zaznaczono przebiegu tych uskoków, stąd niewiele wiadomo o układzie przestrzennym form DSGSD. Takie przekroje przez stoki Tatr słowackich z zaznaczonymi nieciągłościami, można znaleźć w monografii Nemčoka 1982 (Sosuvy v Slovenských Karpatoch, Veda, Bratislava).

W przeciwieństwie do grzbietów na Marsie niedostępnych do bezpośrednich obserwacji terenowych, w trakcie badań terenowych na obszarze Tatr, istniała możliwość jednoznacznego wykazania istnienia skarp uskokowych związanych przez Kandydatkę z DSGSD, poprzez obserwację i analizę charakteru ich powierzchni. Rozpoznanie powierzchni uskokowej, zwłaszcza uskoku normalnego, jest dość proste: zwykle powierzchnia ta jest zlustrowana, towarzyszy jej sieć charakterystycznych spękań (tzw. spękania riedlowskie). W przypadku Tatr, można było pokusić się o prezentację choćby jednej, przykładowej powierzchni uskoku, podobnie jak zostało to zaprezentowane w pracy Hippolyte et al., 2006 dotyczącej DSGSD we francuskich Alpach (Tectonophysic 418).

W rozdziale 9: **Discussion**, Kandydatka, w oparciu o dogłębną analizę bogatej literatury przedmiotu oraz badania własne, przedstawiła litologiczne i strukturalne uwarunkowania rozwoju rzeźby stoków na obszarze Valles Marineris, rozpatrując przy tym efekt oddziaływania różnorodnych czynników morfotwórczych w czasie i przedstawiając poglądy (często alternatywne) licznych badaczy przedmiotu w odnośnej kwestii. Istotnym elementem dotyczącym przekształcania rzeźby, była szczegółowa analiza czynników wpływających na rozwój ruchów masowych, w tym szczególnie DSGSD, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu warunków paraglacjalnych (zwłaszcza oscylacji lodowców) na rozwój głębokich, grawitacyjnych deformacji stoków.

Ważną częścią rozdziału **Discussion** jest porównanie charakteru rozwoju DSGSD przekształcających stoki w warunkach Marsa i ziemskich, w oparciu o kilka wskaźników (stosunek wysokości do szerokości grzbietów, pionowe i poziome przemieszczenia w obrębie uskoku generowanych przez DSGSD). Uwzględniając różnice w skali form i procesów, Kandydatka wykazała podobieństwa w zakresie przemieszczeń pionowych i poziomych uskoku oraz różnice związane ze skalą przemieszczeń grawitacyjnych na obydwu planetach, spowodowane (wobec znacznie większych rozmiarów stoków) większym potencjałem grawitacyjnym stoków na Marsie, niezależnie od występującego tam niemal trzykrotnie mniejszego przyciągania grawitacyjnego, niż na Ziemi. Innymi czynnikami wpływającymi na różnicę w skali przemieszczeń DSGSD, w tym na większą podatność stoków na Marsie na tego typu deformacje stoków są, zdaniem Kandydatki, litologia obszaru Valles Marineris, jak też ilość oscylacji lodowców (większa na Marsie) wpływająca na sukcesywny rozwój DSGSD na stokach górskich Marsa.

W rozdziale 10: **Conclusions** podsumowującym dysertację, Kandydatka przedstawiła poglądy na procesy i formy rzeźby kształtujące powierzchnię analizowanego obszaru Marsa. Jednakże charakterystyka wpływu różnorodnych czynników na rozwój rzeźby została tu poparta licznym cytowaniem odnośnej literatury, co w tego typu rozdziałach podsumowujących badania własne jest raczej nietypowe. Rozdział ilustruje rycina przedstawiająca rozwój procesów i form rzeźby na Marsie w skali czasu (Fig. 10.1). Analizując warunki rozwoju i skalę DSGSD na Marsie, mgr O. Kromuszczyńska odniosła się do analogicznych form rozwijanych w warunkach ziemskich na obszarze Tatr, wskazując na podobieństwa i różnice rozwoju tych form na obydwu planetach. Kończąc podsumowanie (**Conclusions**) odnoszące się wszak do własnych wyników, Autorka nie ustrzegła się ogólnych sformułowań typu: „*The history of formation and evolution of Valles Marineris is very complicated*”, czy „*It is a place incomparable to any other where the past meets the*

present”. Również Fig. 10.2, nazbyt schematyczna, niepotrzebnie, moim zdaniem dubluje Fig. 9.1c.

Literatura licząca 148 pozycji, liczna i wyczerpująco ilustrująca zagadnienia poruszane w pracy, wskazuje na doskonałą orientację Kandydatki w problematyce przedmiotu. Oczywiście można sugerować uzupełnienia literatury o prace dotyczące m.in. geometrii przemieszczeń uskoku normalnych na Marsie (Polit et al., 2009, *Journal of Structural Geology* 31), czy alternatywnych modeli rozwoju DSGSD na obszarach górskich Ziemi (Hippolyte et al., 2006, *Tectonophysics* 418), jednakże nie umniejsza to wysokiej oceny swobodnego poruszania się Kandydatki w literaturze przedmiotu.

W kwestii problematyki przedstawionej w Dysertacji, nasuwają się jednak pewne refleksje dotyczące niektórych zagadnień poruszonych w pracy. Wobec dość homogenicznego modelu rozwoju DSGSD na analizowanych stokach Marsa z występowaniem *uphill-facing normal fault scarp* zaprezentowanego przez Kandydatkę, należy wziąć pod uwagę także inne koncepcje rozwoju części tych głębokich deformacji grawitacyjnych stoków. Wobec niemożności przeprowadzenia bezpośrednich badań, nie można wykluczyć, że rozległe rowy (multiple ridges) stwierdzone na stokach analizowanych grzbietów Marsa, niekoniecznie musiały powstać wyłącznie przy udziale uskoku generowanych w trakcie tworzenia DSGSD, o skarpach wyłącznie przeciwnych do stoku. Badania wykonane dotychczas w obrębie rozległych rowów grzbietowych w Karpatach fliszowych wykazały, że powstały one z udziałem powolnych przemieszczeń grawitacyjnych typu *toppling*, rozwijanych bez udziału dyslokacji (Margielewski, 2004; 2006). Abstrahując od różnic w skali przemieszczeń, nie można wykluczyć rozwoju tego typu powolnie formowanych ruchów masowych (i związanych z nimi form) na stokach przekształcanych przez DSGSD, analizowanych przez Kandydatkę na Marsie. Typ *topple sagging* (DSGSD) sensu Hutchinson (1988), byłby adekwatny właśnie dla tego typu przemieszczeń. Kompleksowy model rozwoju skarp obramujących rowy grzbietowe (czy półrowy) z różnego typu przemieszczeniami spowodowanymi powolnym pełznięciem skał (*sagging*, *Sckung*) z udziałem *antislope fault scarp* (*uphill-facing scarp*), *tensional antislope scarp* z udziałem przemieszczenia typu *toppling*, czy *ridgetop through*, generowany w efekcie podobnych przemieszczeń zaproponowali Hippolyte et al., 2006 w oparciu o wyniki badań w Alpach francuskich (*Tectonophysics* 418/2006, s. 261). Podobną różnorodność form obserwowali także Gutiérrez-Santolalla et al. 2005 w hiszpańskich Pirenejach (*Geomorphology* 69/2005).

W Dysertacji uwzględniono jedynie uskoki normalne o przebiegu skarpy przeciwnym do kierunku spadku stoku, jako typowe dla DSGSD. W modelu rozwoju skarp obramujących

rowy grzbietowe, czy półrowy, nie rozważano możliwości występowania powierzchni uskokowych nachylonych w kierunku spadku stoku (określonych w obrębie jednego z podtypów przemieszczeń *rock-flow/sagging* przez Hutchinsona – 1988, jako *normal, down movement scarps*). Jak już wspomniano w recenzji, taki model rozwoju DSGSD (ze skarpami zapadającymi w kierunku spadku stoku) był prezentowany także dla form typu *Sackung* w pracy Dikau et al., 1996 (s. 151). Powstawanie rowów na stokach, możliwe jest także w obrębie normalnych uskoków listrycznych (szuflowych) o skrzydłach zrzuconych w kierunku spadku stoku, przy udziale uskoków przeciwnych, warunkujących przemieszczenia o charakterze antytetycznym.

Należałoby rozważyć także następujące kwestie, nasuwające się w trakcie lektury dysertacji:

- Czy w przypadku modelu uskoku normalnego o orientacji: *uphill-facing normal fault scarp* przedstawionego na Fig. 4.2, nie należałoby w jakiś sposób uwzględnić (lub choćby wspomnieć o tym fakcie, przy przygotowywaniu pracy do druku), strefy ścinania (mającej pewną miąższość/szerokość) występującej wzdłuż powierzchni uskoku. Przy zrzucie uskoku normalnego (przemieszczeniach „pionowych”) sięgającym 1 km (tab. 7.4), nie jest możliwe, aby wzdłuż powierzchni uskokowej nie wykształciła się zmelanżowana strefa uskokowa o określonej, nierzadko znacznej (przy tak wielkich przemieszczeniach) szerokości. W tej kwestii interesujące jest zatem, jak w tym przypadku, należałoby określić zakres przemieszczeń poziomych w obrębie uskoku ?

- Niewątpliwie pomocne w analizie form rzeźby, przebiegu dyslokacji, czy innych nieciągłości na grzbietach Marsa, byłyby wskaźnikowe mapy morfometryczne, wygenerowane w oparciu o DEM, którym wszak Kandydatka dysponowała. Na podstawie map zagęszczonych poziomic, map nachyleń, map deniwelacji, powierzchni szczytowych, czy innych, można było określić wzajemne relacje przestrzenne uzyskanych lineamentów z przebiegiem osi grzbietów i wąwozów (*spur-and gully relief*), rowów (*tributary canyons*), czy hipotetycznych dyslokacji. Szkoda zatem, że Kandydatka nie sięgnęła po wspomniane analizy morfometryczne, użyteczne przy tego typu opracowaniach (zob. choćby Kasprzak, Traczyk 2010, Landform Analysis, 13; Brzezińska-Wójcik, 2013, UMCS publ.).

- Wobec występowania na Marsie elewacji przydyslokacyjnych wspomnianych przez Kandydatkę na str. 89 (z powołaniem na pracę Peulvast et al., 2001), wskazujących na występowanie tu ruchów izostatycznych, należałoby także rozważyć kwestię izostatycznego, kompensacyjnego dźwignia osi rowów Valles Marineris uwolnionych zarówno od znacznych mas lodowych, jak i nadkładu. Rozpatrując analogie ziemskie, tego typu

izostatyczne dźwiganie osiowych partii dolin, przy jednoczesnym wypaczaniu (dźwiganiu) krawędziowych partii okalających je wierzchowin, stwierdzono m.in. w Himalajach (Wager, 1937), czy w obrębie Kanionu Kolorado (Potter, McGill, 1978; Ollier, 1981). Według Olliera (1981; 1987), wtórne fałdy grawitacyjne, zaczynają się tworzyć w efekcie kompensacji izostatycznej, już przy wysokościach względnych nie przekraczających 600 m. Przy wysokościach względnych analizowanych grzbietów Marsa sięgających 5.0-6.2 km, tego typu odkształcenia skał generujące wszak znaczny wzrost ich anizotropii tektonicznej, warte są rozważenia tym bardziej, że na Fig. 7.1, w obrębie płaskich den rowów, na przedpolu analizowanych grzbietów (e.g. site 1; site 2), występują charakterystyczne wybrzuszenia (zob. także Fig. 7.3).

Konkludując, należy zaznaczyć, iż powyższe kwestie generalnie nie mają charakteru zastrzeżeń merytorycznych odnośnie do recenzowanej dysertacji. Jednak pożądane byłoby ich rozważenie przy opracowywaniu bardziej kompleksowych modeli rozwoju DSGSD na grzbietach górskich Marsa, czy przy analizie czynników wpływających na ich rozwój.

Uwagi szczegółowe:

- W tabeli 1.1, wśród materiału budującego powierzchnię Marsa i Ziemi, w przypadku Marsa pominięto skały metamorficzne (a w przypadku występowaniu tu procesów wulkanicznych przedstawionych na Fig. 1.1, metamorfizm kontaktowy i utwory skalne będące jego efektem, powinny wszak występować), zaś w przypadku powierzchni Ziemi, pominięto utwory pokrywowe (wietrzeniowe, przemieszczane grawitacyjnie), wyszczególniono natomiast gleby. Wymienienie oceanów jako „materiału powierzchniowego” wydaje się nieco niefortunne.
- Na Fig. 1. (str. 5) brak jest jednostek skali czasu. Można się domyślać, że chodzi o mld lat.
- Fig. 2.4. W podpisie do ryciny termin *Deep – Seated Gravitational Slope Deformation* (DSGSD) został zastąpiony terminem *Deep Seated Gravitational Spreading*, do których zaliczono *Sackung* (b), co spowodowało pomieszanie terminologii ruchów masowych. Ponadto przekrój prezentowany na Fig. 2.4. b, jest autorstwa Mahra (1977) i jest przekrojem przez Chabenec w Tatrach, zaś Nemčok (1973) przedstawił bardziej uproszczony przekrój – zob. także Nemčok 1982 – Sosuvy v Slovenských Karpatoch, także Crosta 1996).
- W podpisie do Fig. 3.3 brak jest objaśnień użytych sygnatur.
- Fig. 5.3. jest nieco nieczytelna, szczególnie odnośnie do objaśnień. Podobnie w przypadku Fig. 6.1. Obydwie ryciny są zbyt małe, co wpływa na ich czytelność.

- W objaśnieniach do Fig. 7.1 nie wykazano obszarów zaznaczonych na niebiesko. Można się domyślać, że chodzi o obszary przekształcane przez DSGSD. Brak jest także stron Marsa (kierunku północnego).
- Na profilach zamieszczonych na Figs. 7.6-7.16, nie zaznaczono stron Marsa, czy choćby kierunków przebiegu profilów znaczonej na Fig. 7.5. Dotyczy to wszystkich prezentowanych profilów (także tych z Tatr, na których nie zaznaczono stron świata)
- na Fig. 10.1 wśród czynników/procesów morfotwórczych, pominięte zostały wstrząsy sejsmiczne (o genezie tektonicznej czy impaktowej), aczkolwiek w prezentowanych tam formach rzeźby (landslides) aktywność sejsmiczna, w tym impaktowa, została wykazana wśród procesów powodujących ich powstanie.

Podsumowując, pragnę podkreślić, że rozprawa doktorska mgr Olgi Kromuszczyńskiej p.t.: **Factors controlling hillslope morphology in selected areas of Valles Marineris, Mars** stanowi ważny wkład w poznanie genezy i uwarunkowań rozwoju rzeźby wybranych stoków planety Mars, przekształcanych przez głębokie, powolne deformacje grawitacyjne. Kandydatka wykazała dogłębną znajomość problematyki związanej z geologią i rzeźbą Marsa, popartą kompleksową analizą danych literaturowych, zaś zastosowana przez nią metodyka, wskazuje na dobry warsztat naukowy. Wyniki licznych, pracochłonnych modelowań dały Jej podstawy do wnioskowania odnośnie do zależności rzeźby wybranych obszarów Marsa od tektoniki, zmienności litologicznej skał, zwłaszcza zaś przemieszczeń grawitacyjnych. Interpretacja wyników i wnioski są poprawne, aczkolwiek należy rozważyć możliwość występowania większej różnorodności typów głębokich grawitacyjnych deformacji stoku, stosownie do uwag przedstawionych w niniejszej recenzji.

Uwagi krytyczne zwarte w recenzji, nie umniejszają oceny rozprawy doktorskiej, która w mojej opinii jest pracą oryginalną, zrealizowaną od etapu zakreszenia celu pracy, poprzez ich wykonanie, a kończąc na sposobie opracowania i przedstawienia ich wyników. Na szczególne podkreślenie zasługuje duży wkład pracy, wykonanej przez Kandydatkę w trakcie opracowywania koncepcji w oparciu o wyczerpującą analizę bogatej literatury przedmiotu, materiałów uzyskanych z sond kosmicznych, licznych, wykonanych przez nią pracochłonnych analiz i modelowań cyfrowych, jak też prac terenowych przeprowadzonych w Tatrach. Przy przygotowywaniu pracy do druku, pożądanym byłoby jednak pewne uporządkowanie rozdziałów w sposób zaproponowany w recenzji, jak też uporządkowanie kwestii terminologicznych.

W świetle powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Olgi Kromuszczyńskiej p.t.: „Factors controlling hillslope morphology in selected areas of Valles Marineris, Mars” spełnia warunki określone w *Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, z późniejszymi zmianami (tekst jednolity z 2011r.)* oraz w *Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora i wnioskuje o dopuszczenie mgr Olgi Kromuszczyńskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.*

W. Majewski