

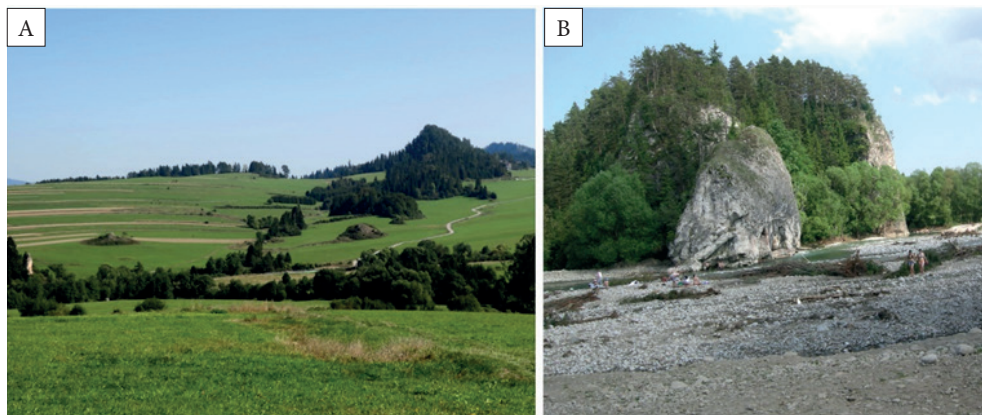
Melanże pienińskiego pasa skałkowego: wprowadzenie

Jan Golonka* , Monika Łój* , Anna Waśkowska* ,
Grzegorz Bania* , Kamil Cichostępski* 

ORCID IDs: 0000-0001-9671-5809 (J. Golonka), 0000-0002-3687-5453 (M. Łój),
0000-0003-4090-8534 (A. Waśkowska), 0000-0002-9661-8184 (G. Bania),
0000-0001-7982-4763 (K. Cichostępski)

Pieniński pas skałkowy (PPS) cechuje skomplikowana struktura, którą charakteryzuje występowanie wymieszanych ze sobą różnowiekowych elementów litologicznych pochodzących z różnych facji. Określona jest ona jako melanż. Rezultatem badań geologicznych, jakie prowadzone były na obszarze PPS od XVIII wieku przez licznych geologów, jest rozpoznanie tego melanżu. W nim znajdują się elementy, które posłużyły do ustalenia struktury, inwentarza litologicznego, rozwoju facjalnego i ewolucji geotektonicznej PPS. Dzięki zaangażowaniu kilku pokoleń geologów została odtworzona historia geologiczna centralnego PPS oraz zrekonstruowany został cykl wydarzeń geologicznych, które ukształtowały jego obecną strukturę. W wyniku podejmowanych aktualnie inicjatyw badawczych zdobywane są wciąż nowe dane, które pozwalają na dogłębniejsze poznanie PPS oraz uszczegółowienie istniejących ustaleń. Temu też służyły detaliczne badania geologiczne i geofizyczne prowadzone w zachodniej części Pienin Spiskich, w których melanże pochodzenia sedymentacyjnego, tektonicznego oraz będące efektem diapirowego wyciskania odzwierciedlają się w urozmaiconej rzeźbie terenu ze specyficznym układem skałek (rys. 1.1). Skałki te są izolowanymi blokami określanymi jako olistolity, które zbudowane są z różnych sekwencji litostratigraficznych PPS. Są to twarde wapienne i wapienno-krzemionkowe, które zostały wypreparowane podczas lądowych procesów morfotwórczych z bardziej podatnych na niszczenie margli, mułowców i piaskowców.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków



Rys. 1.1. Skalki wapienne pochodzenia olistolitowego w strukturze pienińskiego pasa skalnego: A) ostańce wapienne w Krempachach; B) skałka Kramnica w przelomie Białki

W celu detalicznej obserwacji struktury pienińskiego melanżu podjęte zostały prace terenowe, w tym kartowanie geologiczne, jak również badania stratygraficzne i strukturalno-tektoniczne. Wyniki tych prac zostały zintegrowane z danymi pochodzącymi z badań grawimetrycznych, sejsmicznych i geoelektrycznych [Bania i Mościcki, 2024; Bania i in., 2024; Cichostępski i Dec, 2024; Cichostępski i in., 2024; Golonka i in., 2018b, 2019; Łój i in., 2024; Marzec i in., 2020]. Wykonanie kompleksowych badań geofizycznych umożliwiło uzyskanie obrazu wewnętrznej struktury Pienin Spiskich. Otrzymane wzajemnie komplementarne wyniki zostały przedstawione w poszczególnych rozdziałach tego opracowania.

Rozdział drugi [Waśkowska i Golonka, 2024] stanowi wprowadzenie, w którym przedstawiono przegląd melanży na tle rozwoju geodynamicznego PPS następującego w efekcie długotrwałych procesów fałdowania, przemieszczania i wypiętrzania w interwale kreda-miocen [Golonka i in., 2015]. Elementy melanżu – w podziale na melanże sedymentacyjne i tektoniczne – zostały przyporządkowane do zdarzeń je generujących, które odbywały się w synorogenicznym stadium rozwoju PPS. W odniesieniu do melanży sedymentacyjnych, które aktualnie wchodzi w skład dwóch odrębnych pasów olistostromowych, wskazano czas ich formowania oraz obszary depozycyjne. Południowy pas został powiązany z subdukcją południowej części Tetydy alpejskiej, młodszy – z przesunięciem klina akrecyjnego w kierunku północnym. Geneza pozostałych skałek występujących wśród utworów klastycznych, a niezwiązanych z pasami olistolitowymi, została odniesiona do procesów deformacyjnych. Na te generacje melanży nakładają się melanże tektoniczne, które dodatkowo skomplikowały strukturę PPS. Ich powstanie było konsekwencją ruchów prowadzących do uformowania się jednostek płaszczowinowych jako efektu kolizji przyzma-grzbiet czorszyński oraz

struktury kwiatowej, która wykształciła się podczas przesuwczego ruchu płyt litosferycznych [Birkenmajer, 1983, 1986; Golonka i in., 2022].

Rozdział trzeci [Golonka i in., 2024] zawiera podstawowe dane geologiczne dotyczące obszaru pomiędzy Krempachami i Starem Bystrem, zaprezentowane w odniesieniu do ogólnej budowy geologicznej PPS w Polsce, w szczególności do stratygrafii, rozwoju facjalnego w interwałach istnienia jednostek basenowych, jak również współczesnej struktury tektonicznej. Przedstawiony został inwentarz stratygraficzny obszaru analiz na tle ogólnej litostratygrafii centralnej części PPS, w którym występują utwory od środkowej jury po neogen [np. Birkenmajer, 1977; Golonka i in., 2018a; Wierzbowski i in., 2006]. Poszczególne komponenty sekwencji litostratygraficznej znane są z odsłoneń powierzchniowych oraz zostały rozpoznane w otworze Maruszyna IG-1, jedynym głębokim wierceni (4843 m) na terenie PPS w Polsce [Birkenmajer i Gedl, 2012; Chowaniec i Sokołowski, 1985, 1986]. Są to pierwotne elementy basenowe deponowane w środowisku Tetydy alpejskiej oraz bloki, głównie pochodzenia olistolitowego, przemieszczone przez grawitacyjne ruchy masowe. Poszczególne jednostki powiązane z rozwojem facjalnym, w którym najpierw zaznacza się depozycja utworów klastyczno-węglanowych, a po wykształceniu się grzbietu czorsztyńskiego i modyfikacji morfologii zbiornika – depozycja różnorodnych utworów węglanowych i węglanowo-krzemionkowych. Późnokredowo-neogeńskie etapy rozwoju facjalnego związane są z sedymentacją turbidytową sukcesywnie zastępującą sedymentację wapienno-krzemionkową. Przedstawiona została budowa tektoniczna z wyróżnieniem w strukturach powierzchniowych PPS trzech jednostek płaszczowinowych: zlatniańskiej, hulińskiej i pienińskiej oraz w budowie wgłębnej jednostki Maruszyny o afiliacji magurskiej. Jednostka ta została zidentyfikowanej w otworze Maruszyna IG-1 i w badaniach geofizycznych [Golonka i in., 2019].

Rozdział czwarty [Łój i in., 2024] poświęcony jest interpretacji strefy melanżu PPS na podstawie badań grawimetrycznych, która obejmuje obszar położony w Karpatach, na południe od Krakowa, pomiędzy Rabką-Zdrojem a Pogórzem Przedtatrzańskim w rejonie miejscowości Krempachy – Dursztyn. Obszar ten obejmuje strefę przygraniczną między Karpatami centralnymi i zewnętrznymi, w której obrębie występują melanże [Porzucek i in., 2023].

Analizę danych grawimetrycznych przeprowadzono w dwóch głównych etapach. Na pierwszym etapie wykorzystano dane grawimetryczne z bazy danych Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego dotyczące obszaru około 1000 km² pomiędzy Zakopanem na południu a Rabką-Zdrojem na północy oraz Krościenkiem nad Dunajcem na wschodzie a Ludźmierzem na zachodzie, czyli kontakt Karpat zewnętrznych i wewnętrznych [Porzucek i in., 2023]. Etap drugi to badania grawimetryczne przeprowadzone w latach 2021–2024 w ramach projektu NCN nr 2019/35/B/ST10/00241 w okolicy miejscowości Krempachy – Dursztyn, w strefie występowania melanżu PPS. W ramach tego etapu prac przeprowadzono obserwacje grawimetryczne wzdłuż czterech profili o rozciągłości SSW–NNE oraz badania powierzchniowe w siarce punktów obejmującej obszar około 30 000 m².

Interpretacja danych grawimetrycznych prowadzona jest na podstawie rozkładów anomalii Bouguera. Do jej obliczenia stosuje się tzw. redukcję Bouguera złożoną z trzech poprawek, dla części których konieczne jest określenie gęstości średniej. Ze względu na to, że badania prowadzone były w strefie kontaktu PPS-u (o zróżnicowanym składzie litologicznym) i fliszu podhalańskiego oraz magurskiego, określenie gęstości na podstawie archiwalnych danych było utrudnione. Zdecydowano zatem, aby określić wartość tej gęstości z zastosowaniem dwóch metod grawimetrycznych: metody Nettletona [1940] i metody Parasnisa [1952].

Interpretacja grawimetryczna polega na jak najlepszym wyodrębnieniu z anomalii Bouguera anomalii o charakterze lokalnym, jak również anomalii o charakterze liniowym, w postaci granic gęstościowych, krawędzi struktur czy innego rodzaju lineamentów. W pierwszym przypadku zastosowano filtracje częstotliwościowe, dzięki którym z rozkładu anomalii Bouguera wyodrębniono anomalie rezydualne jako najlepsze przybliżenie anomalii lokalnych, natomiast liniowy charakter anomalii podkreślono, wykorzystując filtracje wzmacniające sygnał oparte na pionowej (VDR) oraz poziomej (THDR) pochodnej siły ciężkości [Hinze, 1990].

Regionalna analiza danych grawimetrycznych (etap pierwszy) przyniosła informację o tym, jak bardzo skomplikowany jest obszar badań zarówno pod względem tektonicznym, jak i gęstościowym. Zastosowanie odpowiednich narzędzi interpretacji umożliwiło wyodrębnienie informacji o znacznej części granic gęstościowych, szczególnie związanych z PPS.

Analiza i interpretacja danych uzyskanych za pomocą grawimetrycznych obserwacji terenowych w strefie jednostki hulińskiej wykazała znaczne zróżnicowanie ośrodka skalnego w tym rejonie pod względem gęstościowym. Natomiast szczegółowe powierzchniowe badania grawimetryczne w strefie melanżu PPS pokazały, że rozkład anomalii Bouguera i rezydualnych w tym rejonie przemawia za istnieniem olistolitów.

Rozdział piąty [Bania i Mościcki, 2024] to opis badań fragmentu pienińskiego pasa skałkowego znajdującego się w Pieninach Spiskich, w których wykorzystano metody sondowania elektrooporowego (VES) i tomografii elektrooporowej (ERT). Zastosowane metody elektrooporowe okazały się skuteczne w określeniu specyfiki strukturalnej analizowanej części PPS, zbadaniu jej strefowości oraz udokumentowaniu obecności olistolitów wapiennych i oszacowaniu ich wielkości. Wyniki interpretacji uzyskane metodą ERT2D pozwoliły na stworzenie modelu budowy geoelektrycznej analizowanego fragmentu PPS. Model ten powinien być traktowany jako jedna z możliwych hipotez, przy czym należy pamiętać o niejednoznaczności interpretacji ilościowej metod geoelektrycznych.

Rozdział szósty [Cichostępski i Dec, 2024] przedstawia interpretację badań sejsmicznych przeprowadzonych w wybranym fragmencie PPS. Aby wspomóc interpretację geologiczną melanżu PPS w regionie Pienin Spiskich, wzdłuż sześciu profili w strefie pasa wychodni wapieni przeprowadzono pomiary za pomocą sejsmicznej tomografii refrakcyjnej. Pomiary wykazały znaczne poziome i pionowe zmiany

prędkości fal sejsmicznych, ujawniając złożoną strukturę geologiczną tego obszaru. W strukturze PPS wyróżniono jednostki złatniańską, braniską i hulińską. Stwierdzono, że północna część jednostki hulińskiej jest zdominowana przez melanż osadowy zawierający izolowane bloki wapienne interpretowane jako olistolity, które na powierzchni terenu tworzą skałki. Otoczone są osadami fliszowymi reprezentującymi chaotyczny kompleks osadowy.

Prace badawcze uzyskały wsparcie z grantu NCN 2019/35/B/ST10/00241.

Bibliografia

- Bania G., Mościcki W.J., 2024. *Badania wybranego fragmentu Pienińskiego Pasa Skałkowego na Spiszu przy pomocy geofizycznych metod elektrooporowych*, [w:] J. Golonka, M. Łój, A. Waškowska (red.), *Geofizyczne odwzorowanie melanży w płytkich strefach pasm orogenicznych – przykład z pienińskiego pasa skałkowego*, Wydawnictwa AGH, Kraków, 95–127.
- Bania G., Mościcki W.J., Golonka J., 2024. ERT field survey supported with numerical and analogue modeling applied to study a fragment of the Pieniny Klippen Belt (Spisz Pieniny Mountains, southern Poland). *Geological Quarterly*, 68, 22. <https://doi.org/10.7306/gq.1750>.
- Birkenmajer K., 1977. Jurassic and Cretaceous lithostratigraphic units of the Pieniny Klippen Belt, Carpathians, Poland. *Studia Geologica Polonica*, 45, 1–158.
- Birkenmajer K., 1983. Uskoki przesuwce w północnym obrzeżeniu pienińskiego pasa skałkowego w Polsce. *Studia Geologica Polonica*, 77, 89–112.
- Birkenmajer K., 1986. Stages of structural evolution of the Pieniny Klippen Belt, Carpathians. *Studia Geologica Polonica*, 88, 7–32.
- Birkenmajer K., Gedl P., 2012. Jurassic and Cretaceous strata in the Maruszyna IG-1 Deep Borehole (Pieniny Klippen Belt, Carpathians, Poland): Lithostratigraphy, dinoflagellate cyst biostratigraphy, tectonics. *Studia Geologica Polonica*, 135, 7–54.
- Chowaniec J., Sokołowski J., 1985. *Borehole Maruszyna IG-1*, [w:] K. Birkenmajer (ed.), *Carpatho-Balkan Geological Association XIII Congress: Cracow, Poland, 1985. [2], Main Geotraverse of the Polish Carpathians (Cracow – Zakopane): Guide to Excursion 2*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 60–62.
- Chowaniec J., Sokołowski J., 1986. *Głęboki otwór wiertniczy Maruszyna IG-1*, [w:] K. Birkenmajer, D. Poprawa (red.), *Pieniński pas skałkowy: Przewodnik LVII Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego, 18–20 września 1986 r.*, Instytut Geologiczny, Kraków, 69–71.
- Cichostępski K., Dec J., 2024. *Rozpoznanie płytkiej struktury pienińskiego pasa skałkowego z wykorzystaniem sejsmicznej tomografii refrakcyjnej*, [w:] J. Golonka, M. Łój, A. Waškowska (red.), *Geofizyczne odwzorowanie melanży w płytkich strefach pasm orogenicznych – przykład z pienińskiego pasa skałkowego*, Wydawnictwa AGH, Kraków, 129–150.
- Cichostępski K., Dec J., Golonka J., Waškowska A., 2024. Shallow seismic refraction tomography images from the Pieniny Klippen Belt (Southern Poland). *Minerals*, 14(2), 155. <https://doi.org/10.3390/min14020155>.
- Golonka J., Krobicki M., Waškowska A., Cieszkowski M., Ślącza A., 2015. Olistostromes of the Pieniny Klippen Belt, Northern Carpathians. *Geological Magazine*, 152(2), 269–286. <https://doi.org/10.1017/S0016756814000211>.

- Golonka J., Krobicki M., Waškowska A., 2018a. The Pieniny Klippen Belt in Poland. *Geology, Geophysics & Environment*, 44(1), 111–125. <https://doi.org/10.7494/geol.2018.44.1.111>.
- Golonka J., Pietsch K., Marzec P., 2018b. The North European Platform suture zone in Poland. *Geology, Geophysics & Environment*, 44(1), 5–16. <https://doi.org/10.7494/geol.2018.44.1.5>.
- Golonka J., Pietsch K., Marzec P., Kasperska M., Dec J., Cichostępski K., Lasocki S., 2019. Deep structure of the Pieniny Klippen Belt in Poland. *Swiss Journal of Geosciences*, 112(2–3), 475–506. <https://doi.org/10.1007/s00015-019-00345-2>.
- Golonka J., Waškowska A., Cichostępski K., Dec J., Pietsch K., Łój M., Bania G., Mościcki W.J., Porzucek S., 2022. Mélange, flysch and cliffs in the Pieniny Klippen Belt (Poland): An overview. *Minerals*, 12(9), 1149. <https://doi.org/10.3390/min12091149>.
- Golonka J., Chowaniec J., Waškowska A., 2024. *Zarys budowy geologicznej zachodniej części pienińskiego pasa skałkowego w Polsce*, [w:] J. Golonka, M. Łój, A. Waškowska (red.), *Geofizyczne odwzorowanie melanży w płytkich strefach pasm orogenicznych – przykład z pienińskiego pasa skałkowego*, Wydawnictwa AGH, Kraków, 35–57.
- Hinze W.J., 1990. *The role of gravity and magnetic methods in engineering and environmental studies*, [w:] S.H. Ward (ed.), *Geotechnical and Environmental Geophysics. Vol. 1: Review and Tutorial*, Investigations in Geophysics, 5, Society of Exploration Geophysicists, Houston, 75–126. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802785.ch4>.
- Łój M., Porzucek S., Matwij W., 2024. *Grawimetryczne odwzorowanie melanży w płytkich strefach wybranego fragmentu pienińskiego pasa skałkowego*, [w:] J. Golonka, M. Łój, A. Waškowska (red.), *Geofizyczne odwzorowanie melanży w płytkich strefach pasm orogenicznych – przykład z pienińskiego pasa skałkowego*, Wydawnictwa AGH, Kraków, 59–93.
- Marzec P., Golonka J., Pietsch K., Kasperska M., Dec J., Cichostępski K., Lasocki S., 2020. Seismic imaging of mélanges – Pieniny Klippen Belt case study. *Journal of the Geological Society*, 177(3), 629–646. <https://doi.org/10.1144/jgs2020-111>.
- Nettleton L.L., 1940. *Geophysical Prospecting for Oil*. Mc Graw-Hill Book Co., New York.
- Parasnis D.A., 1952. A study of Rock Densities in the English Midlands. *Geophysical Supplements to the Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 6(5), 252–271. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1952.tb03013.x>.
- Porzucek S., Loj M., Golonka J., 2023. Lineaments in the gravity image of the border zone between the Central and Outer Carpathians. *Minerals*, 13(8), 995. <https://doi.org/10.3390/min13080995>.
- Waškowska A., Golonka J., 2024. *Melanże na tle rozwoju geodynamicznego pienińskiego pasa skałkowego*, [w:] J. Golonka, M. Łój, A. Waškowska (red.), *Geofizyczne odwzorowanie melanży w płytkich strefach pasm orogenicznych – przykład z pienińskiego pasa skałkowego*, Wydawnictwa AGH, Kraków, 13–34.
- Wierzbowski A., Aubrecht R., Golonka J., Gutowski J., Krobicki M., Matyja B.A., Pieńkowski G., Uchman A. (eds.), 2006. *Jurassic of Poland and adjacent Slovakian Carpathians: Field trip guidebook of 7th International Congress on the Jurassic System: Poland, Kraków, September 6–18 2006*, Polish Geological Institute, Warszawa.