

DWUWYMIAROWE MODELOWANIA GRAWIMETRYCZNE W POLSKICH KARPATACH ZACHODNICH

Two dimensional gravity modelling in Polish Western Carpathians

Grzegorz BOJDYS, Teresa GRABOWSKA & Zdzisława MEDOŃ

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

e mail: bojdzys@geol.agh.edu.pl, tgrabow@geol.agh.edu.pl, medon@geol.agh.edu.pl

Treść: Zastosowano nową metodykę interpretacji opartą na wyznaczeniu struktury ekwiwalentnej, której oddziaływanie grawitacyjne symuluje składową regionalną obserwowanego pola anomalii. Wprowadzenie struktury ekwiwalentnej ułatwiło interpretację ilościową anomalii grawimetrycznych prowadzoną metodą modelowania 2D. Gęstościowe modele osadowego kompleksu skorupy i prekambryjskiego podłoża przedstawiono wzdłuż dwóch profili przecinających polskie Karpaty Zewnętrzne. W konstrukcji modeli wykorzystano dane geologiczne (wiercenia, mapy geologiczne, przekroje) i wyniki głębokich badań sejsmicznych oraz badań magnetotellurycznych. Obliczenie efektów grawitacyjnych pozwoliło na określenie udziału pokrywy osadowej, podłoża i kompleksu krystalicznego skorupy w tworzeniu pola anomalii. Odpowiadające modelom efekty grawitacyjne zestawione zostały z obserwowanymi anomaliami siły ciężkości. Wyniki grawimetrycznego modelowania 2D potwierdziły związek grawimetrycznego niżu karpackiego z głęboką strukturą skorupy i wskazały na podrzędną rolę osadów w kreowaniu pola anomalii siły ciężkości w polskich Karpatach Zachodnich.

Słowa kluczowe: Karpaty Zewnętrzne, anomalie grawimetryczne, interpretacja ilościowa, modelowanie grawimetryczne 2D, struktura ekwiwalentna

Abstract: New interpretation methodology has been applied based on determination of the equivalent structure, the gravity impact of which simulates the regional component of the anomaly field observed. Use of the equivalent structure has facilitated quantitative interpretation of gravity anomalies with the 2D modelling method. Density models of the sedimentary crust complex and the Precambrian substratum have been presented along two profiles intersecting the Polish Outer Carpathians. Geological data have been used for model construction (drillings, geological maps, sections) and results of deep seismic surveys and magnetotelluric surveys. Calculation of gravity effects has allowed to determine the contribution of sedimentary cover, substratum and crystalline complex of the crust in formation of the anomaly field. Gravity effects corresponding to the models have been presented with observed gravity force anomalies. Results of 2D gravity modelling have confirmed relationship of the gravity Carpathian low and the deep structure of the crust and indicated subordinate role of sediments in creating of the gravity anomaly field in the Polish Western Carpathians.

Key words: Outer Carpathians, gravity anomalies, quantitative interpretation, 2D gravity modelling, equivalent structure

WSTĘP

Praca stanowi kontynuację badań obejmujących geofizyczno-geologiczną interpretację anomalii grawimetrycznych środkowej części polskich Karpat Zachodnich. Wyniki przeprowadzonej wcześniej jakościowej interpretacji anomalii grawimetrycznych na tym obszarze (Grabowska *et al.* 2007) poddane zostały weryfikacji poprzez dokonanie ilościowej oceny efektów grawitacyjnych związanych z budową płaszczowinowych nasunięć i ich podłoża.

Interpretacja metodą 2D modelowania grawimetrycznego wykonana została na dwóch odpowiednio zlokalizowanych profilach (profil A–A i profil B–B), przecinających granicę nasunięcia karpackiego (Fig. 1). Profile te znajdują się w pobliżu profili magnetotellurycznych – MT (nr 6) i MT (nr 4) (Stefaniuk *et al.* 2007), profilu głębokich badań sejsmicznych (CEL 01) (Środa *et al.* 2006) oraz linii przekroju geologicznego przez Karpaty Zewnętrzne i ich przedpole (Golonka 2007).

Odpowiednia lokalizacja interpretacyjnych profili grawimetrycznych A–A i B–B stworzyła możliwość bezpośredniego porównywania wyników badań przeprowadzonych różnymi metodami geofizycznymi.

Środkowe i południowe odcinki obu profili interpretacyjnych przecinają płaszczowinę magurską, a w szczególności śródgórskie zapadlisko orawskie. Północne fragmenty profili tną płaszczowiny magurską i śląską i wynurzające się spod nich fragmenty płaszczowin podśląskiej i skolskiej. Profile zlokalizowane są po obu stronach dyslokacji Skawy, biegnącej wzdłuż linii Jordanów – Kalwaria Zebrzydowska (Fig. 2) (Poprawa & Nemčok 1989).

Złożony proces modelowania grawimetrycznego poprzedzony został szeroką analizą wyników dotychczasowych badań geofizycznych i geologicznych, w tym również rozpoznania gęstości.

Modelowanie grawimetryczne 2D prowadzono przy użyciu interaktywnego programu *interg2d* (Bojdys 2006), który umożliwia m.in. rozwiązywanie odwrotnego zadania grawimetrii.

KRÓTKI ZARYS BUDOWY GEOLOGICZNEJ

Obszar, na którym zlokalizowane są grawimetryczne profile interpretacyjne, to fragment zachodniej części Karpat Zewnętrznych, gdzie przykryte utworami mezopaleozoicznymi lub tylko paleozoicznymi (na zachód od Skawy) prekambryjskie podłoże zapada w kierunku południowym. Stanowi ono przedłużenie dwóch bloków skorupy różnego pochodzenia, a mianowicie bloku górnośląskiego (fragment *bruno-vistulicum*) i bloku małopolskiego, należącego do paleozoicznej platformy.

Utwory mezopaleozoiczne wraz z leżącym na nimi mioceniem autochtonicznym są podłożem zaburzonych tektonicznie utworów fliszu, z których zbudowane są płaszczowiny (magurska, przedmagurska, śląska, podśląska i skolska).

Grawimetryczne profile interpretacyjne znajdują się po obu stronach strefy uskoków Skawy, biegnących w przybliżeniu wzdłuż linii Jordanów – Kalwaria Zebrzydowska (Fig. 2, 3). Wzdłuż tej linii przedtrzeciorzędowe podłoże Karpat Zachodnich dzieli się na dwa rejonu (Poprawa & Nemčok 1989, Cieszkowski *et al.* 2006, Golonka *et al.* 2007).

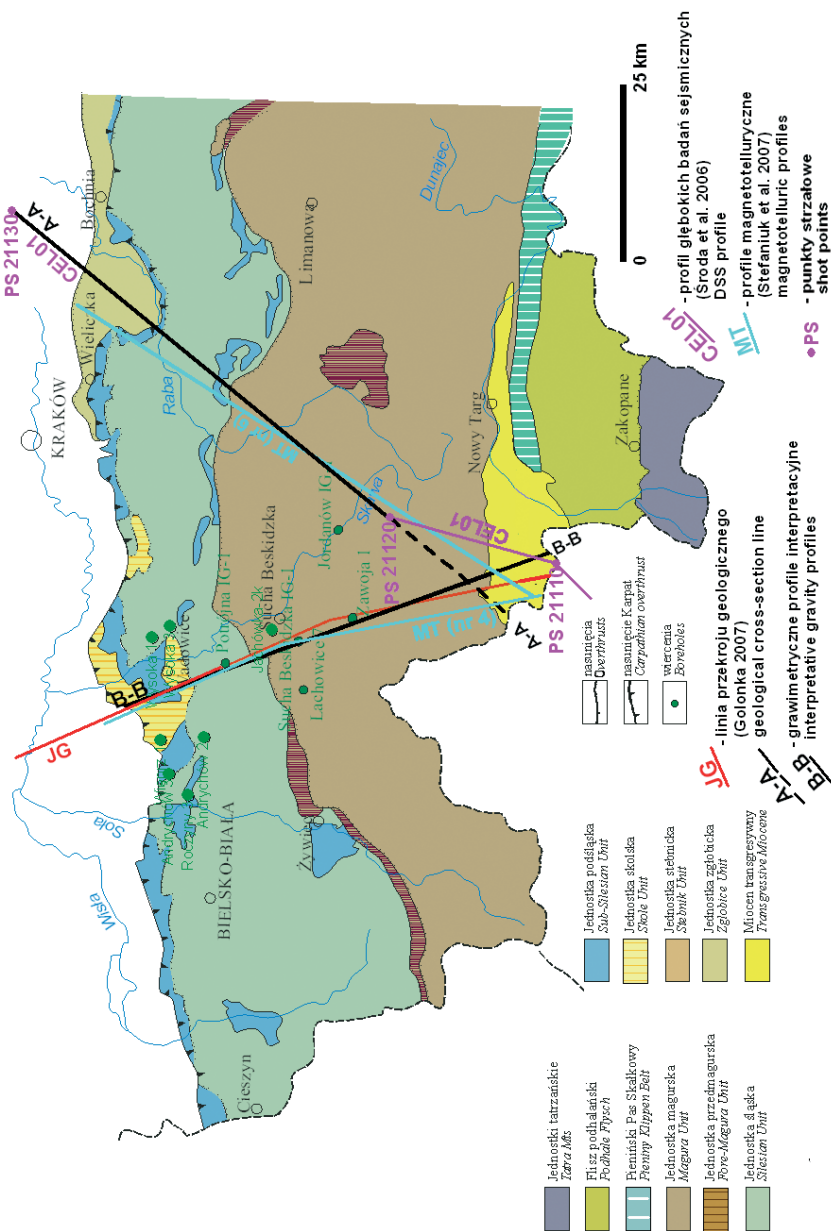


Fig. 1. Lokalizacja grawimetrycznych profili interpretacyjnych na tle mapy tektonicznej polskich Karpát Zewnetrznych na zachód od Dunajca (Cieszkowski et al. 2006, Golonka 2007)

Fig. 1. Location of the gravity interpretative profiles on the background of tectonic map of the Polish Outer Carpathians (Cieszkowski et al. 2006, Golonka 2007)

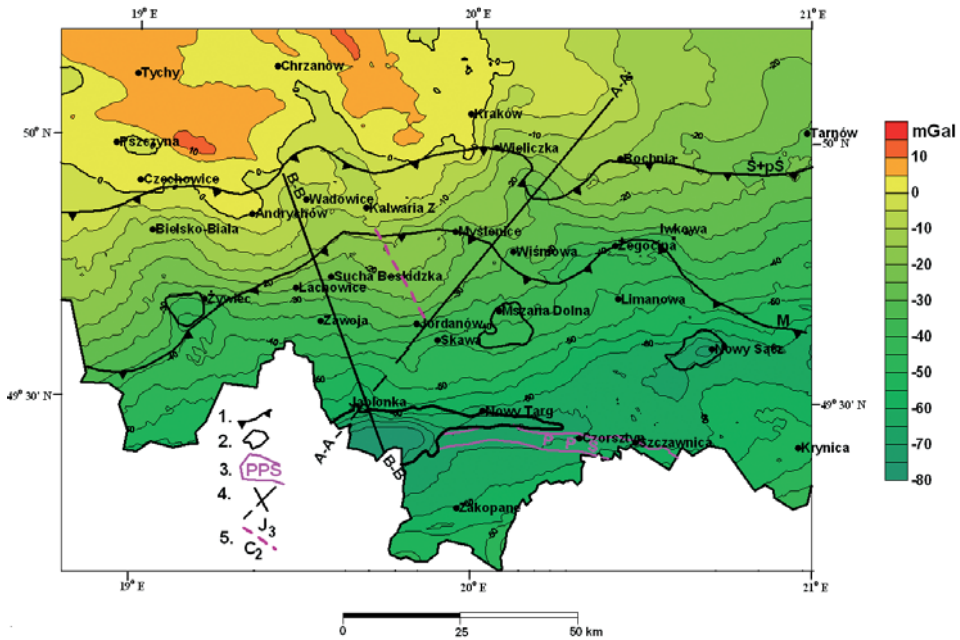


Fig. 2. Mapa anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera (Δg_B). Anomalie zestawione na podstawie gridu Δg_B w siatce $s = 0.5$ km (źródło: PIG). Gęstość warstwy zredukowanej $2.67 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Standard gravimetryczny: IGSN 71. Pole normalne wg GRS 80: 1 – zasięg płaszczowin: M – magurskiej, $\dot{S} + p\dot{S}$ – śląskiej i podśląskiej (wg Poprawy & Nemčoka 1989), 2 – kontury okien tektonicznych i zapadlisk (wg Poprawa & Nemčok 1989), 3 – pieniński pas skałkowy (PPS) (wg Poprawy & Nemčoka 1989), 4 – gravimetryczne profile interpretacyjne, 5 – strefa kontaktu skał paleozoicznych z mezozoicznymi (wg Poprawy & Nemčoka 1989)

Fig. 2. Bouguer gravity anomaly map Δg_B Anomalies presented on the basis of grid Δg_B in mesh $s = 0.5$ km (source: PIG) The reduced layer density $2.67 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Gravimetric standard: IGSN 71. Reference gravity field acc. to GRS 80: 1 – extent of nappes acc. to Poprawa & Nemčok (1989), M – the Magura Nappe, $\dot{S} + p\dot{S}$ – the Silesian and Sub-Silesian Nappes, 2 – contours of tectonic windows and depressions acc. to Poprawa & Nemčok (1989), 3 – Pieniny Klippen Belt acc. to Poprawa & Nemčok (1989), 4 – Gravity interpretative profiles, 5 – contact zone of the Paleozoic and Mesozoic rocks acc. to Poprawa & Nemčok (1989)

W rejonie wschodnim (południowy fragment przedłużenia bloku małopolskiego) podłoże podścielonego miocenu fliszu stanowią najczęściej utwory jury górnej.

W rejonie zachodnim (przedłużenie bloku górnos Śląskiego – bruno-vistulicum) brak jest utworów mezozoicznych, a pod miocenem znajdują się najczęściej osady karbonu górnego. Podłoże prekambryjskie zapada tutaj, podobnie jak w rejonie wschodnim, w kierunku południowym, jednakże głębokości jego występowania są mniejsze i silniej zróżnicowane (Poprawa & Nemčok 1989).

Profil gravimetryczny A–A pokrywa się na przeważającym odcinku z profilem sejsmicznym CEL 01, będącym jednym z profili zrealizowanych w ramach międzynarodowego projektu CELEBRATION 2000. W bliskim sąsiedztwie tego profilu znajduje się profil magnetotelluryczny MT (nr 6) (Chyżne – Niepołomice).

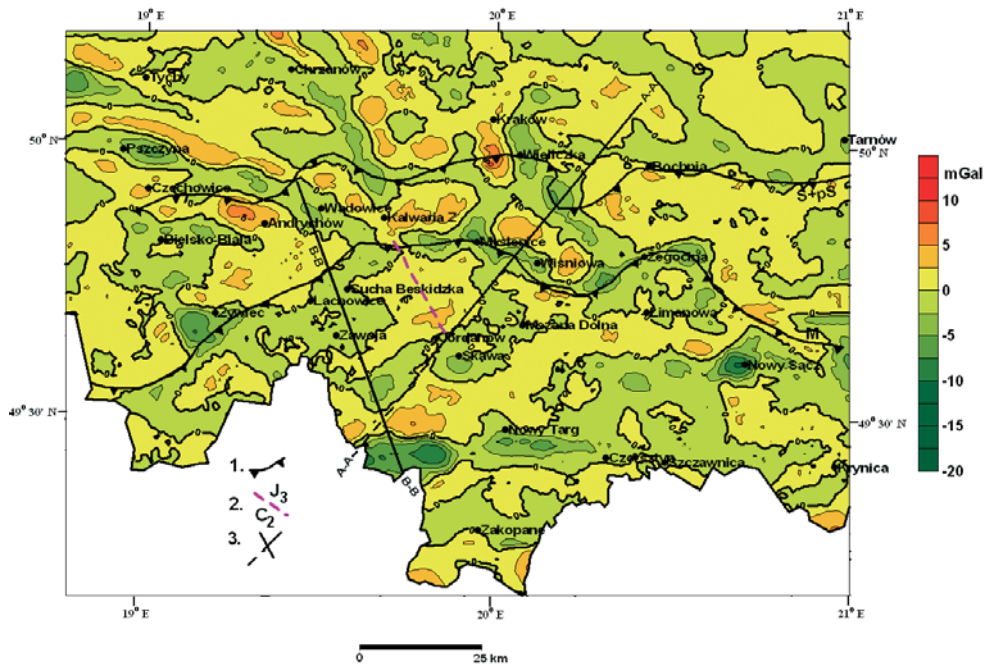


Fig. 3. Mapa anomalii resztkowych siły ciężkości obliczona wg wzoru Griffina, $r = 5.28$ km (na podstawie gridu Δg_B w siatce $s = 0.5$ km (źródło: PIG)): 1 – zasięg płaszczowin: M – magurskiej, $\hat{S} + p\hat{S}$ – śląskiej i podśląskiej (wg Poprawa & Nemčoka 1989), 2 – strefa kontaktu skał paleozoicznych z mezozoicznymi (wg Poprawa & Nemčoka 1989), 3 – grawimetryczne profile interpretacyjne; izolinie co 2.5 mGal

Fig. 3. Map of the gravity residual anomalies calculated acc. to the Griffin's formula, $r = 5.28$ km on the basis of Δg_B grid in mesh $s = 0.5$ km (source: PIG): 1 – extent of nappes acc. to Poprawa & Nemčok (1989), M – the Magura Nappe, $\hat{S} + p\hat{S}$ – the Silesian and Sub-Silesian Nappes, 2 – contact zone of the Paleozoic and Mesozoic rocks acc. to Poprawa & Nemčok (1989), 3 – gravity interpretative profiles; contour interval 2.5 mGal

Profil B–B, pokrywający się w części środkowej i północnej z profilem magnetotelurycznym MT (nr 4) (Chyżne – Spytkowice), w przybliżeniu biegnie wzdłuż linii przekroju geologicznego przez Karpaty Zewnętrzne i ich przedpole, omawianego w pracy J. Golonki (Golonka 2007).

Anomalie grawimetryczne obszaru, w którym zlokalizowane zostały profile interpretacyjne, były obiektem geofizyczno-geologicznych badań (Bojdyś & Lemberger 1986a, b, Królikowski & Młynarski 2003, Grabowska *et al.* 2003–2005, Bielik *et al.* 2006), które wskazały na związek regionalnej depresji grawimetrycznej Karpat z głęboką strukturą litosfery.

Wykonana w latach 2006–2007 geofizyczno-geologiczna jakościowa interpretacja anomalii grawimetrycznych środkowej części polskich Karpat Zewnętrznych (Grabowska *et al.* 2007) ujawniła anomalie o charakterze lokalnym i ich powiązania z elementami budowy geologicznej nasunięć płaszczowinowych i ukształtowaniem podłoża mezopaleozoicznego, a także podłoża prekambryjskiego.

ANALIZA GĘSTOŚCI SKAŁ

Proces modelowania grawimetrycznego, będącego jedną z metod interpretacji ilościowej, poprzedzony został pracami nad rozpoznaniem gęstości skał. Dotychczas wykonane badania (Fajkiewicz 1963, Dąbrowski 1974, Winiarska 1983, Królikowski 2005) wskazują na duże zróżnicowanie gęstości skał fliszowych pozostające w związku z ich składem mineralnym, porowatością i nasyceniem wodą oraz węglowodorami.

W konstrukcji modelu na profilu A–A wykorzystano informacje dotyczące gęstości skał zawarte w pracy T. Adamczak i A. Pepela (Adamczak & Pepel 2003). Na podstawie danych geofizyki wiertniczej pochodzących z dwudziestu otworów, znajdujących się na wschód od strefy uskoków Skawy, wyżej wymienieni autorzy zestawili histogramy gęstości dla skał fliszu, miocenu autochtonicznego oraz skał budujących mezopaleozoiczne podłoże. Opracowane na podstawie histogramów dane o gęstościach zestawione zostały w tabeli 1, gdzie porównano je ze średnimi gęstościami skał fliszu i podłoża uzyskanymi z otworów znajdujących się w sąsiedztwie karpackiego odcinka profilu CEL 01 (Królikowski 2005).

Tabela (Table) 1

Zestawienie gęstości skał w rejonie profilu A–A
Setting up of the rock density (profile A–A)

Gęstości skał wg Adamczak & Pepela (2003) <i>Density of rocks acc. to Adamczak & Pepel (2003)</i>		Gęstości skał wg Królikowskiego (2005) (profil CEL 01) <i>Density of rocks acc. to Królikowski (2005) (profile CEL 01)</i>	
Przedział gęstości <i>Density range</i> [Mg·m ⁻³]		Przedział gęstości skał z maksymalną liczebnością próbek <i>Density ranged the rocks with the maximal numerical force of the samples</i> [Mg·m ⁻³]	Średnie wartości gęstości <i>Average density</i> [Mg·m ⁻³]
Czwartorzęd <i>Quaternary</i>	–	–	2.25–2.45
Flisz <i>Flysch</i>	2.1–2.7	2.4–2.5	2.50
Płaszczowina magurska <i>Magura nappe</i>	2.35–2.64	–	2.53
Płaszczowina śląska Płaszczowina podśląska <i>Silesian nappe, Sub-Silesian nappe</i>	2.37–2.48	–	2.43
Miocen autochtoniczny <i>Autochthonous Miocene</i>	2.3–2.6	> 2.55 < 2.6	2.57
Mezozoik <i>Mesozoic</i>	2.3–2.8	2.6–2.7	2.67
Karbon górny <i>Upper Carboniferous</i>	2.3–2.7	2.5–2.6	2.58
Karbon dolny, dewon <i>Lower Carboniferous + Devonian</i>	2.5–2.8	2.7–2.8	2.78

W przypadku modelu konstruowanego wzdłuż profilu B–B wykorzystano informacje o gęstościach skał zawarte w pracach J. Jarzyny (Jarzyna 2007) i M. Bały (Bała 2007). Otwory, w których dokonywano profilowań gęstości, a także obliczeń gęstości przy użyciu programu Estymacja (Bała & Cichy 2003), zlokalizowane są na profilu lub w jego sąsiedztwie (Fig. 1). W tabeli 2 zestawione zostały gęstości skał fliszu budujących poszczególne płaszczowiny, gęstości skał miocenu i paleozoicznego podłoża, a także prekambriu.

Tabela (Table) 2

Zestawienie gęstości skał w rejonie profilu B–B
Setting up of the rock density (profile B–B)

Nazwa wierceń <i>Boreholes</i>	Stratygrafia <i>Stratigraphy</i>	Miaższość <i>Thickness</i> [m]	Nazwa jednostki <i>Units</i>	Przedział gęstości <i>Density range</i> [Mg·m ⁻³]	Gęstość średnia <i>Average density</i> [Mg·m ⁻³]	Gęstość średnia ważona <i>Mean weighted density</i> [Mg·m ⁻³]
1	2	3	4	5	6	7
Zawoja 1	Tr + Cr	1200	J. magurska <i>Magura Unit</i>	2.52–2.58	2.55	2.57
	Tr + Cr	1477	J. śląska <i>Silesian Unit</i>	2.59–2.63	2.61	2.61
	Tr + Cr	2098	J. podśląska <i>Sub-Silesian Unit</i>	2.58–2.60	2.59	2.59
	Miocen autochtoniczny <i>Autochthonous Miocene</i>	958	–	2.60	–	–
	T	33	–	–	2.59	–
	C2 nieprzewiercony <i>not drill</i>	–	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	–	2.62	–
Jachówka 2k	Tr + Cr	2237	J. śląska <i>Silesian Unit</i>	2.43–2.50	2.47	2.48
	Miocen autochtoniczny <i>Autochthonous Miocene</i>	1070	–	2.56–2.61	2.59	2.60
	C2	238	–	–	2.51	–
	C1+D3+D2	619	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	2.69–2.76	2.72	2.73
	D1 + Cm nieprzewiercony <i>not drill</i>	–	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	–	2.53	–

Tabela (Table) 2 cd.

1	2	3	4	5	6	7
Lachowice 7	Tr	2161	J. magurska <i>Magura Unit</i>	–	2.44	–
	Tr	254	J. śląska <i>Silesian Unit</i>	–	2.47	–
	Miocen autochtoniczny <i>Autochthonous Miocene</i>	298	–	–	2.58	–
	D3 + D2	296	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	2.65–2.76	2.71	2.72
	D1 + C nie- przewiercony <i>not drill</i>	–	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	2.44–2.48	2.46	–
Andry- chów 2	Tr + Cr	1391	J. podśląska <i>Sub-Silesian Unit</i>	–	2.46	–
	Cr 1	77	J. podśląska <i>Sub-Silesian Unit</i>	–	2.70	–
	Miocen autochtoniczny <i>Autochthonous Miocene</i>	123	–	–	2.66	–
	C1 + D3. + D2	668	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	2.69–2.81	2.76	2.76
	D1. + Cm nie- przewiercony <i>not drill</i>	–	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	2.42–2.61	2.52	–
Andry- chów 3	Tr+Cr	949	J. podśląska <i>Sub-Silesian Unit</i>	2.33–2.44	2.38	2.39
	Miocen autochtoniczny <i>Autochthonous Miocene</i>	312	–	2.43–2.45	2.44	2.44
	C1	225	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	–	2.45	–

Tabela (Table) 2 cd.

1	2	3	4	5	6	7
Andrychów 3	C1 +D3+D2	701	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	2.62–2.76	2.67	2.67
	D1 + Cm	174.5	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	–	2.56	–
	Pr nie-przewiercony <i>not drill</i>	–	Podłoże <i>Basement</i>	–	2.62	–
Wysoka 1	Tr+Cr	180	J. śląska <i>Silesian Unit</i>	–	–	–
	Tr+Cr	245	J. podśląska <i>Sub-Silesian Unit</i>	–	2.40	–
	Miocen autochtoniczny <i>Autochthonous Miocene</i>	725	–	–	2.40	–
	D2+ D3	957	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	2.64–2.69	2.67	2.68
	D1 nie-przewiercony <i>not drill</i>	–	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	–	2.57	–
Wysoka 3	Tr + Cr	625	J. śląska <i>Silesian Unit</i>	2.42–2.67	2.50	2.53
	Tr	110	J. podśląska <i>Sub-Silesian Unit</i>	–	2.43	–
	Miocen autochtoniczny <i>Autochthonous Miocene</i>	833	–	–	2.40	–
	C2	167	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	–	2.36	–
	C1 +D2+D3	270	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	2.60–2.62	2.61	2.61

Tabela (Table) 2 cd.

1	2	3	4	5	6	7
Wysoka 3	D1	13	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	–	2.57	–
	Cm	629	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	–	–	–
	Pr nie-przewiercony <i>not drill</i>	–	Podłoże <i>Basement</i>	–	2.63	–
Wieprz 1	Q	5	–	–	2.45	–
	Tr+Cr	363	J. śląska + j. podśląska <i>Silesian Unit Sub-Silesian Unit</i>	2.37–2.44	2.41	2.42
	Miocen autochtoniczny <i>Autochthonous Miocene</i>	846.5	–	–	2.41	–
	C3 nie-przewiercony <i>not drill</i>	–	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	–	2.39	–
Roczyny 3	Miocen autochtoniczny <i>Autochthonous Miocene</i>	1029	–	–	2.42	–
	C1 +D2+D3	588	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	2.64–2.75	2.70	2.74
	D1 + Cm	210	Podłoże paleozoiczne <i>Paleozoic basement</i>	2.31–2.46	2.39	2.44
	Pr nie-przewiercony <i>not drill</i>	–	Podłoże <i>Basement</i>	–	2.62	–

Tr – trzeciorzęd, *Tertiary*, Cr – kreda, *Cretaceous*, C – karbon, *Carboniferous*, D – dewon, *Devonian*, Cm – kambr, *Cambrian*, Pr – prekambryj, *Precambrian*

Wśród skał paleozoicznych wyróżniony został charakteryzujący się obniżoną gęstością karbon górny. Utwory karbonu dolnego, dewonu górnego i dewonu środkowego z uwagi na ich zbliżone gęstości połączono w jeden kompleks odznaczający się podwyższoną gęstością. Ze skał dewonu dolnego i kambru natomiast utworzono kompleks o obniżonej gęstości.

Obok średnich gęstości skał i przedziałów zmian gęstości w tabeli 2 podano, tam gdzie możliwe było ich obliczenie, wartości średnich ważonych gęstości skał budujących wydzielone kompleksy.

W modelach gęstościowych granice między poszczególnymi kompleksami stratygraficznymi były traktowane jako granice gęstościowe modelu.

METODYKA KONSTRUKCJI GĘSTOŚCIOWYCH MODELI

Dwuwymiarowe modelowanie grawimetryczne prowadzono, posługując się interaktywnym programem interg2d autorstwa G. Bojdysa (Bojdys 2006). Program ten jest przeznaczony do rozwiązywania prostego i odwrotnego zadania grawimetrii metodą kolejnych iteracji. Efekt grawitacyjny może być wyznaczany na fizycznej powierzchni Ziemi lub na jej uśrednionym poziomie w badanym obszarze. W naszym przypadku obliczenia prowadzono na poziomie fizycznej powierzchni Ziemi, a ich wynik porównywany był z krzywą obserwowanych anomalii siły ciężkości.

Wszystkie elementy przekroju, a mianowicie: linie wyznaczające granice kompleksów gęstościowych, rozkłady gęstości w obrębie kompleksów, morfologia terenu, a także krzywa anomalii, były zgodnie z wymaganiami programu próbkowane w stałych odstępach $\Delta x = 0.1$ km.

Zgodność efektu grawitacyjnego z krzywą obserwowanych anomalii uzyskiwano w efekcie kolejnych iteracji, zmieniając w miarę potrzeby rozkłady gęstości w kompleksach lub/i geometrię ich granic.

W związku z tym, że budowa gęstościowego modelu ośrodka geologicznego jest procesem złożonym, prowadzono ją etapami.

Pierwszy etap obejmował prace związane z konstrukcją tzw. „startowego” modelu gęstościowego, opartego na dostępnych danych geologicznych (przekroje geologiczne, mapy geologiczne strukturalne, wyniki wierceń, dane gęstościowe) i geofizycznych.

Drugi etap to złożony proces modelowania, polegający na dokonywaniu za pomocą kolejnych iteracji takich zmian (gęstość, geometria granic rozdziału gęstości) w modelu startowym, aby obliczony, odpowiadający mu efekt grawitacyjny był zbliżony z obserwowaną anomalią siły ciężkości.

Należy w tym miejscu podkreślić, że uzyskany w procesie modelowania przekrój gęstościowy ośrodka geologicznego z uwagi na zjawisko wieloznaczności jest jednym z wielu możliwych. W przyszłości, w miarę pojawiania się nowych danych dotyczących np. gęstości i/lub geometrii ośrodka, jego model gęstościowy może być weryfikowany, a następnie modyfikowany.

STRUKTURA EKWIWALENTNA

Szczególnie trudnym zadaniem jest konstrukcja modelu gęstościowego w warunkach występowania silnego pola regionalnego, na tle którego pojawiają się anomalie o charakterze lokalnym, stanowiące w tym przypadku obiekt interpretacji.

Jak wspomniano wcześniej, anomalie grawimetryczne obszaru Karpat Zewnętrznych zdominowane są przez silną ujemną anomalię, której przebieg pokrywa się z łukiem Karpat. Podobną sytuację obserwuje się również w rejonie Karpat Zachodnich, gdzie obraz anomalii siły ciężkości naznaczony jest silnym regionalizmem (Fig. 2), na tle którego pojawiają się zakłócenia o charakterze lokalnym dobrze widoczne na mapach anomalii transformowanych (Grabowska *et al.* 2007), w tym również na prezentowanej mapie anomalii resztkowych (Fig. 3).

W przypadku anomalii grawimetrycznych, będących – jak wiadomo – superpozycją oddziaływań grawitacyjnych struktur gęstościowych litosfery, ich ilościowa interpretacja w obrębie ograniczonego obszaru w porównaniu z obszarem występowania pola regionalnego uniemożliwia konstrukcję poprawnego modelu gęstościowego, objaśniającego przyczyny anomalii.

W celu rozwiązania tego problemu wprowadzono pojęcie struktury ekwiwalentnej, przedstawiającej rozkład gęstości odnoszący się w tym przypadku do krystalicznego kompleksu skorupy. Struktura ekwiwalentna, uzyskiwana w procesie modelowania 2D, zastępuje rzeczywiste źródła pola regionalnego w ograniczonym obszarze, będącym obiektem badań.

W naszym przypadku, po obliczeniu efektów grawitacyjnych związanych z modelem gęstościowym pokrywy osadowej, struktura ekwiwalentna uzyskana została metodą kolejnych iteracji i umiejscowiona w obrębie krystalicznego kompleksu skorupy.

Stropem tej struktury jest spąg osadowego kompleksu skorupy, natomiast jej spąg znajduje się na głębokości 40 km, odpowiadającej maksymalnej głębokości występowania granicy Moho (Środa *et al.* 2006) w obszarze badań.

Warto w tym miejscu zauważyć, że struktura ekwiwalentna zawiera informacje o rozkładzie gęstości w obrębie całej litosfery.

Wprowadzenie pojęcia struktury ekwiwalentnej ułatwiło interpretację ilościową anomalii na profilach interpretacyjnych, wzdłuż których obserwuje się silny wpływ pola regionalnego na charakter krzywych anomalii siły ciężkości.

GRAWIMETRYCZNY PROFIL INTERPRETACYJNY A–A (INTERPRETACJA ILOŚCIOWA)

Profil A–A (Fig. 1) w swej przeważającej części pokrywa się z profilem CEL 01 głębokich badań sejsmicznych (projekt CELEBRATION 2000), w którego bezpośrednim sąsiedztwie zlokalizowany jest profil magnetotelluryczny MT (nr 6).

Usytuowanie grawimetrycznego profilu interpretacyjnego umożliwia więc wykorzystanie danych sejsmicznych w pracach nad konstrukcją modelu gęstościowego, jak również porównanie wyników modelowania grawimetrycznego z wynikami badań magnetotellurycznych.

Na podstawie analizy danych geologicznych, takich jak: opisy wierceń, gęstości, przekroje geologiczne i mapy strukturalne, a także przekroju prędkościowego skorupy wzdłuż profilu CEL 01 skonstruowano uproszczony model gęstościowy osadowego kompleksu skorupy (Fig. 4B).

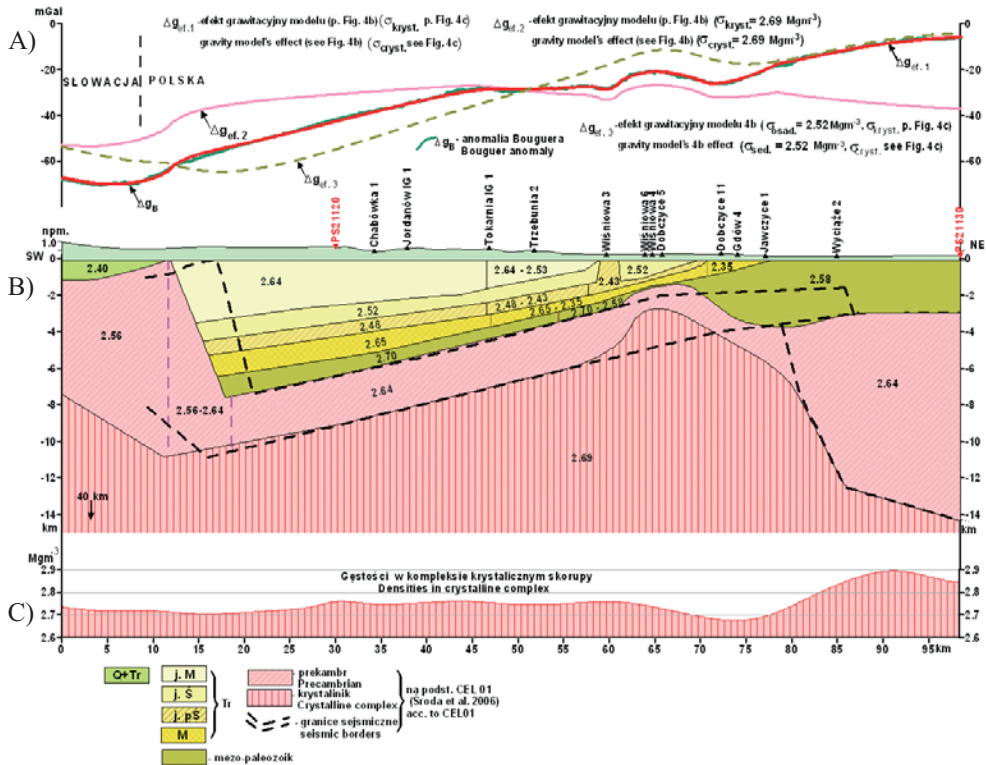


Fig. 4. Wyniki grawimetrycznego modelowania 2D na profilu A–A: A) zestawienie krzywych efektów grawitacyjnych $\Delta g_{ef}(1, 2, 3)$ z krzywą anomalii siły ciężkości Δg_B w red. Bouguera (Fig. 2): (1) – zmienna gęstość kompleksu osadowego (B) i zmiany gęstości (struktura ekwiwalentna) w kompleksie krystalicznym (C), (2) – zmienna gęstość kompleksu osadowego (B) i stała gęstość kompleksu krystalicznego $\sigma = 2.69 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, (3) – stała gęstość kompleksu osadowego $\sigma = 2.52 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (średnia ważona) i zmiany gęstości (struktura ekwiwalentna) w kompleksie krystalicznym (C); B) model gęstościowy skorupy (wynik modelowania 2D); C) struktura ekwiwalentna – zmiany gęstości w krystalicznym kompleksie skorupy ($2.68\text{--}2.89 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Objasnienia: j.M – jednostka magurska, j.Ś – jednostka śląska, j.pŚ – jednostka podśląska, M – miocen

Fig. 4. Results of 2D gravity modelling on the A–A profile: A) comparison of graphs of gravity effects $\Delta g_{ef}(1, 2, 3)$ with the graph of the Bouguer gravity anomaly Δg_B (see Fig. 2): (1) – variable density of the sedimentary complex (B) and variations of density (equivalent structure) in the crystalline complex (C), (2) – variable density of the sedimentary complex (B) and constant density of the crystalline complex $\sigma = 2.69 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, (3) – constant density of the sedimentary complex $\sigma = 2.52 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (weighted average) and variations of density (equivalent structure) in the crystalline complex (C); B) density model of the crust (result of 2D modelling); C) the equivalent structure – changes in density in the crystalline crust complex ($2.68\text{--}2.89 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Explanations: j.M – the Magura Unit, j.Ś – the Silesian Unit, j.pŚ – the Sub-Silesian Unit, M – Miocene

W modelu tym, z uwagi na brak informacji geologicznych, zwłaszcza w południowej części profilu, osadowy kompleks skorupy potraktowany został schematycznie. Natomiast powierzchnię stropową prekambru oraz strop krystalicznego kompleksu skorupy (środkowy fragment profilu) określono, kierując się wynikami badań sejsmicznych (Środa *et al.* 2006).

Zadowalające dopasowanie krzywej efektu grawitacyjnego $\Delta g_{ef.1}$ do krzywej Δg_B (Fig. 4A) uzyskano, wprowadzając metodą modelowania 2D zmienne gęstości skał w obrębie poszczególnych jednostek nasunięcia karpackiego i jego podłoża, utworów prekambru (Fig. 4B) i kompleksu krystalicznego skorupy w postaci struktury ekwiwalentnej (Fig. 4C).

Równocześnie w północnym fragmencie profilu dokonano korekt geometrii granic odpowiadających stropowi prekambru oraz stropowi podłoża krystalicznego (Fig. 4B).

Natomiast korekty poczynione w południowej części profilu wiążą się z ekstrapolacją danych sejsmicznych z profilu CEL 01 na profil interpretacyjny (Fig. 1).

Uzyskane w procesie modelowania zmiany gęstości w krystalicznym kompleksie skorupy, zawierające się w przedziale $2.68\text{--}2.89 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, przedstawiono w postaci wykresu na figurze 4C. Zmiany te mieszczą się w pojęciu tzw. struktury ekwiwalentnej, dzięki której ułatwione jest dopasowanie efektu grawitacyjnego do obserwowanej anomalii.

Korekty geometrii granic gęstościowych w modelu „startowym” w południowej części profilu są związane ze zmianą lokalizacji profilu A–A względem profilu sejsmicznego CEL 01 (Fig. 1).

Natomiast w północnej części profilu (okolica wierceń Wiśniowa 3, 4, 6 i Dobczyce 5) konieczność zmian geometrii granic gęstościowych w stosunku do modelu startowego pojawiła się w procesie modelowania. Przeprowadzona w ten sposób korekta modelu gęstościowego stanowi potwierdzenie poprawności interpretacji jakościowej anomalii grawimetrycznych w rejonie Myślenice – Wiśniowa (Grabowska *et al.* 2007). Dodatnia lokalna anomalia siły ciężkości, wyraźnie zaznaczająca się na mapie anomalii resztkowych (Fig. 3), może być związana z morfologią płytko zalegającego podłoża. Opisywana anomalia sąsiaduje ze strefami ujemnych anomalii, posiadających związek z występowaniem utworów jednostki podśląskiej, które charakteryzują się obniżonymi gęstościami (Grabowska *et al.* 2007).

Na profilu A–A, gdzie podstawowe założenia geometrii modelu gęstościowego oparte zostały na danych sejsmicznych, dokonano również oceny udziału poszczególnych kompleksów skorupy w kreowaniu obserwowanego pola anomalii siły ciężkości.

Na figurze 4A obok uzyskanej w procesie modelowania krzywej $\Delta g_{ef.1}$, odpowiadającej efektowi grawitacyjnemu związanemu z rozkładem gęstości zarówno w kompleksie osadowym, jak i kompleksie krystalicznym, przedstawiono dwie krzywe efektów grawitacyjnych. Krzywa $\Delta g_{ef.2}$ odpowiada sumarycznemu oddziaływaniu grawitacyjnemu zróżnicowanego gęstościowo osadowego kompleksu skorupy, leżącego na kompleksie krystalicznym o stałej gęstości $\sigma = 2.69 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Krzywa $\Delta g_{ef.3}$ natomiast odzwierciedla oddziaływania grawitacyjne (1) ośrodka, składającego się z kompleksu osadowego o stałej gęstości $\sigma = 2.52 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$, która odpowiada średniej ważonej, obliczonej na podstawie wymodelowanych gęstości w kompleksach skał osadowych modelu (Fig. 4B), i (2) kompleksu krystalicznego o zmiennej gęstości (Fig. 4C).

Z porównania krzywych ($\Delta g_{ef,1}$, $\Delta g_{ef,3}$) efektów grawitacyjnych z krzywą anomalii Δg_B wynika, że główną rolę w kreowaniu pola anomalnego odgrywa rozkład gęstości w krystalicznym kompleksie skorupy, wyrażony poprzez strukturę ekwiwalentną.

Wzdłuż profilu A–A dokonano również porównania wyników badań sejsmicznych, grawimetrycznych i magnetotellurycznych pod względem morfologii i głębokości występowania prekambryjskiego podłoża (Fig. 5). Zestawione z krzywą obserwowanych anomalii Δg_B efekty grawitacyjne $\Delta g_{ef,1}$ i $\Delta g_{ef,2}$ są odzwierciedleniem różnic w grawitacyjnym oddziaływaniu prekambryjskiego podłoża wyznaczonego na podstawie modelowań grawimetrycznych i interpretacji wyników badań magnetotellurycznych (Stefaniuk *et al.* 2007). W obu przypadkach potwierdza się jednak przekonanie o podrzędnej roli kompleksu osadowego w kreowaniu anomalii grawimetrycznych Δg_B .

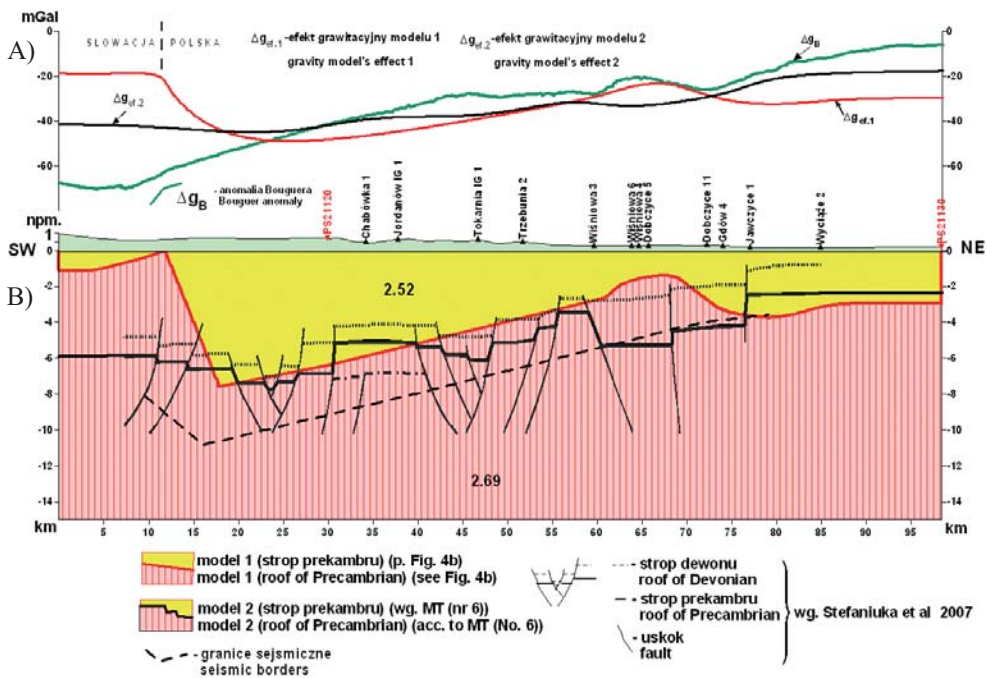


Fig. 5. Zestawienie 2D efektów grawitacyjnych ($\Delta g_{ef(1,2)}$) związanych z morfologią podłoża prekambryjskiego z krzywą anomalii (Δg_B) na profilu A–A: A) Δg – krzywa anomalii siły ciężkości w red. Bouguera (Fig. 2); 1 – model 1 – prekambryjskie podłożo wg danych sejsmicznych i grawimetrycznych (Fig. 4B), 2 – model 2 – prekambryjskie podłożo wg danych geoelektrycznych na profilu MT (nr 6) (wg Stefaniuka *et al.* 2007); B) uproszczony gęstościowy model skorupy

Fig. 5. 2D comparison of gravity effects ($\Delta g_{ef(1,2)}$) related to the Precambrian substratum morphology and the anomaly graph (Δg_B) in the A–A profile: A) Δg – the graph of the Bouguer gravity anomaly (Fig. 2); 1 – model 1 – the Precambrian substratum by seismic and gravity data (Fig. 4B), 2 – model 2 – the Precambrian substratum by geoelectric data in profile MT (nr 6) (Stefaniuk *et al.* 2007); B) simplified density model of the crust

GRAWIMETRYCZNY PROFIL INTERPRETACYJNY B–B (INTERPRETACJA IŁOŚCIOWA)

Mając na uwadze zbieżność lokalizacji profilu B–B z przebiegiem profilu magnetotelurycznego MT (nr 4) oraz linii przekroju geologicznego (Fig. 1) (Golonka 2007), interpretację anomalii grawimetrycznych sprowadzono do wyznaczenia efektów grawitacyjnych, odpowiadających gęstościowym modelom kompleksu osadowego skorupy (Fig. 6B, 8B), skonstruowanym na podstawie przekrojów geoelektrycznego (Stefaniuk *et al.* 2007) i geologicznego (Golonka 2007).

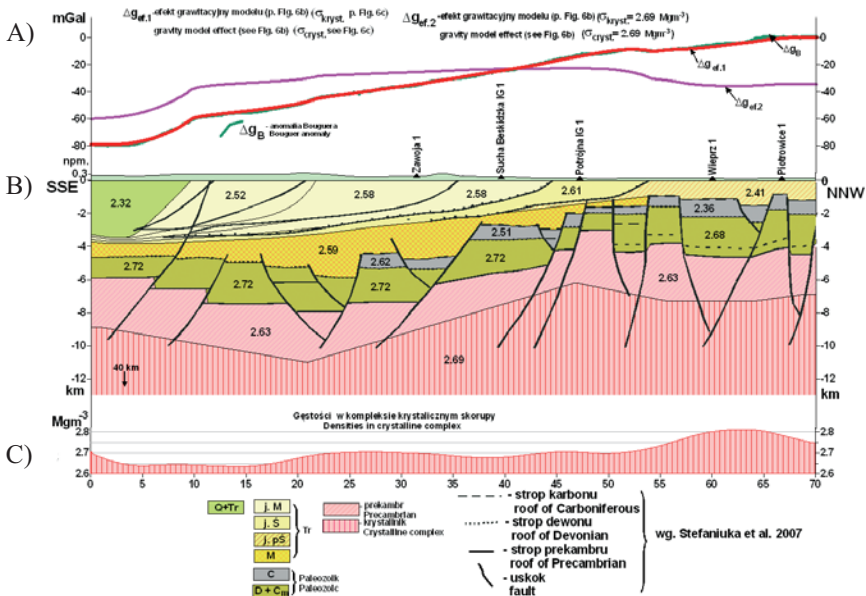


Fig. 6. Wyniki 2D grawimetrycznego modelowania na profilu B–B (model skonstruowany na podstawie przekroju geoelektrycznego wzdłuż profilu MT (nr 4) (Stefaniuk *et al.* 2007)): A) zestawienie krzywych efektów grawitacyjnych $\Delta g_{ef(1,2)}$ z krzywą anomalii siły ciężkości Δg_B w red. Bouguera (Fig. 2): (1) – zmienna gęstość kompleksu osadowego (B) i zmiany gęstości (struktura ekwiwalentna) w kompleksie krystalicznym (C); (2) – zmienna gęstość kompleksu osadowego (B) i stała gęstość kompleksu krystalicznego $\sigma_{kryst.} = 2.69 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$; B) model gęstościowy skorupy skonstruowany na podstawie wyników interpretacji danych magnetotelurycznych (Stefaniuk *et al.* 2007) i modelowania grawimetrycznego 2D; C) zmiany gęstości (struktura ekwiwalentna) w krystalicznym kompleksie skorupy ($2.64\text{--}2.81 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$). Objasnienia: j.M – jednostka magurska, j.S – jednostka śląska, j.pŚ – jednostka podśląska, M – miocen

Fig. 6. Results of 2D gravity modelling in the B–B profile (the model designed on the basis of MT (No 4) (Stefaniuk *et al.* 2007)): A) comparison of graphs of gravity effects $\Delta g_{ef(1,2)}$ with the graph of the Bouguer gravity anomaly (see Fig. 2): (1) – variable density of the sedimentary complex (B) and variations of density (equivalent structure) in the crystalline complex (C), (2) – variable density of the sedimentary complex (B) and constant density of the crystalline complex $\sigma_{cryst.} = 2.69 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$; B) density model of the crust designed on the basis of magnetotelluric data interpretation (Stefaniuk *et al.* 2007) and 2D gravity modelling; C) variations of density (the equivalent structure) in the crystalline crust complex ($2.64\text{--}2.81 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$). Explanations: j.M – the Magura Unit, j.S – the Silesian Unit, j.pŚ – the Sub-Silesian Unit, M – Miocene

Proces modelowania 2D ograniczony został w głównej mierze do wyznaczenia w ramach krystalicznego kompleksu skorupy struktury ekwiwalentnej, przekładającej się na rozkład gęstości w tym kompleksie (Fig. 6C, 7C, 8C), i niewielkich korekt w kompleksie osadowym (Fig. 8B).

Na figurze 6 zestawiono wyniki wszystkich etapów interpretacji ilościowej dla przekroju, którego geometria granic gęstościowych pokrywa się z geometrią modelu geoelektrycznego, obejmującego osadowy kompleks skorupy i podłoże prekambryjskie. Obok podłoża prekambryjskiego zgodnie z wynikami badań sejsmicznych na profilu CEL 01 (Fig. 4B) wprowadzono tu na hipotetycznej głębokości strop podłoża krystalicznego (Fig. 6B).

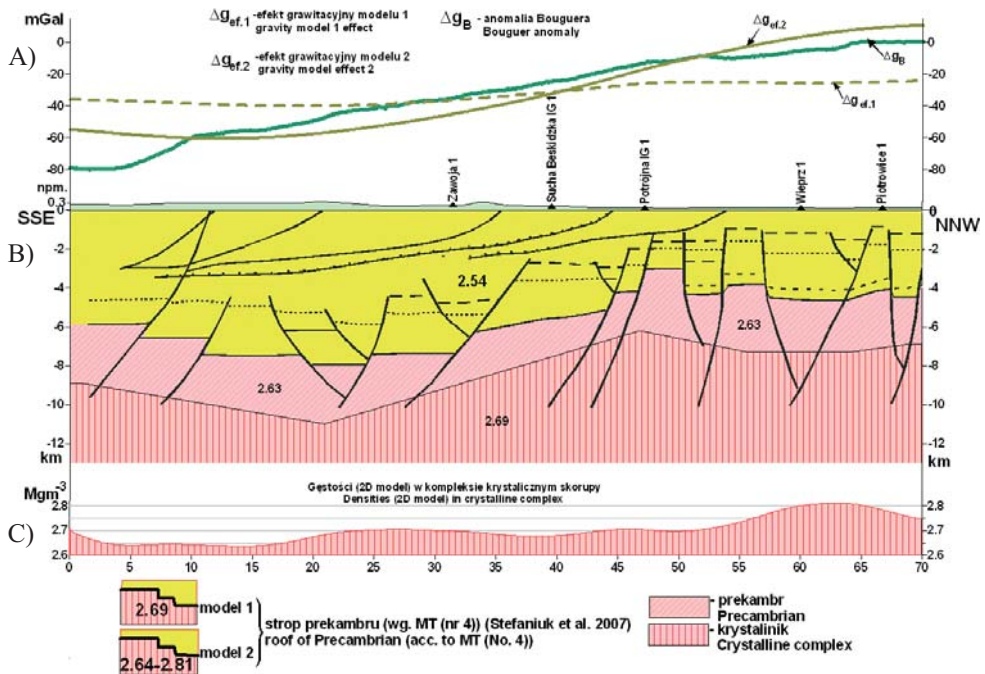


Fig. 7. Zestawienie 2D efektów grawitacyjnych ($\Delta g_{ef(1,2)}$) związanych z morfologią podłoża prekambryjskiego (wg danych geoelektrycznych) z krzywą anomalii (Δg_B) na profilu B–B: A) Δg_B – krzywa anomalii siły ciężkości w red. Bouguera (Fig. 2): (1) – model 1 – stała gęstość w kompleksie osadowym $\sigma = 2.54 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (średnia ważona), stała gęstość w kompleksie krystalicznym $\sigma = 2.69 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$; (2) – model 2 – stała gęstość w kompleksie osadowym $\sigma = 2.54 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ i zmiany gęstości w kompleksie krystalicznym ($2.64\text{--}2.81 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$) (struktura ekwiwalentna); B) uproszczony gęstościowy model skorupy; C) zmiany gęstości (struktura ekwiwalentna) w krystalicznym kompleksie skorupy ($2.64\text{--}2.81 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Fig. 7. Comparison of 2D gravity effects ($\Delta g_{ef(1,2)}$) related to the Precambrian substratum morphology (by geoelectric data) and the anomaly curve (Δg_B) in the B–B profile: A) Δg_B – the graph of the Bouguer gravity anomaly (Fig. 2): (1) – model 1 – constant density in the sedimentary complex $\sigma = 2.54 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (weighted average), constant density in the crystalline complex $\sigma = 2.69 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$; (2) – model 2 – constant density in the sedimentary complex $\sigma = 2.54 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ and variations of density in the crystalline complex ($2.64\text{--}2.81 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$) (equivalent structure); B) simplified density model of the crust; C) variations of density (the equivalent structure) in the crystalline complex ($2.64\text{--}2.81 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Podobnie jak w przypadku profilu interpretacyjnego A–A w procesie modelowania 2D wyznaczono strukturę ekwiwalentną wyrażającą rozkład gęstości (2.64–2.81 Mg·m⁻³) w krystalicznym kompleksie skorupy (Fig. 6C). Udowodniono decydujący wpływ zróżnicowania gęstości w tym kompleksie na przebieg anomalii obserwowanych wzdłuż profilu (Fig. 7A – krzywa $\Delta g_{ef,2}$).

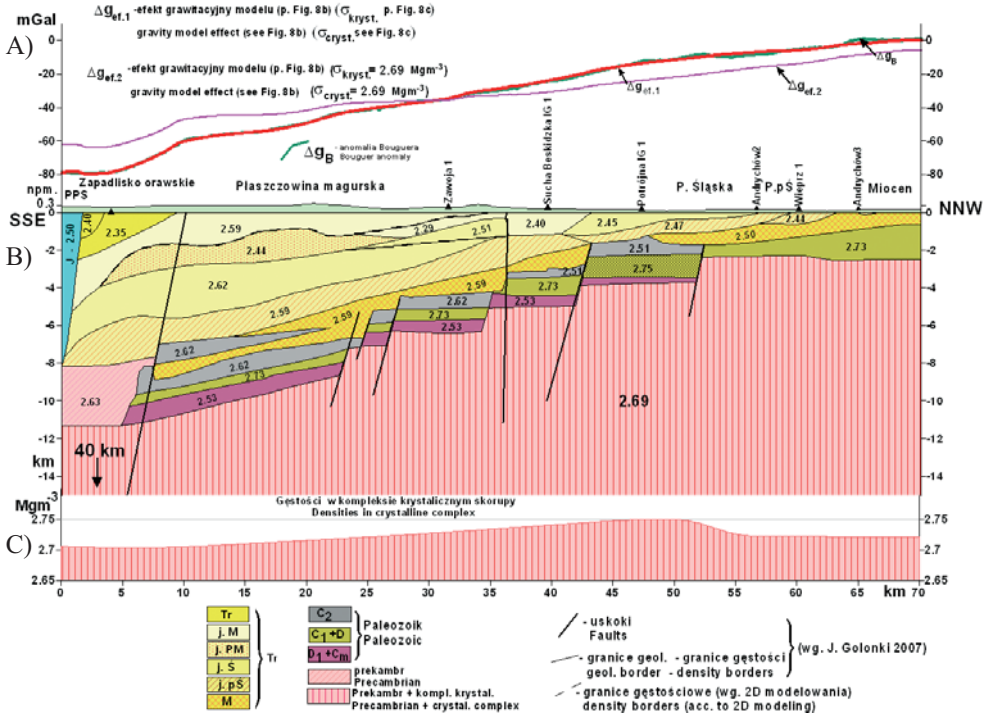


Fig. 8. Results of 2D gravity modelling in the B–B profile (the model constructed on the basis of the geological cross-section (acc. to Golonka 2007)):

- A)** comparison of graphs gravity effect $\Delta g_{ef(1,2)}$ with the Bouguer gravity anomaly (see Fig. 2): (1) – variable density of the sedimentary complex (B) and variations of density (equivalent structure) in the crystalline complex (C); (2) – variable density of the sedimentary complex (B) and constant density of the crystalline complex $\sigma_{cryst.} = 2.69 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- B)** density model of the crust (by geological section acc. to Golonka 2007) and 2D modelling;
- C)** variations of density (the equivalent structure) in the crystalline crust complex (2.71–2.75 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Explanations: j.M – the Magura Unit, j.Ś – the Silesian Unit, j.pŚ – the Sub-Silesian Unit + Skolska Unit, M – Miocene

Fig. 8. Results of 2D gravity modelling in the B–B profile (the model constructed on the basis of the geological cross-section (acc. to Golonka 2007)):

- A)** comparison of graphs gravity effect $\Delta g_{ef(1,2)}$ with the Bouguer gravity anomaly (see Fig. 2): (1) – variable density of the sedimentary complex (B) and variations of density (equivalent structure) in the crystalline complex (C); (2) – variable density of the sedimentary complex (B) and constant density of the crystalline complex $\sigma_{cryst.} = 2.69 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$;
- B)** density model of the crust (by geological section acc. to Golonka 2007) and 2D modelling;
- C)** variations of density (the equivalent structure) in the crystalline crust complex (2.71–2.75 $\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Explanations: j.M – the Magura Unit, j.Ś – the Silesian Unit, j.pŚ – the Sub-Silesian Unit + Skolska Unit, M – Miocene

Przeciwieństwem tego jest słabe oddziaływanie grawitacyjne (krzywa $\Delta g_{ef,2}$ Fig. 6A) kompleksu osadowego, aproksymowanego ośrodkiem o zróżnicowanej gęstości (Fig. 6B) jak również zastąpionego ośrodkiem o stałej gęstości $\sigma = 2.54 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ średnia ważona (Fig. 7A – krzywa $\Delta g_{ef,1}$).

Wyniki interpretacji przeprowadzonej na bazie danych geologicznych przedstawione zostały na figurze 8. Model gęstościowy kompleksu osadowego skonstruowany został zgodnie z przekrojem geologicznym zamieszczonym w artykule J. Golonki (Golonka 2007). Poszczególnym kompleksom stratygraficznym przyporządkowane zostały gęstości mieszczące się w odpowiednich przedziałach wielkości (Tab. 2).

Po wprowadzeniu w procesie modelowania 2D niewielkich zmian w morfologii stropu jednostki przedmagurskiej (Fig. 8B) (południowa część profilu) oraz wyrażonego poprzez strukturę ekwiwalentną (Fig. 8C) niewielkiego zróżnicowania gęstości ($2.71\text{--}2.75 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) w krystalicznym kompleksie skorupy uzyskano dopasowanie krzywej efektu grawitacyjnego $\Delta g_{ef,1}$ do krzywej Δg_B (Fig. 8A).

Warto zauważyć, że w tym wypadku efekt grawitacyjny (Fig. 8A – krzywa $\Delta g_{ef,2}$), związany z kompleksem osadowym (Fig. 8B), jest podobny w charakterze do obserwowanej anomalii, co skutkuje stosunkowo słabym zróżnicowaniem gęstości ($2.71\text{--}2.75 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) w kompleksie krystalicznym (Fig. 8C).

Analizując charakter krzywej anomalii Δg_B wzdłuż profilu, należy zwrócić uwagę na obniżoną wartość anomalii w rejonie południowego krańca profilu (zapadlisko orawskie) i sąsiadujący z nią od strony północnej wzrost wartości anomalii. Oba te fakty znajdują swoje wyraźne odzwierciedlenie na mapie anomalii resztkowych (Fig. 3), a prezentowany na figurze 8B model gęstościowy wyjaśnia źródła tych anomalii. Podobną uwagę można sformułować do słabej anomalii o charakterze lokalnym, występującej w rejonie wiercenia Potrójna IG-1 (Fig. 8A). Anomalia ta stanowi fragment dość rozległej lokalnej anomalii, rozpościerającej się między Andrychowem, Lachowicami i Żywcem (Fig. 3).

Prezentowany na figurze 8B gęstościowy model skorupy w tym rejonie, sytuuje źródła omawianej anomalii w wyniesionym podłożu prekambryjskim i podłożu paleozoicznym nasunięcia karpackiego, a także wiąże je ze wzrostem gęstości w kompleksie krystalicznym (Fig. 8C), co w tym ostatnim przypadku znalazło potwierdzenie w wynikach badań magnetycznych (Grabowska *et al.* 2007).

DYSKUSJA I PODSUMOWANIE

Interpretacja ilościowa anomalii grawimetrycznych na profilach A–A i B–B, znajdujących się w bliskim sąsiedztwie profili magnetotellurycznych MT (nr 6) i MT (nr 4), profilu głębokich badań sejsmicznych CEL 01, a także linii przekroju geologicznego, dzięki możliwości identyfikacji źródeł obserwowanych anomalii siły ciężkości, pozwoliła na pełniejszą geologiczno-geofizyczną charakterystykę skorupy środkowej części polskich Karpat Zachodnich.

Wyniki głębokich badań sejsmicznych wykonanych wzdłuż profilu CEL 01 (Środa *et al.* 2006) wskazują na to, że południowe fragmenty obu interpretacyjnych profili grawimetrycznych, przecinające zapadlisko orawskie wraz ze znajdującym się w podłożu zapadliska Pienińskim Pasem Skałkowym, przypadają na rejon maksymalnego obniżenia granicy Moho w Zewnętrznych Karpatach Zachodnich. Głębokość tej granicy maleje w kierunku północno-wschodnim. W tym samym kierunku podnosi się podłoże Karpat Zewnętrznych, co skutkuje redukcją miąższości lekkiego kompleksu osadowego. Elementy te w różnym stopniu wpływają na wielkość regionalnej składowej pola anomalnego. Jednakże związane z nimi efekt grawitacyjny nie wyjaśnia w pełni źródeł regionalnego gradientu, co jest szczególnie zauważalne w przypadku profilu A–A.

Zgodność między efektem grawitacyjnym związanym z całą skorupą a obserwowaną wzdłuż profilu krzywą anomalii Δg_B otrzymano, wprowadzając strukturę ekwiwalentną, w obrębie której rozkład gęstości jest wynikiem modelowania. Przyjmując, że w tym przypadku struktura ta odpowiada rozkładowi gęstości w krystalicznym kompleksie skorupy, można wnioskować o wzroście gęstości skał tego kompleksu skorupy w kierunku północnym. Potwierdzeniem zróżnicowania własności fizycznych krystalicznego kompleksu skorupy mogą być wyniki geologicznej interpretacji danych magnetotellurycznych wzdłuż profilu Chyżne – Niepołomice (MT (nr 6)) i Chyżne – Spytkowice (MT (nr 4)) (Stefaniuk *et al.* 2007), wskazujące na wzrost oporności skał krystalicznego kompleksu skorupy w kierunku północnym.

Analizując zaprezentowane na figurach 6–8, wyniki modelowania i obliczeń efektów grawitacyjnych, należy podkreślić ich zgodność z tezą przedstawioną w pracach G. Bojdysa i M. Lembergera (Bojdys & Lemberger 1986a, b) o głęboko usytuowanych źródłach depresji karpackiej.

Wyniki przeprowadzonego modelowania grawimetrycznego wskazały na podrzędną rolę kompleksu osadowego i występujących w jego obrębie zaburzeń tektonicznych w kreowaniu obserwowanego pola anomalnego.

Należy jednakże stwierdzić, że słabe zaburzenia regionalnego trendu krzywych anomalii Δg_B , pojawiające się w północnych częściach profili, manifestujące się na mapach anomalii transformowanych (Grabowska *et al.* 2007) i na mapie anomalii resztkowych (Fig. 3) występowaniem stref anomalii ujemnych, posiadają związek z tektoniką nasunięcia karpackiego.

Niewielkie, lokalnie pojawiające się w północnych fragmentach profili interpretacyjnych obniżenia wartości obserwowanych anomalii – jak wynika z obliczenia efektów grawitacyjnych dla przedstawionych modeli gęstościowych – wiążą się z obecnością skał o obniżonej gęstości budujących jednostkę podśląską, która pojawia się w oknach tektonicznych Myślenic i Wiśniowej (profil A–A) oraz Wadowic (profil B–B).

Wyniki obliczeń efektów grawitacyjnych odpowiadających gęstościowym modelom skorupy, skonstruowanym na podstawie przekrojów geoelektrycznych i przekroju geologicznego, wskazują na brak odzwierciedlenia oddziaływań grawitacyjnych związanych ze złożoną tektoniką skał paleozoicznych podścielających utwory nasunięcia karpackiego. Przyczyny tego stanu rzeczy tkwią przede wszystkim w głębokości występowania zaburzeń tektonicznych, w skali ich wielkości (niewielkie zrzuty) oraz kontrastach gęstości.

WNIOSKI

Ilościowa interpretacja anomalii grawimetrycznych, obserwowanych wzdłuż dwóch profili przecinających strefę regionalnego gradientu w Karpatach Zewnętrznych, przeprowadzona z uwzględnieniem wyników wykonanych w tym obszarze badań magnetotellurycznych, sejsmicznych i geologicznych, upoważnia do sformułowania następujących wniosków:

- Wprowadzenie pojęcia struktury ekwiwalentnej umożliwiło wykonanie ilościowej interpretacji anomalii w warunkach istnienia silnego regionalizmu.
- Wykazano związek regionalnego gradientu siły ciężkości ze zróżnicowaniem gęstościowym krystalicznego kompleksu skorupy.
- Stwierdzono wzrost gęstości kompleksu krystalicznego skorupy w kierunku północnym i wpływ tego zjawiska na charakter pola regionalnego.
- Wykazano podrzędną rolę kompleksu osadowego w kreowaniu pola anomalii siły ciężkości.
- Potwierdzono wyniki interpretacji jakościowej w zakresie wykorzystania metody grawimetrycznej w rozpoznaniu budowy tektonicznej nasunięć płaszczowinowych i ich zasięgu w polskich Karpatach fliszowych.
- Przy obecnym stanie rozpoznania geofizycznego i geologicznego badanego obszaru nie udało się ocenić przydatności metody grawimetrycznej w rozpoznaniu złożonej budowy tektonicznej skał mezopaleozoicznych, stanowiących podłoże Karpat fliszowych.

Praca została wykonana w czasie realizacji projektu badawczego nr 4T 12B 025 28 Ministerstwa Nauki i Informatyzacji pt. „Nowe aspekty interpretacji wyników pomiarów geofizycznych dla weryfikacji możliwości poszukiwania węglowodorów w Karpatach Zachodnich”.

LITERATURA

- Adamczak T. & Pepel A., 2003. Charakterystyka parametrów fizycznych fliszu i podłoża w obszarze Karpat. *Geologia* (kwartalnik AGH), 29, 3–4, 233–251.
- Bała M. & Cichy A., 2003. Estymacja prędkości fal podłużnych i poprzecznych przy wykorzystaniu modeli teoretycznych oraz danych geofizyki wiertniczej. *Przegląd Geologiczny*, 51, 12, 1058–1063.
- Bała M. & Witek K., 2007. Model prędkościowy fal P i S oraz gęstości objętościowych dla wybranych otworów w rejonie Karpat Zachodnich. *Geologia* (kwartalnik AGH), 33, 4/1, 59–80.
- Bojdys G., 2006. *Program komputerowy „interg2d” do interaktywnego 2D modelowania grawimetrycznego*. Archiwum Katedry Geofizyki AGH.
- Bojdys G. & Lemberger M., 1986a. Three-dimensional gravity modeling of Earth's crust and upper mantle in the Polish Carpathians. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 56, 349–373.
- Bojdys G. & Lemberger M., 1986b. Modelowania grawimetryczne jako metoda badania budowy litosfery na przykładzie Karpat. *Zeszyty Naukowe AGH, Geologia*, 33, 106.

- Cieszkowski M., Golonka J., Waśkowska-Oliwa A. & Chrustek M., 2006. Budowa geologiczna rejonu Sucha Beskidzka – Świnna Poręba (polskie Karpaty fliszowe). *Geologia* (kwartalnik AGH), 32, 2, 155–201.
- Dąbrowski A., 1974. Przyczyny geologiczne anomalii siły ciężkości na obszarze Polski w świetle analizy ciężaru objętościowego. *Prace Instytutu Geologicznego*, LXXIII.
- Fajkiewicz Z., 1963. Geneza anomalii siły ciężkości z rejonu środkowej części przedgórza Karpat. *Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego*, 33, 4.
- Golonka J., 2007. Tektonika polskich Karpat fliszowych pomiędzy Bielskiem Białą a Nowym Targiem. *Geologia* (kwartalnik AGH), 33, 4/1, 29–38.
- Grabowska T., Bojdys G., Lemberger M. & Medoń Z., 2007. Geofizyczno-geologiczna interpretacja anomalii grawimetrycznych i magnetycznych w polskich Karpatach Zachodnich. *Geologia* (kwartalnik AGH), 33, 4/1, 103–126.
- Jarzyna J., 2007. Analiza gęstości i porowatości z badań laboratoryjnych oraz wyników pomiarów otworowych i obliczeń w programie Estymacja w wybranych otworach w Karpatach Zachodnich. *Geologia* (kwartalnik AGH), 33, 4/1, 39–58.
- Królikowski Cz. & Młynarski S., 2003. Struktura głębokiego podłoża Karpat w oparciu o kompleksową interpretację danych geofizycznych. *Geologia* (kwartalnik AGH), 29, 3–4, 197–218.
- Królikowski Cz., 2005. *Rozkłady gęstości wzdłuż profilu sejsmicznego CEL 01*. Archiwum PIG, Warszawa (manuskrypt).
- Poprawa D. & Nemčok J., 1989. *Geological Atlas of the Western Outer Carpathians and Their Foreland*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Stefaniuk M., Klityński W., Jarzyna J. & Golonka J., 2007. Struktura nasunięcia karpackiego i jego podłoża w polskich Karpatach Zachodnich w świetle reinterpretacji wybranych regionalnych profili magnetotellurycznych. *Geologia* (kwartalnik AGH), 33, 4/1, 143–166.
- Środa P., Czuba W., Grad M., Guterch A., Tokarski A.K., Janik T., Rauch M., Keller G.R., Hegedus E., Vozar J. & CELEBRATION 2000 Working Group, 2006: Crustal and upper mantle structure of the Western Carpathians from CELEBRATION 2000 profiles CEL 01 and CEL 04: seismic models and geological implications. *Geophysical Journal International*, 167, 2, 737–760(24).
- Winiarska M., 1983. Uwagi do budowy geologicznej Zapadliska Przedkarpackiego w rejonie Bochni w świetle interpretacji badań grawimetrycznych. *Nafta*, 5, 121–130.

Summary

Bouguer gravity anomaly field in the Carpathians is dominated by an extensive gravity depression accompanying the Carpathians arc. The regional gradient related to the depression can be seen in the picture of gravity anomalies of the Polish Outer Carpathians area and is present on profiles intersecting this area.

The study presents results of quantitative interpretation of the gravity anomaly on two profiles, localized in the middle part of the Western Outer Carpathians (Fig. 1).

Quantitative interpretation of gravity anomalies in conditions of a strong regional field (Fig. 2) and a weaker local field (Fig. 3) has motivated to develop a new interpretation methodology, consisting in use of the so called equivalent structure.

This structure, generated in the modelling process, contains information on distribution of density in the crystalline complex of the crust and substitutes actual sources of the regional field in a limited survey area.

The gravity interpretation profiles, namely the A–A profile and the B–B profile, location of which is presented in figure 1, intersect the Polish Outer Carpathians and to a great extent overlap the course of the magnetotelluric profiles MT (No 6) and MT (No 4), the deep seismic survey profile CEL 01 (the A–A profile) and the geological section line across the Outer Carpathians and their foreland (Golonka 2007) (B–B profile).

Quantitative interpretation of gravity anomalies observed along the profiles was carried out with the 2D modelling method. In the process of 2D gravity modelling an interactive computer program by G. Bojdys (Bojdys 2006) was used. The program is designed for solving forward and inverse problems of gravity by subsequent iterations.

Geological information (drillings, geological maps, sections), results of deep seismic surveys and magnetotelluric surveys were used for density model construction.

The gravity modelling process was preceded by density analysis of rocks forming the crust in the survey area. It has indicated large diversification of the rock medium.

Findings of density investigation are presented in tables 1 and 2.

Information on rock density from the study by T. Adamczak and A. Pepel (Adamczak & Pepel 2003) was used for interpretation of data presented in table 1. The information was coming from boreholes located in the Eastern part of the area surveyed.

Table 2 presents data on densities of rocks forming the crust of the Western part of the area surveyed, published by J. Jarzyna (Jarzyna 2007) and M. Bała and K. Witek (Bała & Witek 2007).

The complex process of gravity modelling was performed in stages.

The first stage involved design of the so called „starting” density model which based on available geological data (geological sections, structural maps, drilling results, density data) and geophysical data (velocity section of the crust, geoelectrical sections).

The second stage constituted a complex modelling process consisting in making such modifications (density, density interface geometry) in the starting model by subsequent iterations so that the related gravity effect complies with the observed gravity anomaly.

Findings of quantitative interpretation of gravity anomalies in the form of density models of the crust along the two interpretation profiles, calculations of gravity effects related to the density distribution in the sedimentary complex and in the crystalline complex and results of confrontation with findings of seismic, magnetotelluric and geological surveys conducted in the vicinity of gravity interpretation profiles are presented in figures 4–8.

The basic model geometry assumptions in the design of the crust density model on the A–A profile (Fig. 4) were based on seismic data. The courses of the Precambrian roof surface and the crystalline substratum roof were determined on the basis of the velocity section of the crust and upper mantle on the CEL 01 profile (Środa *et al.* 2006).

Due to lack of geological information the sedimentary crust complex was treated schematically and diversification of density (Tab. 1) within this complex was obtained by gravity modelling (Fig. 4B).

In the places of weak disturbances of the anomaly curve Δg_B (the northern fragment of the A–A profile) (Fig. 4A) the geometry of boundaries corresponding to the Precambrian roof and the crystalline substratum roof was corrected. However satisfactory matching of the gravity effect curve to the Δg_B anomaly observed on the profile was obtained after introduction by the 2D modelling of the equivalent structure (Fig. 4C) simulating diversification of density in the crystalline crust complex.

Also contribution of individual crust complexes to creation of the gravity anomaly field observed was assessed within the A–A profile. Calculation results are presented in the form of graphs, illustrating gravity effects related to the sedimentary crust complex (Fig. 4A – graph $\Delta g_{ef.2}$) and the crystalline complex (Fig. 4A – graph $\Delta g_{ef.3}$).

Also gravity modelling results were compared with magnetotelluric survey results (Stefaniuk *et al.* 2007) with regard to the Precambrian top features (Fig. 5)

In the case of the B–B profile the study was limited mainly to calculation of gravity effects corresponding to the density model of the crust, designed on the basis of the geoelectrical section of the crust (Stefaniuk 2007) (Figs 6, 7) and gravity effects, related to the density model of the crust of geometry complying with elements of geological section through the Outer Carpathians and their foreland (Golonka 2007) (Fig. 8).

In the first case satisfactory compliance of the gravity effect $\Delta g_{ef.1}$ (Fig. 6A), calculated for the density model of the sedimentary complex and substratum was obtained after introduction of the equivalent structure (Figs 6C, 7C), indicating the possibility of explicit diversification of density in the crystalline crust complex. This fact was also confirmed by the calculation results presented in figure 7 (graph $\Delta g_{ef.2}$).

Calculations of gravity effect for the density model designed on the basis of geological section showed little differences between the calculated effect $\Delta g_{ef.2}$ (Fig. 8A) and the anomaly observed on the profile. Having entered small corrections to the density model of the Carpathian thrust and weak diversification of density in the crystalline complex (the equivalent layer – Fig. 8C), satisfactory compliance of the gravity effect $\Delta g_{ef.1}$ with the anomaly Δg_B (Fig. 8A) was obtained.

Calculations and results of gravity modelling performed on the both profiles justify formulation of the following conclusions:

- Introduction of the notion of equivalent structure has enabled to perform quantitative interpretation of the anomaly in conditions of strong regionalism existence.
- Relationship between the regional gravity gradient with density diversification in the crystalline crust complex was shown.
- Increase in density of the crust crystalline complex in the northern direction and its influence on the regional field nature were found.
- A subsidiary role of the sedimentary complex in creation of the gravity anomaly field was shown.
- Qualitative interpretation results concerning use of gravimetry for investigation of tectonic structure of nappes of the Outer Carpathians and their extent were confirmed.
- Usefulness of the gravity method for investigation of the complex tectonic structure of Meso-Paleozoic Carpathian substratum rocks was not proven.