

Gęstość objętościowa pokrywy osadowej na Lubelszczyźnie

Olga Rosowiecka¹, Czesław Królikowski¹

Bulk density of sedimentary cover in the Lublin region. Prz. Geol., 62: 456–462.

Abstract. The paper presents the results of analyzes executed within the project carried out by the Polish Geological Institute – National Research Institute. The purpose was to develop a density model of sedimentary cover in, inter alia, the Lublin region, on the basis of archival laboratory measurements. The source material consisted primarily of a database of archival measurements made on samples taken from drill cores. Since the sampling was often fragmentary and missed long intervals of the section, it was necessary to develop a methodology for estimating the density of such blank intervals. Trend equations of density changes with depth were determined on the basis of existing measurements, which helped in the estimation. For each stratigraphic period, density weighted average was calculated, where the thickness of each depth interval was the weight. Juxtaposition of such average densities with the arithmetic means, with or without taking into account the estimated values, indicates the pros and cons of the methodology. The final step was to construct the following: density maps of each stratigraphic period, maps of density contrast at the top-bottom contact of two stratigraphic periods and density maps at selected depth levels.

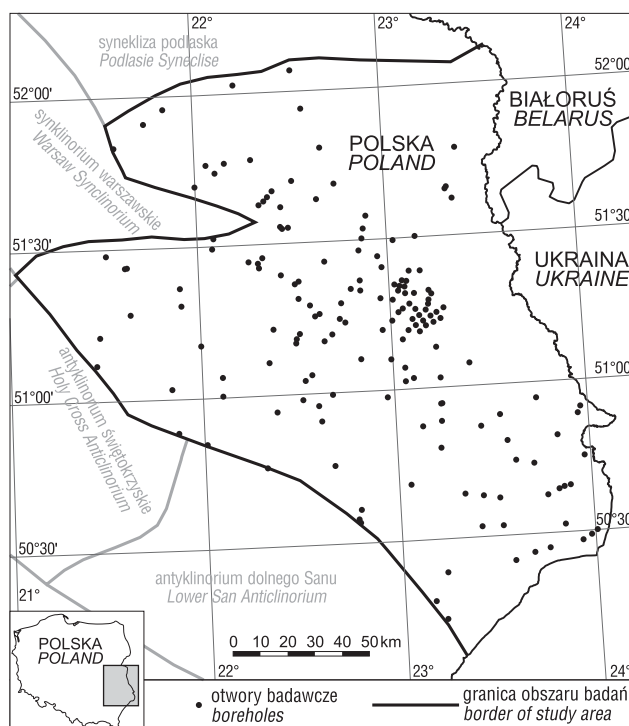
Keywords: bulk density, laboratory data, estimated data, Lublin area

W rozpoznaniu budowy geologicznej, zwłaszcza w przypadku rejonów o skomplikowanej budowie tektonicznej, bardzo przydatną metodą stanowi grawimetria. Skutecznie może ona wspomagać interpretację danych sejsmicznych. Aby efektywnie wykorzystać wyniki badań grawimetrycznych, konieczne jest jednak jak najlepsze rozpoznanie gęstościowe ośrodka skalnego. Pomiaru gęstości wykonywane są bezpośrednio w otworach (geofizyka otworowa) albo na próbkach pobranych z rdzeni wiertniczych lub odsonięć.

Rozkład gęstości utworów i jego związek z anomaliaми grawimetrycznymi na Lubelszczyźnie niejednokrotnie był już przedmiotem badań (Grabowska, 1978; Bronowska, 1980; Grabowska & Perchuć, 1985; Grabowska & Małoszewski, 1990; Grabowska i in., 1991). Podstawą tych opracowań było wyznaczenie gęstości średnich wprost z danych pomiarowych, bez uwzględnienia odcinków rdzenia, na których nie wykonano pomiarów. Obliczone w ten sposób wartości średnie, często niereprezentatywne dla danej jednostki stratygraficznej, mogły być obciążone dużym błędem. Do wyznaczenia podanych w artykule średnich gęstości wykorzystano zbiór danych pomiarowych uzupełnionych o wartości szacowane dla interwałów głębokościowych, w których nie wykonano pomiarów. W publikacji wyjaśniono sposób szacowania gęstości ośrodka skalnego, a także przedstawiono przykładowe mapy wynikowe wraz z rezultatami ich analizy.

LOKALIZACJA OBSZARU BADAŃ

Zasięg regionu określonego mianem Lubelszczyzna wyznaczono na podstawie mapy podziału Polski na jednostki tektoniczne (Pożaryski, 1969). Północną granicę obszaru stanowi kontakt z syneklizą podlaską w części wschodniej i synklinorium warszawskim w części zachodniej. Od południowego zachodu badany rejon graniczy z antyklinorium dolnego Sanu i antyklinorium świętokrzyskim. Granicą wschodnią jest granica państwowa z Biało-



Ryc. 1. Lokalizacja otworów, w których wykonano pomiary wykorzystane w opracowaniu

Fig. 1. Location of boreholes with the measurements used for the study

rusią i Ukrainą. Na rycinie 1 przedstawiono lokalizację omawianego obszaru i otworów badawczych wykorzystanych w analizie. Opracowanie powstawało przed ukazaniem się publikacji Żelaźniewicza i in. (2011), według której analizowany obszar pokrywałby się w przybliżeniu ze zrębem Łukowa, z rowem mazowiecko-lubelskim i ze zrębem Radom–Kraśnik aż po uskok Nowego Miasta.

Wybór takiego miejsca do przedstawienia przykładowego modelu gęstościowego został podyktowany kilkoma

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; olga.rosowiecka@pgi.gov.pl.

czynnikami. Głównie było to dość duże zagęszczenie otworów wiertniczych, dla których wykonano laboratoryjne pomiary gęstości. Autorom opracowania zależało również na wybraniu dość dużego i jednolitego pod względem litologii i wieku obszaru, co ułatwia opracowanie wiarygodnych map w tak dużej skali i przy tak, mimo wszystko, rzadkich danych.

METODYKA

Materiały źródłowe

W ramach projektu realizowanego w Państwowym Instytucie Geologicznym – Państwowym Instytucie Badawczym (Rosowiecka i in., 2011) przeanalizowano m.in. wyniki laboratoryjnych pomiarów rdzeni ze 168 otworów wiertniczych z rejonu Lubelszczyzny (ryc. 1).

W wielu wypadkach, z powodu fragmentarycznego opróbowania rdzeni, konieczne było szacowanie gęstości. W wyniku przeprowadzonej analizy umożliwiające zostało skonstruowanie map gęstości poszczególnych wydziałów stratygraficznych i map gęstości na dowolnie wybranej głębokości (mapy ścięcia).

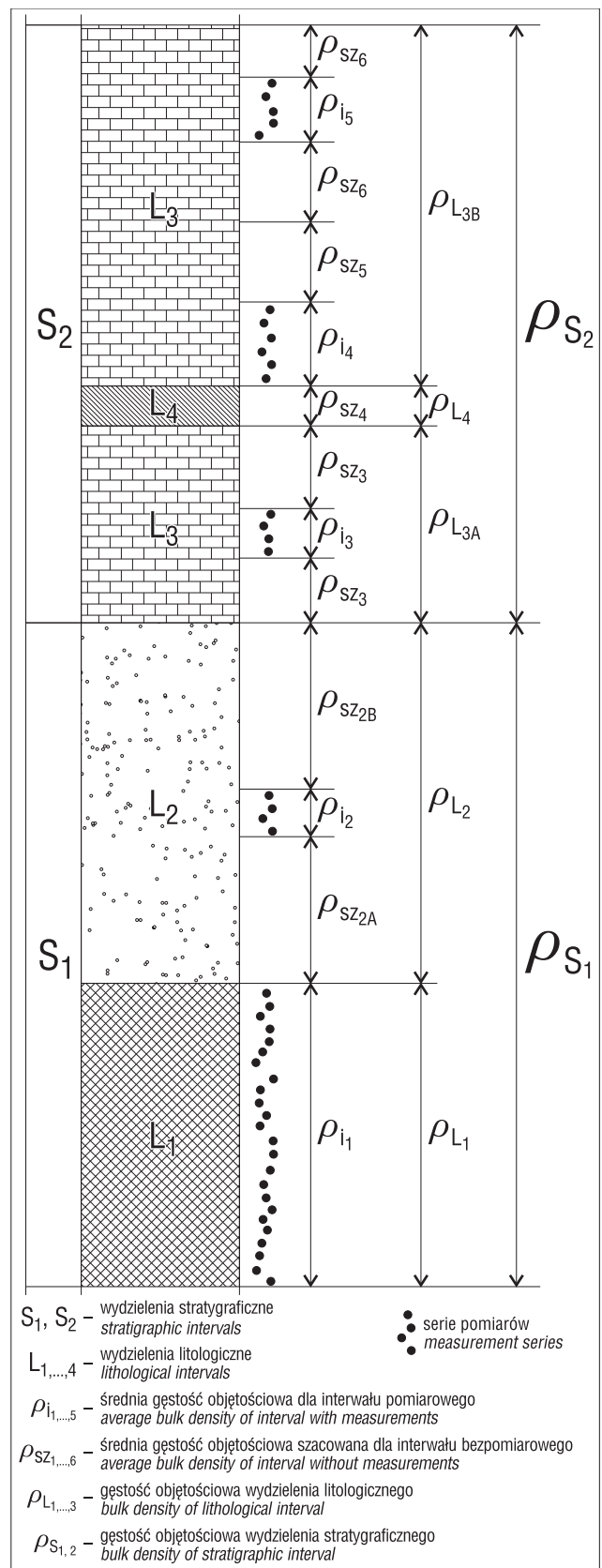
Podstawowym źródłem informacji, z którego korzystano podczas realizacji projektu, była baza danych gęstościowych opracowana przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych w latach 90. XX w. (Francik, 1997). Większość pomiarów laboratoryjnych wykonano w drugiej połowie XX w. Pomiary polegały na ważeniu próbek nasyconych cieczą (alkohol etylowy z gliceryną) o gęstości 1 g/cm^3 , przy czym nasywanie odbywało się przy ciśnieniu atmosferycznym w ciągu 1 doby. Po zważeniu próbki ponownie zanurzono w płynie o gęstości 1 g/cm^3 w celu zmierzenia ich objętości. Gęstość objętościową odczytywano z gęstościomierza. Błąd pomiaru dla pojedynczych próbek skał litych nie przekraczał $0,01 \text{ g/cm}^3$.

Próbki pobierano zazwyczaj w interwale 25 cm, ale rzadko opróbowanie obejmowało cały rdzeń z otworu. Zagęszczenie pomiarów jest zróżnicowane zarówno w przypadku różnych jednostek stratygraficznych, jak i w przypadku tej samej jednostki nawierconej w różnych otworach. Opróbowanie prowadzono przeważnie seriami po kilka, rzadziej kilkanaście próbek w odstępach co kilkadziesiąt, a nawet kilkaset metrów.

Wyznaczanie średniej gęstości objętościowej wydziałów stratygraficznych

Obliczanie średniej ważonej gęstości objętościowej ρ_S dla poszczególnych wydziałów stratygraficznych odbywało się w kilku krokach. W zrozumieniu metodyki obliczania ρ_S powinien pomóc schemat przedstawiony na rycinie 2. Widoczne są na nim dwa wydziałów stratygraficznych – S_1 i S_2 . W każdym z nich występują dwa rodzaje utworów: L_1 i L_2 w S_1 oraz L_3 i L_4 w S_2 , przy czym L_4 stanowi cienką wkładkę w L_3 . Czarne kropki po prawej stronie profilu litologicznego symbolizują serie opróbowania, a zarazem pomiary. Celem jest obliczenie średnich gęstości wydziałów S_1 i S_2 , czyli odpowiednio ρ_{S_1} i ρ_{S_2} .

Pierwszym, najprostszym krokiem jest obliczenie średnich gęstości arytmetycznych dla poszczególnych serii (interwałów) opróbowania, czyli $\rho_{i_1, \dots, 5}$. Następnie trzeba



Ryc. 2. Schemat opracowywania średniej gęstości wydziałów stratygraficznych

Fig. 2. Scheme for development of average density of stratigraphic intervals

oszacować gęstość dla odcinków bezpomiarowych, czyli $\rho_{SZ_{1, \dots, 6}}$. Metoda szacowania zależy od miąższości odcinka bezpomiarowego i zróżnicowania jego litologii.

1. Duża miąższość, jedna litologia. Seria opróbowania o średniej gęstości ρ_{i2} znajduje się w środkowej części wydzielenia L_2 . Ze względu na jego znaczną miąższość (dużo większą od miąższości serii opróbowania) gęstość należy szacować osobno dla górnego i dolnego odcinka (ρ_{sz2A} i ρ_{sz2B}), uwzględniając przy tym czynnik głębokościowy. Gęstości ρ_{sz2A} i ρ_{sz2B} szacowane są z odpowiednich równań trendów, które podano w dalszej części artykułu.

2. Mała miąższość, jedna litologia. Seria opróbowania o średniej gęstości ρ_{i3} znajduje się w wydzieleniu L_3 , przy czym miąższości odcinków powyżej i poniżej serii opróbowania są porównywalne z miąższością odcinka pomierzonego. W takim przypadku można przyjąć, że odpowiadające im gęstości są równe i że $\rho_{sz3} = \rho_{i3}$.

3. Kilka serii pomiarowych, jedna litologia. Serie opróbowania o średnich gęstościach ρ_{i4} i ρ_{i5} występują w tym samym wydzieleniu litologicznym L_3 . Gęstości dla odcinków bezpomiarowych szacowane są w takim przypadku na zasadach opisanych w punktach 1 i 2, a granica oddziaływania poszczególnych serii opróbowania jest określana jako połowa odcinka między stropem serii dolnej i spągiem serii górnej.

4. Brak pomiarów w wydzieleniu litologicznym. Częstym przypadkiem jest brak opróbowania cienkich wkładek o odmiennej litologii (L_4) występujących w miąższej warstwie (L_3). Gęstość takiej wkładki ρ_{sz4} może mieć wpływ na średnią gęstość wydzielenia L_3 w przypadku, gdy znacznie odbiega ona od gęstości utworów nadległych i podległych. Dzieje się tak np. w nierównomiernie opróbowanych seriach cechsztyńskich czy w utworach karbońskich Lubelszczyzny. Jeżeli w otworach bezpośrednio sąsiadujących z otworem, w którym szacujemy ρ_{sz4} , dana warstwa została opróbowana i pomierzona, to ρ_{sz4} przypisujemy gęstość tam pomiarzoną. W przypadku, gdy takiej informacji nie ma, należy przyjąć średnią wartość dla danej litologii z całego obszaru (co oczywiście zwiększa błąd wyznaczenia).

W kolejnym kroku, korzystając z wyznaczonych już średnich gęstości serii opróbowania ρ_i i gęstości szacowanych ρ_{sz} , oblicza się średnią gęstość ważoną wydzielenia litologicznego ρ_L , przy czym wagą jest miąższość poszczególnych odcinków, dla których wyznaczane były gęstości średnie i szacowane. W najprostszym przypadku wydzielenia L_1 o równomiernym opróbowaniu $\rho_{i1} = \rho_{L1}$.

Ostatnim krokiem jest obliczenie ρ_S jako średnich ważonych z ρ_L znajdujących się w konkretnym wydzieleniu stratygraficznym. Wagą jest miąższość wydzieleni litologicznych.

Podane w opracowaniu wydzielenia litologiczne i stratygraficzne zaczerpnięto z dokumentacji źródłowych pomiarów gęstościowych.

RÓWNIANIA TRENDÓW ZMIANY GĘSTOŚCI Z GŁĘBOKOŚCIĄ I ANALIZA GĘSTOŚCIOWA UTWORÓW LUBELSZCZYNY

Ponieważ gęstość utworów osadowych zależy m.in. od głębokości ich zalegania, na podstawie dostępnych wyników pomiarów wyznaczono zależności (równania trendów) gęstości (ρ ; g/cm³) od głębokości (h ; km) dla poszczególnych jednostek stratygraficznych:

- czwartorzęd (Q) $\rho = 2,433 \cdot h + 1,981$;
- kreda górna (K3) $\rho = 0,553 \cdot h + 1,935$;

Tab. 1. Średnia ważona (ρ_w) i arytmetyczna (ρ_A) gęstość objętościowa obliczona na podstawie samych danych pomiarowych ($\rho_{w_{ia}}$ i $\rho_{A_{ia}}$) i z uwzględnieniem danych szacowanych ($\rho_{w_{sz}}$ i $\rho_{A_{sz}}$) dla poszczególnych wydzieleni stratygraficznych

Table 1. Weighted (ρ_w) and arithmetic (ρ_A) averages of bulk density based solely on measurement data ($\rho_{w_{ia}}$ and $\rho_{A_{ia}}$) and including a set of estimated data ($\rho_{w_{sz}}$ and $\rho_{A_{sz}}$) for individual stratigraphic intervals

Okres/epoka Period/epoch	ρ_w		ρ_A	
	$\rho_{w_{ia}}$ [g/cm ³]	$\rho_{w_{sz}}$ [g/cm ³]	$\rho_{A_{ia}}$ [g/cm ³]	$\rho_{A_{sz}}$ [g/cm ³]
Q	2,03	2,01	2,02	2,00
K3	2,13	2,14	2,15	2,15
K1	2,29	2,28	2,30	2,28
K	2,12	2,14	2,14	2,14
J3	2,45	2,45	2,44	2,44
J2	2,42	2,41	2,41	2,40
J	2,45	2,44	2,44	2,43
T	2,30	2,35	2,35	2,39
P	2,47	2,60	2,53	2,57
C	2,58	2,58	2,55	2,55
D	2,68	2,68	2,68	2,67
S	2,67	2,66	2,66	2,66
O	2,73	2,73	2,71	2,72
Cm	2,61	2,61	2,63	2,63

- kreda dolna (K1) $\rho = 0,349 \cdot h + 2,023$;
- jura górna (J3) $\rho = 0,225 \cdot h + 2,250$;
- jura środkowa (J2) $\rho = 0,061 \cdot h + 2,340$;
- karbon (C) $\rho = 0,056 \cdot h + 2,487$;
- dewon (D) $\rho = 0,67$.

Równania te wykorzystano do oszacowania gęstości na odcinkach nieopróbowanych. Potrzeba takiego szacowania zaistniała głównie w przypadku utworów kredy i jury.

Tabela 1 zawiera zestawienie gęstości: średnich ważonych ρ_w i średnich arytmetycznych ρ_A dla poszczególnych wydzieleni stratygraficznych. Średnie policzone dla samych danych pomiarowych ($\rho_{w_{ia}}$ i $\rho_{A_{ia}}$), a także z uwzględnieniem wartości szacowanych ($\rho_{w_{sz}}$ i $\rho_{A_{sz}}$). Teoretycznie druga z wartości nie powinna znacznie odbiegać od pierwszej. Tak też jest w przypadku większości wydzieleni. Wyjątkami są średnie uzyskane dla utworów permskich. Gęstości $\rho_{w_{sz}}$ i $\rho_{A_{sz}}$ tych utworów są wyższe od $\rho_{w_{ia}}$ i $\rho_{A_{ia}}$ odpowiednio o 0,03 g/cm³ i 0,04 g/cm³, co jest efektem oszacowania gęstości warstw anhydrytowych (anhydryty charakteryzują się bardzo wysokimi gęstościami).

Znacznie istotniejsze wydaje się przejście od ρ_A , zazwyczaj wykorzystywanej w opracowaniach, do ρ_w . Obliczenie ρ_w jest ważne zwłaszcza w przypadkach nierównomiernego opróbowania, gdy jednocześnie występuje znaczna zmienność badanych serii osadowych. Przykładem zbyt niskiej średniej gęstości obliczonej jako ρ_A jest ρ_A karbonu. Osady karbońskie były często opróbowywane, głównie w celu rozpoznania poziomów węglonośnych. Węgiel charakteryzuje się niską gęstością, dodatkowo jego warstwy mają zazwyczaj niewielką miąższość. To powoduje zaniżenie ρ_A . Uwzględniając miąższości jako wagę, uzyskano ρ_w

wyższą od ρ_A o $0,03 \text{ g/cm}^3$. W modelowaniu grawimetrycznym taka różnica jest dość istotna.

W dalszej części artykułu przedstawiono krótkie charakterystyki wybranych wydziałów stratygraficznych.

Czwartorzęd

Osady czwartorzędu to głównie piaski, lessy i gliny zwałowe, rzadziej ily i torfy. Ze względu na małe miąższości (średnio 26 m) ich udział w tworzeniu większych anomalii grawimetrycznych jest niewielki. Duża zmienność miąższości sprawia natomiast, że są osady te są źródłem anomalii drobnych, o niewielkich amplitudach, wykorzystywanych w badaniu budowy geologicznej tych utworów i ich bezpośredniego podłoża.

Gęstość osadów czwartorzędu rozpoznano w 31 otworach. Jej zmienność z głębokością przedstawiono na rycinie 3A. Gęstość średnia ważona $\rho_{w_{la}}$ wynosi $2,03 \text{ g/cm}^3$, a po uwzględnieniu wartości szacowanych spada do poziomu $\rho_{w_{sz}} = 2,01 \text{ g/cm}^3$. Przy szacowaniu gęstości utworów czwartorzędowych czynnikiem decydującym była informacja litologiczna (czy szacowana jest gęstość ciężkiej gliny czy lekkiego lessu). Czynnikiem głębokościowym miał w tym przypadku znikome znaczenie.

Kreda

Osady kredy górnej występują na całym obszarze Lubelszczyzny. Są to utwory węglanowe od lekkiej, przystropowej, czy wręcz przypowierzchniowej kredy piszącej przez opoki i margle do wapieni. Duże miąższości osadów kredy górnej, a co za tym idzie również liczne dane pomiarowe, zapewniają wiarygodne rozpoznanie tych utworów. Liniowy trend przedstawiony na rycinie 3B wskazuje na wyraźny wzrost gęstości z głębokością. Świadczy o tym również wysoki współczynnik korelacji $K = 0,72$. Gęstość $\rho_{w_{la}}$ ze wszystkich danych pomiarowych to $2,13 \text{ g/cm}^3$, a $\rho_{w_{sz}}$ jest nieznacznie wyższa i wynosi $2,14 \text{ g/cm}^3$.

Kreda dolna wykształcona jest w postaci utworów piaszczysto-ilastych, lokalnie również węglanowych. Niewielka ilość danych dotyczących kredy dolnej, a także małe miąższości utworów tej epoki (średnio 17 m) nie pozwalają na miarodajną charakterystykę gęstościową. Niemniej jednak linia trendu zależności między gęstością a głębokością (ryc. 3C) wskazuje na wzrost gęstości z głębokością. Rozrzut danych jest duży. Utwory K1 są wyraźnie cięższe od K3. Gęstość $\rho_{w_{la}}$ to $2,29 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{w_{sz}}$ jest nieznacznie niższa i wynosi $2,28 \text{ g/cm}^3$.

Gęstość ρ_w dla całej kredy jest zbliżona do średnich wartości dla K3 (K1 ze względu na swoją niedużą miąższość ma niewielki wpływ na średnią) – $\rho_{w_{la}}$ wynosi $2,12 \text{ g/cm}^3$, a $\rho_{w_{sz}}$ jest równa $2,14 \text{ g/cm}^3$. W średnich tych uwzględniono wyniki pomiarów wykonanych na próbkach, których wiek opisany został z dokładnością do okresu (K). Wśród próbek dominują lekkie próbki kredy piszącej, gez i margli, stąd ich średnie gęstości są nawet niższe niż w przypadku samej kredy górnej.

Jura

Utwory jury górnej to przede wszystkim skały węglanowe (wapienie, margle, dolomity), lokalnie z przewar-

stwieniami piaskowców i mułowców. Podobnie jak dla kredy górnej, tak i w przypadku jury górnej duża ilość danych i znaczne miąższości utworów pozwoliły na uzyskanie wyraźnej zależności między gęstością a głębokością (ryc. 3D). Tu również obserwuje się zmniejszanie się rozrzutu danych z głębokością, od największego w strefie przystropowej, na głębokości ok. 0,5 km, do niewielkiego na głębokości powyżej ok. 1,4 km, gdzie dane gęstościowe zbliżają się do wartości nieco powyżej $2,60 \text{ g/cm}^3$. Nachylenie linii trendu jest zdecydowanie mniejsze niż dla K3, na co wskazuje też niższy współczynnik korelacji $K = 0,41$. Gęstość ρ_w wynosi $2,45 \text{ g/cm}^3$, niezależnie od tego, czy do jej obliczenia brano są pod uwagę wartości szacowane, czy nie.

Znacznemu rozrzutowi danych dla jury środkowej (ryc. 3E) towarzyszy niewielki wzrost gęstości z głębokością. Gęstość $\rho_{w_{sz}}$ jest nieco mniejsza niż $\rho_{w_{la}}$ dla J3 i wynosi $2,41 \text{ g/cm}^3$ ($\rho_{w_{la}}$ jest od niej wyższa o $0,01 \text{ g/cm}^3$).

Gęstość ρ_w dla całej jury jest bliska ρ_w dla jury górnej, która ze względu na znacznie większą miąższość dominuje nad J2 i J1.

Karbon

Utwory karbonu potraktowano całościowo, czego powodem jest podobna litologia karbonu górnego i dolnego, a także częsty brak w dokumentacjach źródłowych dokładnego podziału stratygraficznego. Charakterystyka gęstościowa oparta jest na wynikach bardzo dużej liczby pomiarów. Na rycinie 3F widoczny jest przede wszystkim duży rozrzut danych, co wynika z występowania zarówno lekkich węgli kamiennych (nawet $1,3 \text{ g/cm}^3$), jak i ciężkich łupków pirytowych i syderytu (do $3,3 \text{ g/cm}^3$) czy diabazów. Ze względu na stosunkowo małe miąższości węgli ich wpływ na gęstość średnią osadów karbońskich jest niewielki. Znacznie większy wpływ mają utwory ciężkie. Średnia miąższości 67 „ciężkich wydziałów” to aż 1,3 km. Duże miąższości spowodowały znaczny wzrost ρ_w w stosunku do ρ_A (odpowiednio $2,58 \text{ g/cm}^3$ i $2,55 \text{ g/cm}^3$) stosowanej w dotychczasowych opracowaniach.

Dewon

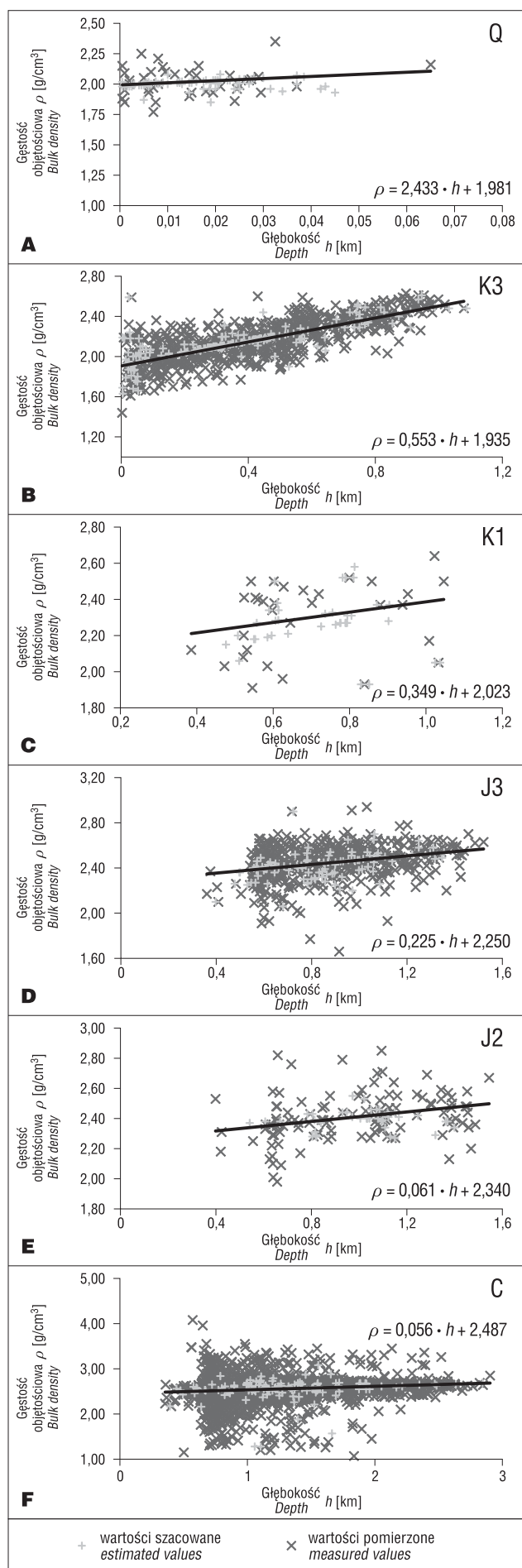
Dewon wykształcony jest w postaci skał piaszczysto-ilastych (piaskowce, mułowce, ilowce), a także węglanowych (wapienie, dolomity). Dla utworów tego okresu charakterystyczny jest brak zależności między gęstością a głębokością. Gęstość ρ_w utworów dewońskich (zarówno $\rho_{w_{la}}$, jak i $\rho_{w_{sz}}$) wynosi $2,68 \text{ g/cm}^3$.

Starszy paleozoik

Rozpoznanie gęstościowe starszego paleozoiku jest dość zróżnicowane. Stosunkowo dużo jest danych dotyczących syluru i kambru, bardzo mało dotyczących ordowiku.

Utwory syluru nawiercono w 19 otworach, głównie na wyniesieniu podlasko-lubelskim. Dominują tu skały ilaste (ilowce, mułowce), rzadziej występują skały węglanowe lub piaskowcowe. Stwierdzono brak zależności między gęstością a głębokością. Gęstość $\rho_{w_{la}}$ wynosi $2,67 \text{ g/cm}^3$.

Utwory ordowiku nawiercono w tych samych otworach, w których występowały osady syluru. Wykształcone



są w postaci skał ilastych i węglanowych. Mała ilość dostępnych danych nie pozwala na wyznaczenie równania trendu. Na ich podstawie można jedynie uznać, że zmienność gęstości w funkcji głębokości jest niewielka. Gęstość ρ_w wynosi $2,73 \text{ g/cm}^3$.

Kambr reprezentowany jest przez łupki ilaste, mułowce, piaskowce, a także kwarcyty i zieleńce. Dane pochodzą z 15 otworów na wyniesieniu podlasko-lubelskim. Odnotowano niewielki wzrost gęstości z głębokością. Gęstość ρ_w wynosi $2,61 \text{ g/cm}^3$.

MAPY GĘSTOŚCI OBJĘTOŚCIOWEJ

Opracowanie na nowo bazy danych gęstościowych, z zastosowaniem metodyki opisanej w poprzednich rozdziałach, umożliwiło skonstruowanie map gęstości dowolnie wybranego wydzielenia stratygraficznego czy też dowolnie wybranego poziomu głębokościowego. Są to oczywiście jedynie mapy poglądowe, ponieważ sporządzono je tylko na podstawie otworów zaznaczonych na rycinie 1. W szczegółowej analizie konieczne byłoby uwzględnienie licznych pozostałych otworów, dla których możliwe jest oszacowanie profilu gęstościowego, czy też danych sejsmicznych.

Z punktu widzenia nie tylko badań grawimetrycznych, lecz także badań sejsmicznych informację bardziej istotną od gęstości samej w sobie daje prześledzenie powierzchni kontaktu warstw o znacznym kontraście gęstościowym (tj. $> 0,1 \text{ g/cm}^3$). Ich morfologia i głębokość odzwierciedlają się wyraźnie na obrazie anomalii. Wielkość kontrastu w danym otworze odpowiada różnicy między średnimi gęstościami sąsiednich jednostek stratygraficznych. Trzeba jednak pamiętać, że rzeczywista wielkość kontrastu, czyli różnica gęstości na jego powierzchni, może być mniejsza od wyznaczonej na podstawie średnich gęstości utworów danej jednostki lub kompleksu ze względu na wzrost gęstości z głębokością. Głównymi powierzchniami kontrastów na opisywanym obszarze są spągi kredy, jury i karbonu.

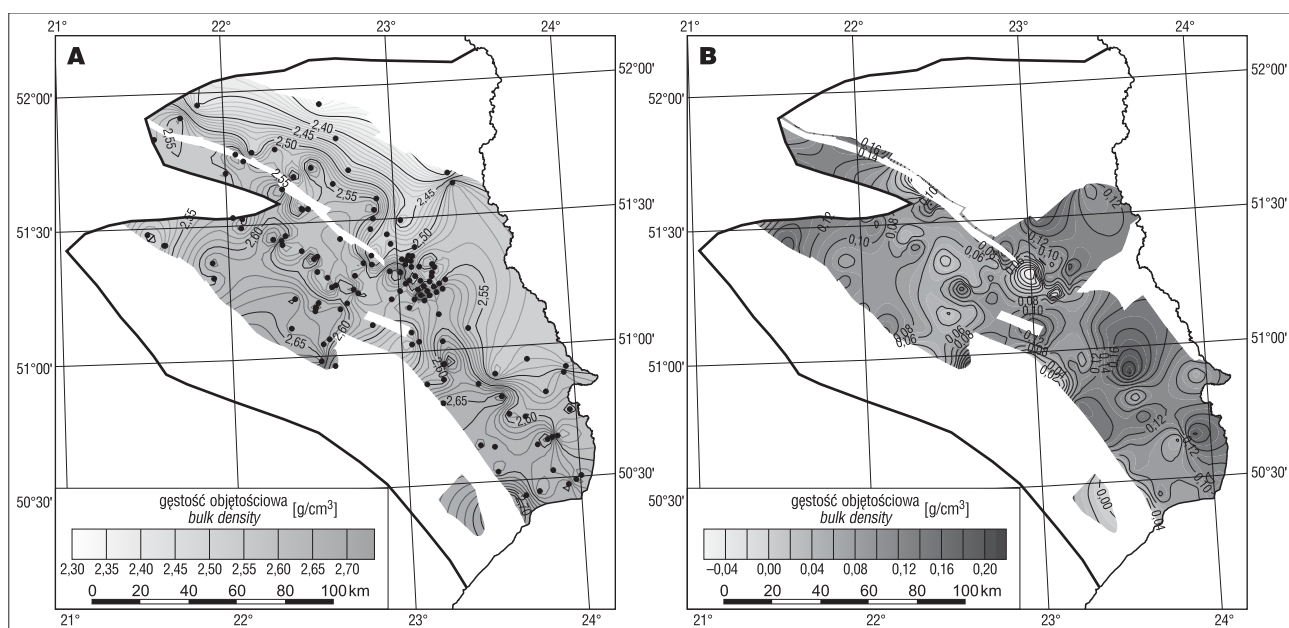
W celach ilustracyjnych przedstawiono dwie mapy gęstości głównych kompleksów: karbonu i kredy (ryc. 4A i 5A), dwie mapy powierzchni głównych kontrastów: między utworami karbonu i dewonu (ryc. 4B) oraz między utworami kredy i jury (ryc. 5B), a także dwie mapy ścięcia na głębokościach 500 m p.p.m. i 1500 m p.p.m. (ryc. 6A, B).

Zasięgi występowania utworów kredy i karbonu wyznaczono na podstawie „Atlasu geologicznego Polski” (Znosko, 1968). Na rycinach 4 i 5 czarnymi punktami oznaczono lokalizację otworów badawczych, z których pochodzą rdzenie wykorzystane do pomiarów gęstości utworów danego wieku. Zagęszczenie otworów jest nierównomierne, co utrudniało dobranie odpowiednich parametrów siatek interpolacyjnych. Mimo to **podczas analizy map należy mieć na uwadze, czy dana anomalia powstała na podstawie danych z otworu, czy jest efektem ekstrapolacji.**

Szczególnie istotne byłoby dodanie do mapy lineamentów tektonicznych. Jak wiadomo, tektonika w tym rejonie

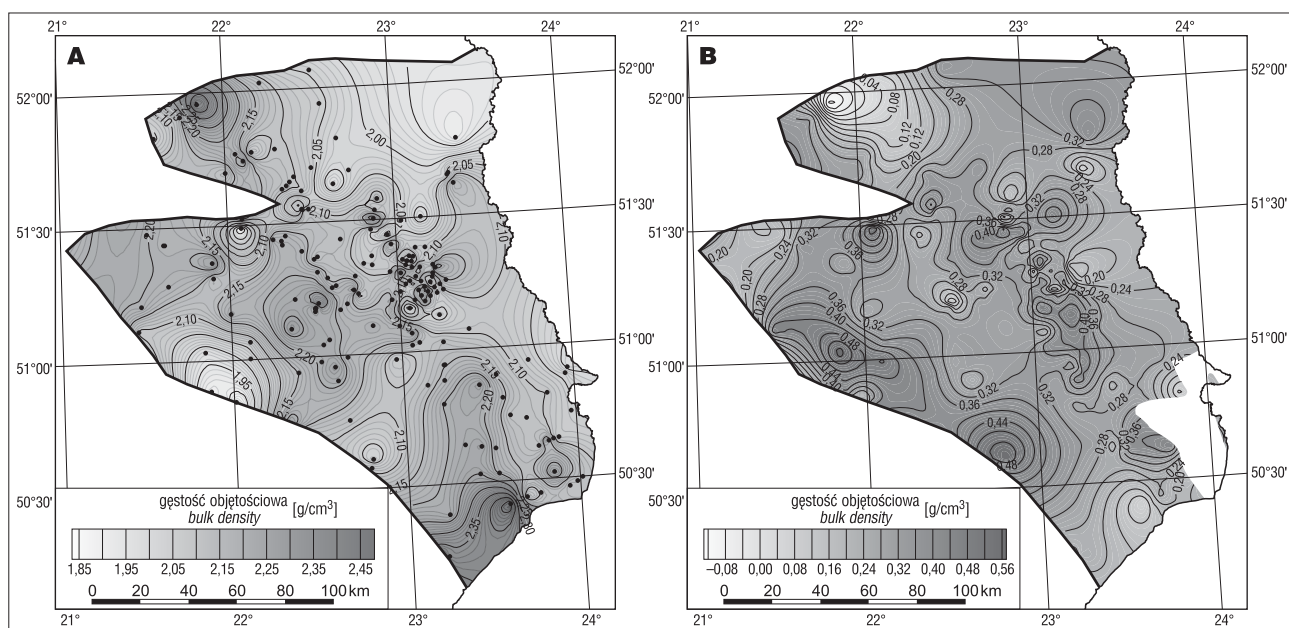
Ryc. 3. Zmienność gęstości objętościowej wraz z głębokością dla poszczególnych wydzieleni stratygraficznych

Fig. 3. Changes in the bulk density versus depth for individual stratigraphic intervals



Ryc. 4. A – mapa średniej gęstości objętościowej utworów karbonu, **B** – mapa kontrastu gęstościowego między utworami karbonu i dewonu. Zasięg występowania utworów na podstawie map z „Atlasu geologicznego Polski” (Znosko, 1968)

Fig. 4. A – map of average bulk density of Carboniferous deposits, **B** – map of density contrast between Carboniferous and Devonian deposits. Borders of occurrence of the deposits based on maps in "Atlas geologiczny Polski" (Znosko, 1968)

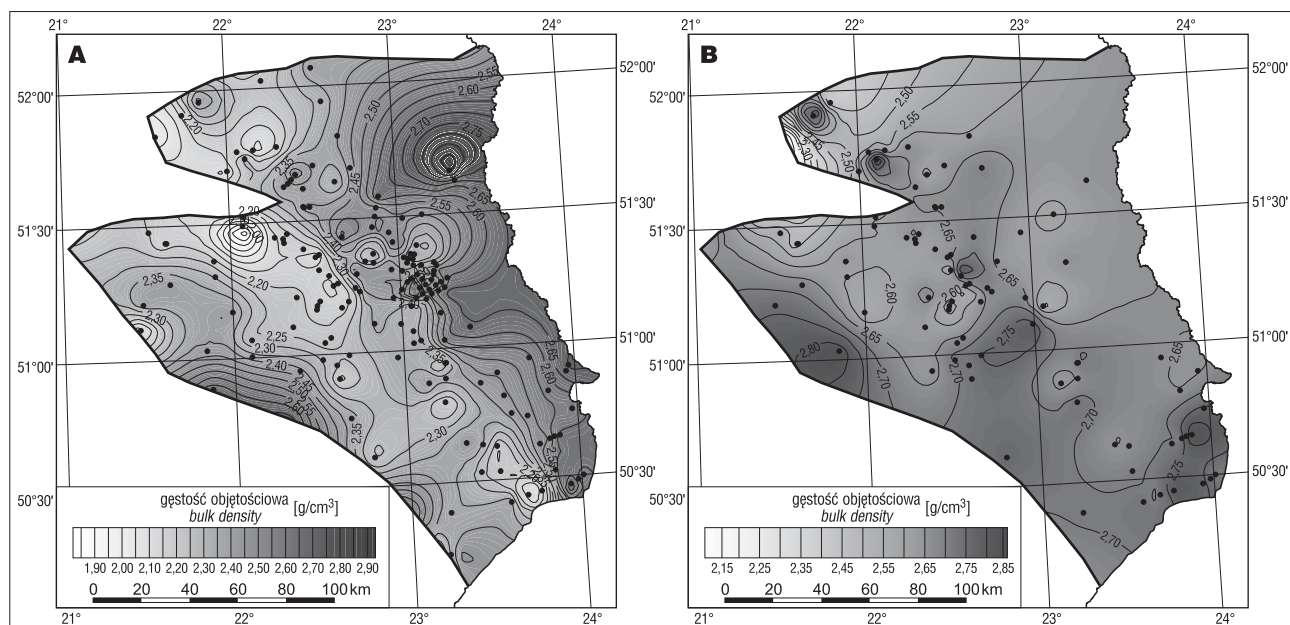


Ryc. 5. A – mapa średniej gęstości objętościowej utworów kredy, **B** – mapa kontrastu gęstościowego między utworami kredy i jury. Zasięg występowania utworów na podstawie map z „Atlasu geologicznego Polski” (Znosko, 1968)

Fig. 5. A – map of average bulk density of Cretaceous deposits, **B** – map of density contrast between Cretaceous and Jurassic deposits. Borders of occurrence of the deposits based on maps in "Atlas geologiczny Polski" (Znosko, 1968)

jest bardzo urozmaicona. Tworzenie siatki interpolacyjnej bez uwzględnienia przebiegu uskoku, których zrzuty są niekiedy bardzo duże, może prowadzić do znacznych zniekształceń prawdziwego rozkładu gęstości na danej głębokości. I tak w przypadku mapy ścienia na głębokości 500 m p.p.m. już na pierwszy rzut oka można rozróżnić dwie strefy: południowo-zachodnią o niskich gęstościach i północno-wschodnią o gęstościach względnie wyższych. Niskie gęstości w pierwszej strefie odpowiadają utworom kredy, a wyższe w drugiej – utworom karbonu i syluru (otwór Kaplonosy IG1 w północno-wschodniej części obszaru).

Inaczej wygląda rozkład gęstości objętościowej na mapie ścienia na głębokości 1500 m p.p.m. Z wyjątkiem północnego fragmentu, gdzie na tej głębokości obecne są skały podłoża krystalicznego, obszar zdominowany jest przez utwory dewonu. Zróżnicowanie gęstościowe skał dewonu jest spowodowane ich zróżnicowaniem litologicznym. Niższymi gęstościami w północno-wschodniej części występowania dewonu charakteryzują się piaskowce i mułowce (m.in. otwory Busówno IG1, Krowie Bagno IG1), a wyższe gęstości są typowe dla wapieni i dolomitów w zachodniej i południowej części obszaru (m.in. otwory Zakrzew IG1, Terebin IG1, Niesiołowice IG1).



Ryc. 6. Mapa gęstości objętościowej na głębokości: **A** – 500 m p.p.m., **B** – 1500 m p.p.m.
 Fig. 6. Map of bulk density at the following depths: **A** – 500 m b.s.l., **B** – 1500 m b.s.l.

PODSUMOWANIE

Zalety zastosowanej metodyki:

- uwzględnienie wpływu głębokości na zmianę gęstości dzięki wyznaczeniu równań trendów głębokościowych;
- uwzględnienie miąższości poszczególnych interwałów głębokościowych jako wagi przy obliczaniu średniej gęstości;
- oszacowanie gęstości wielu poziomów litologicznych, dla których nie wykonano wcześniej żadnych oznaczeń gęstości;

– możliwość oszacowania gęstości utworów w otworach, dla których nie wykonano żadnych pomiarów.

Wady zastosowanej metodyki:

- w przypadku wydzielenia stratygraficznego o znacznym zróżnicowaniu litologicznym trendy głębokościowe powinny być obliczane dla poszczególnych cząstkowych wydzieleni litologicznych – niejednokrotnie jest to jednak niemożliwe ze względu na zbyt małą liczbę próbek z danego wydzielenia;

– zbyt mała liczba opracowanych otworów i nierównomierne ich rozmieszczenie na potrzeby opracowania szczegółowych map rozkładu gęstości;

– do prac wykorzystano opisy stratygrafii zamieszczone w dokumentacjach źródłowych pomiarów parametrów petrofizycznych (obecnie możliwe jest przeprowadzenie korekt na podstawie zaktualizowanych profili stratygraficznych wprowadzonych do Centralnej Bazy Danych Geologicznych).

Prace do wykonania w przyszłości:

- oszacowanie gęstości w głębokich otworach, dla których nie wykonano żadnych pomiarów gęstości;
- skalibrowanie wyników laboratoryjnych pomiarów gęstości z wynikami pomiarów karotażowych;
- wprowadzenie do modelu (map) lineamentów tektonicznych i powierzchni spągowych wydzieleni stratygraficznych na podstawie interpretacji badań sejsmicznych.

Praca została wykonana w ramach projektu „Opracowanie modelu rozkładu gęstości głównych jednostek geologicznych kraju” realizowanego w latach 2008–2011 i finansowanego przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej na podstawie umowy 233/2008/Wn-07/FG-bp-tx/D. Autorzy dziękują Januszowi Madejowi za cenne uwagi, które przyczyniły się do nadania pracy ostatecznej formy.

LITERATURA

- BRONOWSKA E. 1980 – Zestawienie i analiza gęstości i porowatości skał na obszarze synklinorium lubelskiego. *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB*, Warszawa, s. 28.
- FRANCIK K. 1997 – Bank danych petrofizycznych z obszaru Polski jako element Krajowej Bazy Danych Geologicznych. *Biblioteka PBG*, Warszawa.
- GRABOWSKA T. 1978 – Korelacja anomalii grawimetrycznych i magnetycznych z budową geologiczną centralnej części obszaru lubelskiego. *Zesz. Nauk. AGH, Geologia*, 26: 1–62.
- GRABOWSKA T. & MAŁOSZEWSKI S. 1990 – The role of gravimetric method in recognition of the Carboniferous roof with the example of the Lublin Coal Basin (LCB). [W:] *Proceedings 35th International Geophysical Symposium. Federation of the Scientific-Technical Unions in Bulgaria, Specialized Scientific-Technical Union of Mining Geology and Metallurgy, Committee of Geology, Sofia, Varna*: 412–421.
- GRABOWSKA T., MAŁOSZEWSKI S., DOLNICKI J. & RACZYŃSKA M. 1991 – Platformowa część Lubelskiego Zagłębia Węglowego w świetle szczegółowych badań grawimetrycznych. [W:] *Materiały III Krajowej Konferencji pn. „Zastosowanie metod geofizycznych w górnictwie kopalni stałych”*, t.1. *Wyd. AGH, Kraków*: 173–192.
- GRABOWSKA T. & PERCHUĆ E. 1985 – Gravimetric-seismic model of the Earth’s crust in the region of south-eastern Poland. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.*, 175(A-16): 43–56.
- POŻARYSKI W. 1969 – Podział obszaru Polski na jednostki tektoniczne. *Prz. Geol.*, 17: 57–64.
- ROSOWIECKA O., KRÓLIKOWSKI C., SOBIEN K., GOŁĘBIEWSKI M. & LISOWSKI K. 2011 – Opracowanie modelu rozkładu gęstości głównych jednostek geologicznych kraju. *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB*, Warszawa, s. 39.
- ZNOSKO J. (red.) 1968 – *Atlas geologiczny Polski 1 : 2 000 000*. *Inst. Geol.*, Warszawa.
- ŻELĄZNIEWICZ A., ALEKSANDROWSKI P., BUŁA Z., KARNKOWSKI P.H., KONON A., OSZCZYPKO N., ŚLĄCZKA A., ŻABA J. & ŻYTKO K. 2011 – *Regionalizacja tektoniczna Polski*. *Kom. Nauk Geol. PAN, Wrocław*, s. 60.

Praca wpłynęła do redakcji 17.10.2013 r.
 Akceptowano do druku 17.01.2014 r.