

CZESŁAW KRÓLIKOWSKI

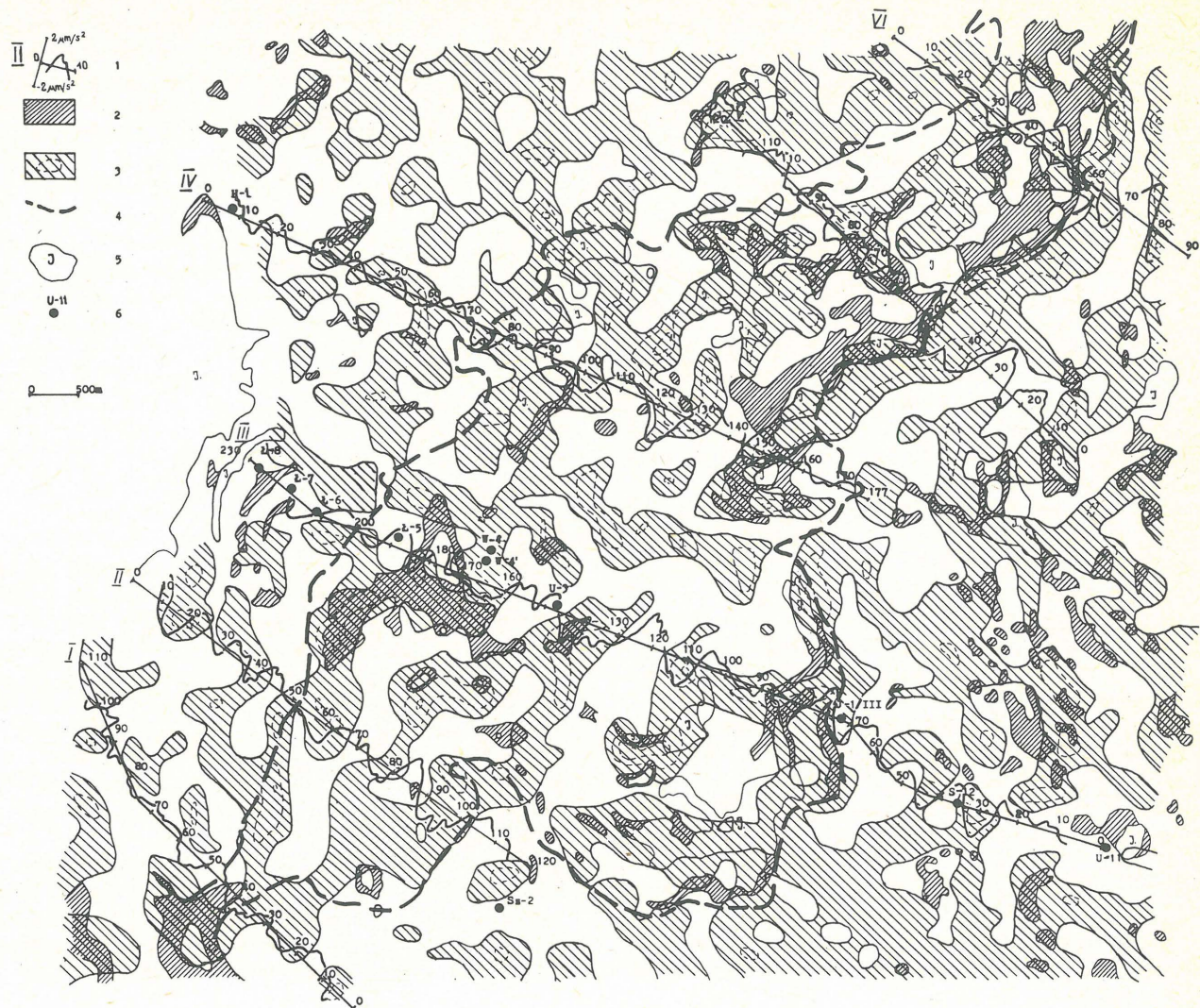
Instytut Geologiczny

**ZASTOSOWANIE METODY GRAWIMETRYCZNEJ
DO BADANIA BUDOWY UTWORÓW CZWARTORZĘDOWYCH
NA OBSZARZE ZAGŁĘBIENIA SZESZUPY NA SUWALSZCZYŹNIE**

UKD 550.831.015:550.837.311:551.79.022.4]:550.822.2(438 — 35 suwalskie zagłębienie Szeszupy)

Analiza wyników pomiarów gęstości utworów czwartorzędowych wskazała znaczne zróżnicowanie wartości tego parametru. Z kolei mapy grawimetryczne wykazały w wielu rejonach zmiany pola siły ciężkości o wysokiej częstotliwości. Fakty te uzasadniały przypuszczenia, że źródłem tych zmian może być budowa osadów czwartorzędowych. W związku z tym Instytut Geologiczny zainicjował przeprowadzenie badań doświadczalnych na obszarze zagłębienia Szeszupy, gdzie od pewnego czasu

hydrogeolodzy rozwiązują zagadnienia odnawialności wód podziemnych dla potrzeb przyszłego górnictwa rud żelaza. Zadaniem dla metody grawimetrycznej zastosowanej jednocześnie z profilowaniem elektrooporowym było więc zlokalizowanie i wydzielenie większych kompleksów utworów piaszczysto-żwirowych spośród utworów nieprzepuszczalnych, szczególnie serii glin zwałowych wzdłuż zaprojektowanych profilów.



Ryc. 1. Mapa torfów i namulów torfiastych na tle ujemnych anomalii resztkowych.

Fig. 1. Map of peats and peat muds at the background of negative residual anomalies.

1 – profil geofizyczny II z numerami punktów pomiarowych i kładem anomalii resztkowej przy promieniu uśrednienia 280 m, 2 – torfy i namuły, 3 – ujemne anomalie resztkowe z izoliniami, 4 – granice zagłębienia Szyszupy, 5 – jezioro, 6 – otwór wiertniczy.

1 – geophysical section II, numbers of measurement points and projection of residual anomaly, made using 280 m radius of average, 2 – peats and muds, 3 – negative residual anomalies and their isolines, 4 – boundaries of Szyszupa basin, 5 – lake, 6 – borehole.

ZARYS BUDOWY GEOLOGICZNEJ CZWARTORZĘDU

Obszar zwany zagłębieniem Szyszupy o powierzchni ok. 50 km², rozciąga się na N od Suwałk. Różnica wysokości między dnem zagłębienia a poziomem otaczających wysoczyzn lodowcowych wynosi 40–90 m. O ile wysoczyzny są mało zróżnicowane pod względem wysokości, o tyle dno zagłębienia charakteryzuje się bardzo urozmaiconą morfologią. Podłoże czwartorzędu (1, 2) stanowią opoki, margle i wapień kredy górnej, opoki i gezy paleocenu oraz piaski i piaskowce glaukonitowe oligocenu. Miąższość osadów czwartorzędu zmienia się od 140 do 280 m.

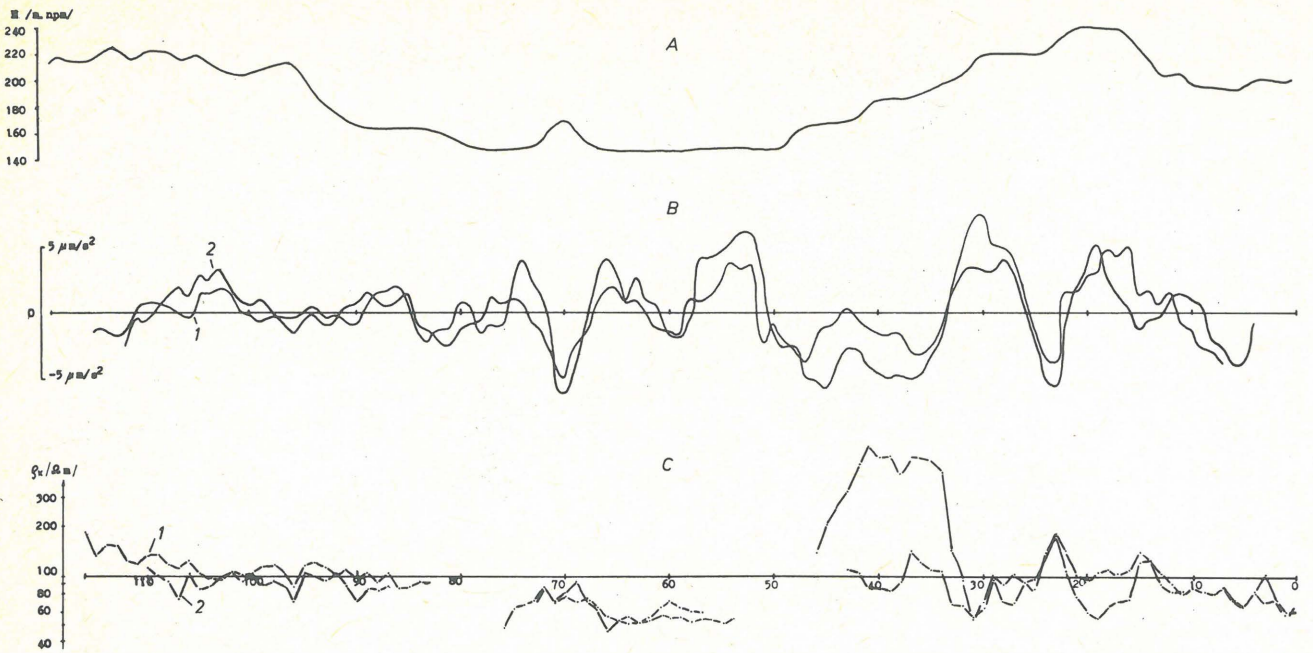
Najstarszymi utworami czwartorzędu są gliny zwałowe i ility zastoiskowe zlodowacenia południowopolskiego. Zlodowacenie środkowopolskie rozpoczyna się grubą serią zastoiskową, na której leżą piaski wodnolodowcowe oraz gliny i ility zastoiskowe (stadium maksymalne). Stadium mazowiecko-podlaskie zaznaczył się dwoma poziomami piasków i żwirów wodnolodowcowych, przedzielonych serią zastoiskową. Miąższość tych osadów zmienia się od 15 do

50 m. Omówione utwory przykrywa glina zwałowa, lokalnie przedzielona żwirami, należąca do dwóch stadiów, mazowiecko-podlaskiego i północnomazowieckiego. Miąższość tych glin wynosi od 12 do 104 m. Gliny te są zaburzone glitektonicznie i erozyjnie porożcinane. Ukazują się na powierzchni terenu.

Interglacjał eemski zaznaczył się silną erozją i akumulacją materiału drobnopiaszczystego w rynnach erozyjnych. Zlodowacenie północnopolskie tworzą osady trzech faz, których gliny zwałowe są poprzedzielane osadami wodnolodowcowymi. Miąższości ich dochodzą do 80 m. Osady te są silnie zaburzone glitektonicznie i tworzą współczesną rzeźbę terenu.

METODYKA I ZAKRES WYKONANYCH BADAŃ

Pomiary grawimetryczne i geoelektryczne wzdłuż sześciu profili (ryc. 1), tnących zagłębienie Szyszupy wykonało Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych. Odległość między punktami pomiarowymi na profilach wynosiła 40 m. Dwupoziomowe profilowanie elektryczne wykonano przy



Ryc. 2. Wyniki pomiarów geofizycznych wzdłuż profilu V.

Fig. 2. Results of geophysical measurements along the profile V.

A – morfologia terenu, B – anomalie resztkowe (krzywe 1 i 2 dla promieni uśrednienia 140 i 280 m odpowiednio), C – oporność elektryczna z profilowania elektrycznego przy rozstawach 300 m (krzywa 1) i 600 m (krzywa 2).

A – terrain morphology, B – residual anomalies (curves 1 and 2 for radius of average equal 140 and 280 m, respectively), C – electric resistance measured by profiling with the use of spacings equal 300 m (curve 1) and 600 m (curve 2).

Tabela I

Otwór	Piaski i żwiry			Gliny zwałowe			
	h/m	N	$\sigma_o(\frac{Mg}{m^3})^*$	h/m	N	$\sigma_o(\frac{Mg}{m^3})$	$\bar{\sigma}_o(\frac{Mg}{m^3})$
Udryń IG-1	232	33	2,09	18	9	2,31	2,17
Udryń IG-2	28	—	—	129	7	2,20	2,08
Jez. Okrągłe	140	2	2,15	—	—	—	—
Jeleniewo	123	6	1,93	117	3	2,26	2,15
Krzemianka 11	166	19	2,10	43	6	2,24	2,14
Żubryn	97	3	2,05	45	2	2,11	2,02
średnie			2,06			2,24	2,11

Symbole w tabeli oznaczają:

h – sumaryczna miąższość danego otworu, N – ilość pomiarów, σ_o – gęstość objętościowa przeliczona na pełne nasycenie wg wzoru:

$$\sigma_o = \sigma_{zm} + (1 - \frac{\sigma_{zm}}{\sigma}) \dots \quad [3]$$

$$* \frac{Mg}{m^3} = \frac{g}{cm^3}$$

W ostatniej kolumnie podano gęstość po uwzględnieniu skurczliwości i wilgotności w stanie powietrznosuchym, wyznaczone laboratoryjnie.

rozstawach elektrod prądowych równych 300 i 600 m. Wyniki tych pomiarów opracowali, w formie dokumentacji, M. Grycko i B. Margul. Jako przykład na ryc. 2 podano wyniki pomiarów na profilu V. Poza anomalią Bouguera obliczono anomalie resztkowe siły ciężkości.

W dalszej analizie materiałów geofizycznych i geologicznych prowadzonej w Instytucie Geologicznym wykorzystano:

– zdjęcia lotnicze i materiały kartograficzne, w wyniku czego powstała mapa fotogeologiczna, opracowana przez B. Daniel-Danielską;

Tabela II

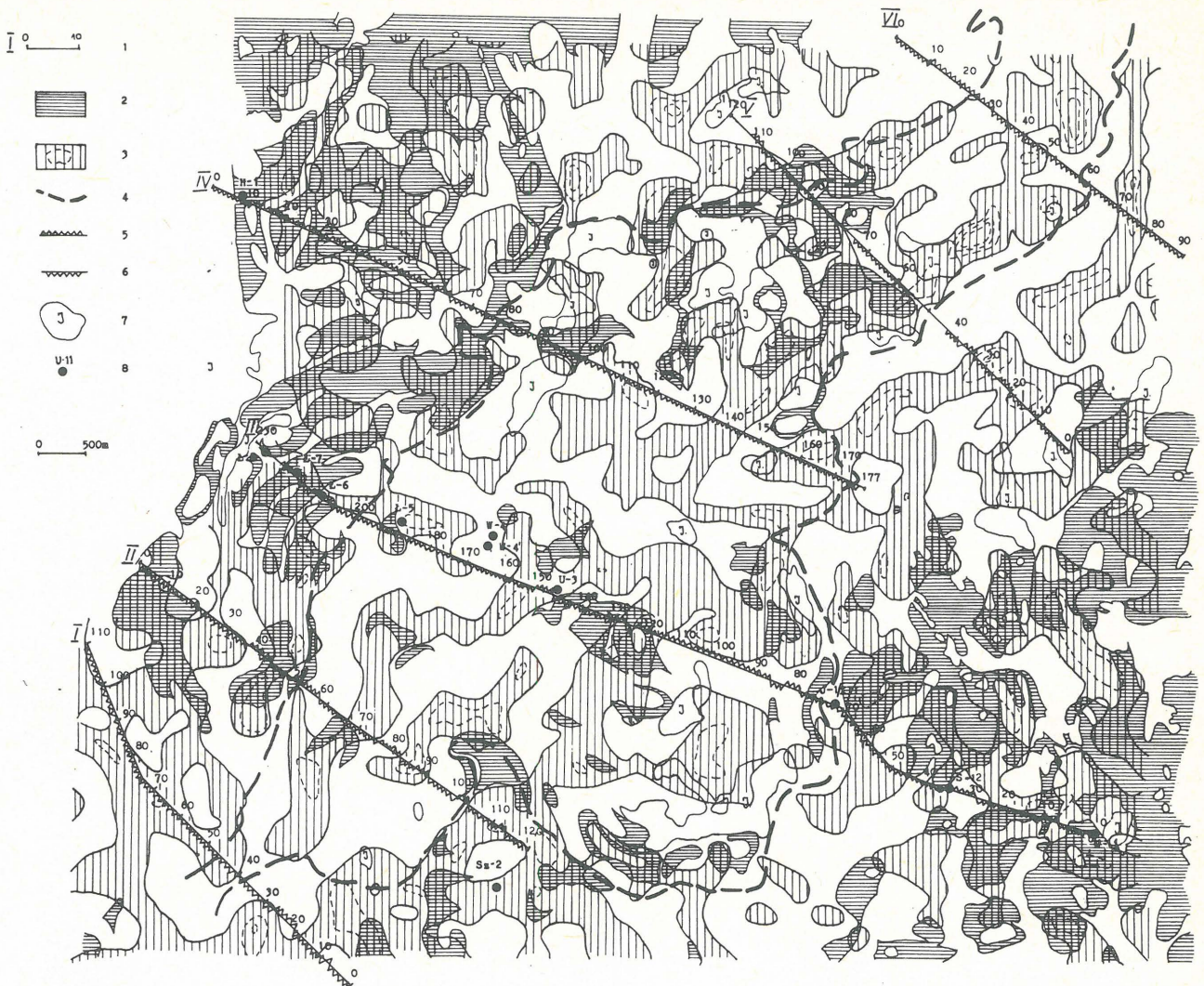
Piaski i żwiry		Gliny zwałowe	
h/m	$\sigma_o(Mg/m^3)$	h/m	$\sigma_o(Mg/m^3)$
101	2,20	136	2,38

- półszczegółowe zdjęcia grawimetryczne tego obszaru, wykonane dla celów złożowych w siatce o bokach 200 m;
- wyniki sondowań geoelektrycznych wykonanych na tym obszarze w ubiegłych latach, w odstępach średnio co 1,3 km;
- pomiary gęstości próbek z odkrywek tego rejonu, wykonane w Instytucie Geologicznym, oraz wyniki pomiarów geofizycznych w otworze wiertniczym Sidorówka 1/III.

GĘSTOŚCI UTWORÓW CZWARTORZĘDOWYCH SUWALSKIEGO OBSZARU WYSTĘPOWANIA RUD ŻELAZA

Charakterystyki gęstości określono na podstawie danych pochodzących z trzech źródeł. Pierwsze źródło to materiały archiwalne laboratoryjnych pomiarów gęstości wykonanych przez Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych. Drugie źródło stanowią wyniki profilowania geofizycznego w otworze wiertniczym i trzecie to specjalnie zaprojektowane pomiary gęstości wykonane w laboratorium Zakładu Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej IG.

Dane archiwalne, dotyczące gęstości utworów czwartorzędowych, pochodzą z 6 otworów wiertniczych. Pomiary wykonywano w latach 1964 – 1969 z zastosowaniem metodyki opisanej we wcześniejszej pracy autora (3). Ponieważ wykonywano je na próbkach powietrzno-suchych i przy nasy-



Ryc. 3. Mapa glin zwałowych na tle dodatnich anomalii resztkowych.

Fig. 3. Map of tills at the background of positive gravity anomalies.

1 – profil geofizyczny z numerami punktów pomiarowych, 2 – wychodnie glin zwałowych, 3 – dodatnie anomalie resztkowe z izoliniami, 4 – granice zagłębienia Szeszupy, 5 – odcinki profilu o oporności większej od 100 Ω m przy rozstawie 600 m, 6 – j.w. o oporności mniejszej od 100 Ω m, 7 – jezioro, 8 – otwór wiertniczy.

1 – geophysical profile and numbers of measurement points, 2 – outcrops of tills, 3 – positive residual anomalies and their isolines, 4 – boundaries of Szeszupa basin, 5 – profile sections with resistance over 100 Ω (600 m spacing), 6 – as above, with resistance below 100 Ω , 7 – lake, 8 – borehole.

ceniu wodą w ciśnieniu atmosferycznym wprowadzono korekty danych, przeliczając je na pełne nasycenie. Uczyniono również próbę uwzględnienia wpływu skurczliwości przy wysychaniu próbek utworów spoistych. Sposób przeliczenia gęstości do stanu pełnego nasycenia podano w cytowanej wyżej pracy. Natomiast uwzględnienia wpływu skurczliwości dokonano wg wzoru:

$$\sigma_s = \sigma_{zm}(1-S)(1+W_{ps})^{-1} \quad [1]$$

$$\bar{\sigma}_o = \sigma_s + (1-\sigma_s/\sigma), \quad [2]$$

gdzie: σ_s – gęstość szkieletu, σ_{zm} – gęstość próbki zmierzona w stanie powietrznosuchym, S – skurczliwość objętościowa, W_{ps} – wilgotność próbki w stanie powietrznosuchym, $\bar{\sigma}_o$ – gęstość objętościowa, σ – gęstość właściwa.

Skurczliwość i wilgotność określono laboratoryjnie w Instytucie Geologicznym. Tak skorygowane pomiary gęstości w rozbiciu na główne grupy litologiczne podano w tabeli I.

Profilowanie gamma-gamma gęstościowe wykonano w otworze Sidorówka 1/III. Średnie wartości gęstości na odcinku poniżej zwierciadła wody podaje tabela II.

Ponadto przeprowadzono pomiary różnych parametrów fizycznych próbek glin zwałowych pobranych z szybków i z dna płytkich otworów, w trzech miejscowościach tego obszaru. Wyniki tych badań podaje tabela III. Pobierano próbki o nienaruszonej strukturze z zabezpieczeniem przed wysychaniem. Z wyjątkiem poz. 3, są to typowe gliny zwałowe o zawartości frakcji ilowej w przedziale 10–20%. Ich średnia gęstość wynosi 2,25 Mg/m³ (kolumna 6), przy średniej wilgotności naturalnej ok. 12%.

Po kilkunastodniowym okresie suszenia w warunkach pokojowych zmierzono ponownie wilgotność i gęstość, które podają kolumny 7 i 8. Jednocześnie mierzona była objętość próbek, co umożliwiło określenie skurczliwości glin: wynosi ona średnio 6,6% (kolumna 10). Ponadto oznaczono gęstość właściwą glin, która jest prawie stała i wynosi 2,68 Mg/m³ (kolumna 9).

Porównując gęstości glin zwałowych i utworów piaszczysto-zwirowych zmierzone różnymi metodami (tabele I–II) można stwierdzić, że:

Nr	Miejscowość	Głęb.	Ilość próbek	Wilgot. natur.	Gęstość objęt.	Wilgot. pow. sucha	Gęstość pow. sucha	Gęstość właściwa	Skurczliwość	F r a k c j a				Rodzaj utworu
										żwirowa	piaskowa	pyłowa	iłowa	
		m		%	Mg/m ³	%	Mg/m ³	Mg/m ³	%	%	%	%		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Udryń	1,5	4	15,05	2,10	1,82	2,05	2,68	9,4	1	47	40	12	gлина
2	Udryń	2,5	4	9,11	2,26	1,08	2,19	2,68	4,4	2	47	38	13	gлина
3*	Udryń	1,0	3	21,91	2,01	3,72	1,91	2,70	10,4	—	3	74	23	gлина pyłasta zwięzła
4	Rowele	3,5	4	11,52	2,28	0,95	2,23	2,67	7,2	4	52	32	12	gлина
5	Rowele	4,5	4	9,33	2,33	0,82	2,25	2,68	4,3	3	49	36	12	gлина
6	Wizajny	4,0	4	12,94	2,22	1,27	2,18	—	8,5	—	—	—	—	—
7	Wizajny	3,5	4	10,30	2,28	1,09	2,22	2,68	4,8	2	50	33	15	gлина
8	Wizajny	2,5	4	12,54	2,24	1,24	2,17	2,68	7,2	2	46	36	16	gлина
9	Wizajny	3,5	4	12,43	2,24	1,34	2,19	—	7,5	—	—	—	—	—
10	Wizajny	2,0	4	12,37	2,22	1,54	2,16	2,68	7,2	1	46	37	16	gлина
11	Wizajny	2,5	3	11,53	2,25	1,19	2,16	—	5,5	—	—	—	—	—
12	Wizajny	3,0	4	12,49	2,25	1,39	2,16	—	6,6	—	—	—	—	—
			43*	11,78	2,25	1,25	2,18	2,68	6,6	2	48	36	14	

* Pozycji 3 nie uwzględniono przy wyliczaniu średnich ze względu na inny rodzaj utworu.

— gęstość glin wynosi ok. 2,25 Mg/m³; wartość gęstości uzyskana w profilowaniu gamma-gamma wynosi wprawdzie 2,38 Mg/m³, ale wynika to z niewłaściwej krzywej cechowania sondy, co zawyża wyniki we wszystkich pomiarach w osadach kenozoicznych; można natomiast uznać za wystarczająco dokładną różnicę między gęstością glin i piasków, która wynosi tu 0,18 Mg/m³;

— gęstość utworów piaszczysto-żwirowych wynosi średnio 2,06 Mg/m³ (tab. I); tę wartość potwierdzałby wynik karotażu gdyby uwzględniono różnice 0,18 Mg/m³ wobec gęstości glin równej 2,25 Mg/m³ (a nie 2,38).

Sprawą dyskusyjną pozostaje wpływ skurczliwości glin. Przyjmując, że pomiary archiwalne (tab. I) dotyczyły próbek powietrznosuchych, a więc takich, które uległy skurczeniu w stosunku do próbki w warunkach naturalnych, należałoby uwzględnić wpływ skurczliwości na gęstość objętościową. Jeśliby przyjąć $S = 6,6\%$, jak to uzyskano w pomiarach laboratoryjnych, to otrzymałoby się średnią gęstość glin 2,11 Mg/m³ (tab. I). To z kolei nie zgadza się z wynikiem dokładnych pomiarów laboratoryjnych, dotyczących glin zalegających przy powierzchni, które byłyby znacznie cięższe od tych pochodzących z większych głębokości, jak również z raczej pewnym kontrastem gęstości między glinami i piaskami. Ponieważ, jak wykazują badania, skurczliwość zależy od wilgotności naturalnej i zawartości frakcji iłowej, należałoby wnioskować, że gliny zwałowe na większych głębokościach byłyby bardziej zwarte (o mniejszej wilgotności) i bardziej piaszczyste, a to zredukowałoby skurczliwość do minimum. Dla celów niniejszych badań najważniejsza jest różnica gęstości glin zwałowych i utworów piaszczysto-żwirowych, która wynosi ok. 0,18 Mg/m³, co wydaje się być faktem. Byłoby to podstawą do wykorzystania grawimetrii w badaniu litologicznego zróżnicowania czwartorzędu. Ten kontrast głębokościowy w utworach czwartorzędu może się znacznie zwiększyć w strefie aeracji.

Odwodnienie utworów przepuszczalnych przy na ogół spotykanym nasyceniu ok. 20% zmniejsza gęstość do 1,70–1,80 Mg/m³. Tymczasem, jak wykazały pomiary próbek glin pobranych z głębokości 1,50–4,50 m (tab. III) ich stopień nasycenia wynosił średnio 94%. Można zatem oczekiwać w tej strefie kontrastu gęstości rzędu 0,30–0,40 Mg/m³.

Brak jest danych o gęstości iłów i mułków zastoiskowych w tym rejonie. Rezultaty pomiarów na innych obszarach wskazują, że utwory te wykazują duże zmiany gęstości od 1,90 do 2,20 Mg/m³ (4).

ZWIĄZEK MIĘDZY POLEM GRAWITACYJNYM A OPORNOŚCIĄ ELEKTRYCZNĄ SKAŁ

Aby być ścisłym należałoby mówić o związku między gęstością a opornością elektryczną. W rezultacie jednak ma się do czynienia z przebiegiem anomalnego pola grawitacyjnego i zmianami pozornej oporności elektrycznej. Obydwa te parametry mierzone są znanymi sposobami na powierzchni ziemi. Na ich wartość wpływa rozkład gęstości i oporu właściwego w określonej objętości ośrodka, w otoczeniu punktu pomiarowego.

Szukanie związków między tak mierzonymi parametrami może mieć sens tylko wtedy, gdy obydwa charakteryzują się porównywalnym zasięgiem penetracji. W przypadku anomalii grawimetrycznych o zasięgu głębokościowym decyduje promień uśrednienia pola grawitacyjnego, przy wydzieleniu anomalii resztkowych. Nie ma tu precyzyjnych reguł; umownie przyjmuje się, że anomalie resztkowe wydzielone przy zastosowaniu promienia R pochodzą z głębokości nie większych niż R . Natomiast przy pomiarach elektrycznych o zasięgu głębokościowym decyduje rozstaw elektrod prądowych oraz charakter przekroju geoelektrycznego. Przyjmuje się, że dla ośrodka względnie jednorodnego największy udział w zmierzonej wartości oporności elektrycznej ma strefa z przedziału $(1/3 - 1/5) AB$, gdzie AB jest rozstawem elektrod prądowych. Można zatem powiedzieć, że anomalie resztkowe prezentują efekty, których źródła zalegają w strefie od powierzchni do określonej głębokości, zaś wyniki pomiarów metodą profilowania elektrycznego zależą głównie od zmian oporności ośrodka w określonym interwale głębokościowym. Czyli im płytsze utwory się bada, tym pełniejsza powinna być korelacja.

Z powyższego widać, jak złożony jest problem właściwego czy optymalnego doboru parametrów przy badaniu związków między anomaliami grawimetrycznymi a opornością pozorną. Zakładając istnienie zależności między gęstością a opornością elektryczną, właściwym sposobem doboru takich parametrów byłoby badanie współczynnika

korelacji między anomaliami grawimetrycznymi – przy różnych promieniach uśredniania, a opornością pozorną – przy różnych rozstawach elektrod.

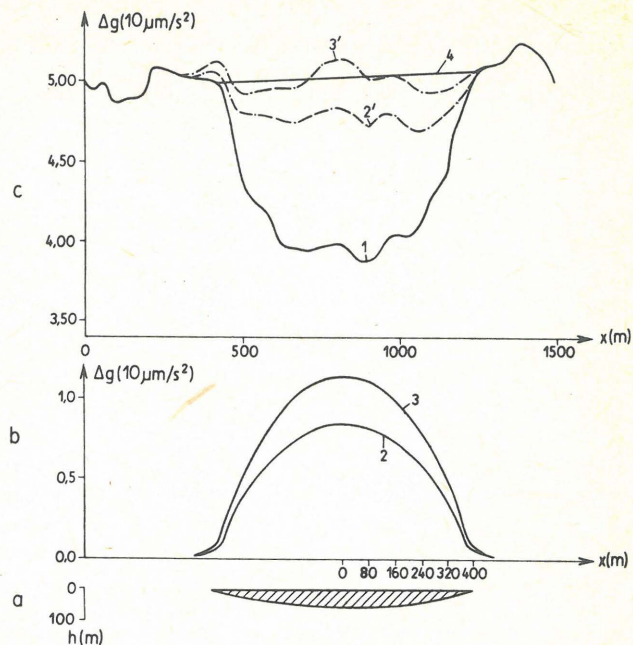
Ponieważ celem prac doświadczalnych było badanie utworów czwartorzędu, którego miąższość waha się w granicach 140–280 m, to biorąc pod uwagę powyższe twierdzenie przyjęto dwa promienie uśredniania anomalii Bouguera, równe: 160 i 280 m oraz dwupoziomowe profilowanie elektryczne o rozstawach elektrod zasilających 300 i 600 m. Analiza współczynnika korelacji dla odpowiednich przebiegów przy szerokości okna 400 m wykazała, że średnio ok. 70% długości wszystkich profilów ma korelację ujemną, a w tym ponad jedna trzecia charakteryzuje się współczynnikiem mniejszym niż $-0,5$. Różnica współczynnika dla płytszego i głębszego zasięgu są niewielkie i wynoszą kilka procent. Z powyższego wynika, że współczynnik korelacji, biorąc bezwzględnie jest raczej niski, chociaż trend korelacji ujemnej jest dość wyraźny na wszystkich profilach.

ANALIZA DANYCH GRAWIMETRYCZNYCH

Na podstawie analizy gęstości można oczekiwać, że większym nagromadzeniem glin zwałowych powinny odpowiadać anomalie dodatnie pola grawitacyjnego, natomiast torfom i mułkom a także utworom piaszczystym anomalie ujemne. Dlatego korzystając z mapy fotogeologicznej, która daje wprawdzie tylko informacje o utworach przypowierzchniowych, zestawiono wystąpienia torfów i namułów torfiastych z anomaliami ujemnymi (ryc. 1), natomiast wychodnie glin zwałowych z anomaliami dodatnimi (ryc. 3). Mapy te autor opracował przy współpracy J. Twarogowskiego. Na pierwszej mapie podano obraz anomalii resztkowych wzdłuż profilów (w formie kładów) wydzielonych tym samym promieniem, jaki zastosowano przy sporządzaniu map anomalii resztkowych. Na drugiej mapie naniesiono wzdłuż profilów w sposób schematyczny strefy, w których wartości oporności pozornej są większe lub mniejsze od $100 \Omega \cdot m$. Wartość tę przyjęto jako orientacyjną granicę między glinami zwałowymi i utworami piaszczysto-żwirowymi.

Konfrontacja przebiegów anomalii resztkowych na profilach z obrazem tych anomalii na mapie wykazuje dobrą zgodność w przypadku anomalii wyraźnych. Natomiast zgodności jest brak (granice są poprzesuwane), gdy anomalie resztkowe są niewielkie bądź pochodzą z procesu wyrównywania. Anomalie wyraźne mają też zdecydowanie ujemną korelację z rozkładem oporności pozornej na profilach (ryc. 3). Do takich anomalii można zaliczyć anomalie na kolejnych profilach, zawarte między punktami pomiarowymi (ryc. 1 i 3): I, 38–43; II, 10–18; III, 150–154; 26–35; IV, 120–130; V, 33–50; VI, 63–73. Są to zarówno anomalie dodatnie jak i ujemne. Te pierwsze powinny charakteryzować większe nagromadzenie glin zwałowych, które, jak wyżej wykazano, są utworami cięższymi. Jednak dodatnim anomaliiom nie zawsze musi odpowiadać obniżenie oporności elektrycznej. W przypadku, gdy gliny są utworem zwartym lub półzwartym, a więc o obniżonej wilgotności, ich oporności mogą być względnie wysokie. Wtedy gliny te są zdecydowanie cięższe. Dodatnim anomaliiom może odpowiadać większa koncentracja glazów narzutowych (bruk), które mogą się nie wyróżniać opornością elektryczną.

Wydzielenia torfów i namułów torfiastych występują zarówno w obszarze anomalii ujemnych, jak i dodatnich. Strefom tym odpowiadają też różne wielkości oporności elektrycznych. Nasuwa się wniosek, że w związku z nie-



Ryc. 4. Wyniki interpretacji jednej z ujemnych anomalii grawimetrycznych.

a – model ciała o grubości 50 m i szerokości 410 m, b – efekt grawitacyjny od modelu o gęstości $0,44 \text{ g/cm}^3$ (krzywa 2) i o gęstości $0,60 \text{ g/cm}^3$ (krzywa 3), c – 1 – anomalia grawimetryczna, 2' – wykres anomalii po dodaniu krzywej 2, 3' – wykres anomalii po dodaniu krzywej 3, 4 – odcinek prostej oznaczający szerokość modelu.

Fig. 4. Results of interpretation of one of negative gravity anomalies.

a – model of body 50 m thick and 410 m wide, b – gravity effect of model with density 0.44 g/cm^3 (curve 2) and 0.60 g/cm^3 (curve 3), c – 1 – gravity anomaly, 2' – graph of anomaly after adding curve 2, 3' – graph of anomaly after adding curve 3, 4 – section of straight line marking width of model.

wielką miąższością tych utworów (do 4 m) nie mają one większego wpływu na obraz grawimetryczny i geoelektryczny.

Chociaż na ogół korelacja obrazu pola grawitacyjnego z powierzchniowymi danymi geologicznymi jest niewielka, to jednak takie zestawienie umożliwia formułowanie wniosków o przestrzennym układzie tych utworów, które mają swoje wychodnie na powierzchni ziemi. Np. wychodnie glin na E i na W od otworu Sz-2 w obrębie anomalii dodatniej świadczyłyby o kontynuacji tych osadów pod powierzchnią, między tymi wychodniami. Potwierdza to otwór Sz-2, w którym nawiercono 12 m glin na głębokości 2 m; do głębokości 100 m ich miąższość wynosi 83 m (tab. IV).

Ujemne anomalie grawimetryczne mogą się pojawiać w następujących przypadkach:

- występują utwory piaszczysto-żwirowe odwodnione; wtedy niezależnie od tego jakie utwory występują w sąsiedztwie (z wyjątkiem torfów) mamy do czynienia z dużym kontrastem gęstościowym; takim warunkom odpowiadają wysokie oporności elektryczne;
- występują znaczne pokłady torfów i namułów torfiastych; wtedy mamy do czynienia z najwyższym kontrastem gęstościowym dla utworów czwartorzędu; ponieważ torfy występują zazwyczaj przy powierzchni i mają miąższość kilku metrów, zastosowane rozstawy elektrod w profilowaniu elektrycznym nie chwytały już wpływu torfów, których oporność jest niska;

ZESTAWIENIE WIELKOŚCI ANOMALII RESZTKOWYCH
Z WYSTĄPIENIAMI GLIN ZWAŁOWYCH W PROFILACH OTWORÓW WIERTNICZYCH

Nr otworu	Wielkość anomalii w mgal			% zawartości glin zwałowych		U w a g i
	na profilach		na mapie	w czwartorzędzie	do głębokości 100 m	
	$r_1 = 160$ m	$r_1 = 280$ m				
H 1	0,16	—	—	56	76	Na skraju mapy
Ł 8	—	—	0 ÷ 0,10	69	92	Na skraju mapy
Ł 7	0,22	0,10	0,18	—	51	
Ł 6	0,10	0,17	0 ÷ 0,10	—	46	OW na granicy anomalii
Ł 5	0,15	0,35	0,25	—	100*	
U 3	0,10	0,06	0 ÷ 0,10	48	48	OW na granicy anomalii
I 1	-0,24	-0,35	-0,10	23	0	
S 12	0,22	0,35	0,10	—	72	
U 11	—	—	0 ÷ 0,10	21	18	
W 4	—	—	0	—	100*	Na granicy anomalii
W 4'	—	—	0 ÷ -0,10	—	90*	
Sz 2	—	—	0,19	57	83	

* Profile orientacyjne,

– występują utwory piaszczysto-żwirowe zawadnione w otoczeniu glin zwałowych; wtedy oporność elektryczna tych osadów na ogół jest wyższa od oporności glin;

– występują mułki i ropy zastoiskowe w otoczeniu glin zwałowych; gęstości ropy czwartorzędowych są zazwyczaj niższe niż glin zwałowych; oporności elektryczne ropy są zdecydowanie niskie (10–30 Ω m).

Gdy mamy do czynienia z warstwową budową utworów czwartorzędowych sytuacje powyższe odpowiadałyby zmianom miąższości danego utworu, czy jego wyklinowaniu się. Przy bardziej skomplikowanej budowie mogą to być powierzchnie kontaktów litologicznych o dużym nachyleniu względem poziomu. Z taką sytuacją mamy prawdopodobnie do czynienia w zagłębieniu Szeszupy. Wskazuje na to mozaikowy obraz anomalii resztkowych, duża zmienność oporności elektrycznych a także różnorodność utworów wychodzących na powierzchnię. Oczywiście jest, że wyraźne anomalie grawimetryczne muszą odpowiadać nagłym zmianom litologicznym, a nie np. stopniowej zmianie miąższości danego utworu.

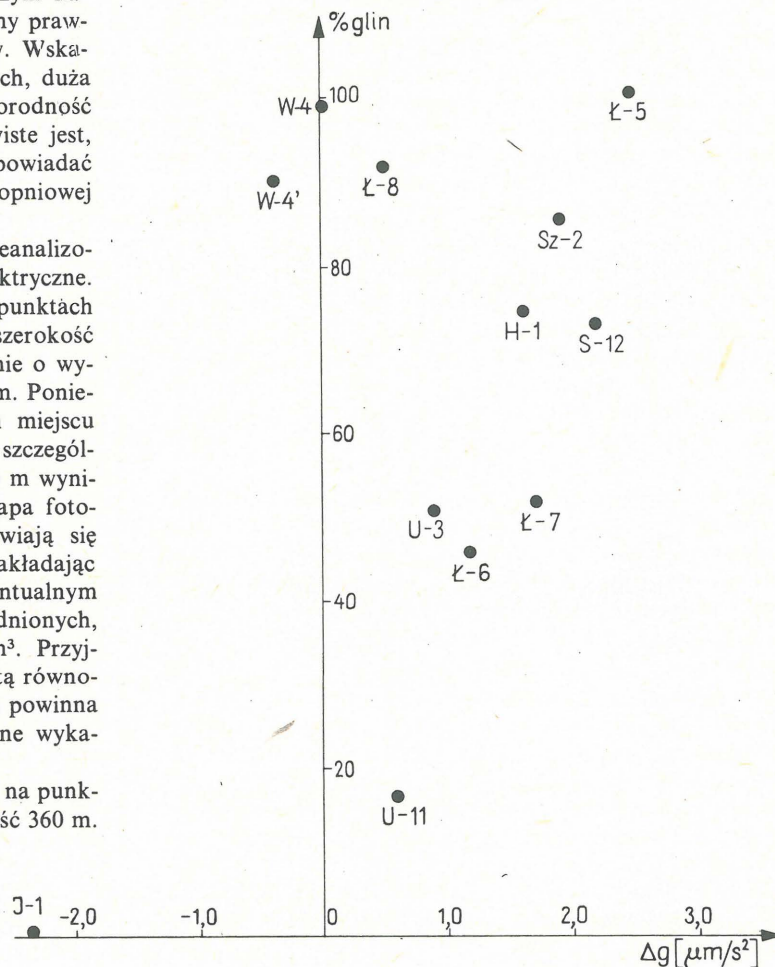
Dla sprawdzenia powyższych stwierdzeń przeanalizowano trzy anomalie, wykorzystując dane geoelektryczne. Pierwsza anomalia dodatnia na profilu II, na punktach pomiarowych 80–87, ma amplitudę 0,52 mgal* i szerokość ok. 2,80 m. W morfologii występuje tu wzniesienie o wysokości względnej ok. 20 m i szerokości ok. 280 m. Ponieważ profilowanie elektrooporowe (brak w tym miejscu sondowań) wykazuje znaczną anomalię ujemną, szczególnie na płytszych rozstawach o szerokości ok. 250 m wynikałoby stąd, że występują tu gliny zwałowe. Mapa fotogeologiczna wskazuje, że na powierzchni pojawiają się tu piaski i żwiry z głazami moren czołowych. Zakładając zatem, że anomalie wywołują gliny zwałowe (z ewentualnym dodatkiem głazów) w otoczeniu piasków zawadnionych, przyjęto kontrast gęstościowy $\Delta\sigma = 0,18$ Mg/m³. Przyjmując dla orientacji, że mamy do czynienia z płytą równoległą do wywołania efektu 0,52 mgal jej grubość powinna wynosić 70 m. Najbliższe sondowanie elektryczne wykazuje ok. 60 m glin.

Druga z kolei anomalia ujemna na profilu III, na punktach 26–35 ma amplitudę -0,60 mgal i szerokość 360 m.

Dane geoelektryczne wskazują na występowanie utworów piaszczystych zawadnionych, w otoczeniu glin o miąższości 66 m. Przy kontrakcie gęstościowym $\Delta\sigma = 0,18$ Mg/m³ maksymalny efekt wynosi -0,50 mgal.

Ryc. 5. Zależność udziału glin zwałowych w przedziale do 100 m głębokości od średniej wartości anomalii resztkowych w punktach wykonania otworów wiertniczych.

Fig. 5. Dependence of share of tills in the depth interval down to 100 m on mean value of residual anomalies in places where drillings have been made.



* 1 mgal = 10 μ m/s²

Trzecia anomalia znajduje się na profilu V, na punktach 33–50 i ma amplitudę ok. – 1,00 mgal, a szerokość ok. 650 m. Dane geoelektryczne zarówno w profilowaniu, jak i w sondowaniu wykazują wysokie oporności, rzędu 3000 Ω m, warstwy o miąższości 50 m. Odpowiadałyby to utworom piaszczystym odwodnionym, w otoczeniu takich samych utworów zawodnionych. Wtedy kontrast wynosiłby $\Delta\sigma = 0,26 \text{ Mg/m}^3$, a efekt grawitacyjny – 0,54 mgal, a więc prawie dwukrotnie za mały. Z tego wynika, że w otoczeniu powinny występować gliny zwałowe o małej wilgotności, co potwierdzałyby dodatnie anomalie grawimetryczne. Wtedy kontrast wynosiłby – 0,44 Mg/m^3 , a efekt – 0,92 mgal. Anomalię tę zinterpretowano również modelując ciało zaburzające cylindrem poziomym o przekroju kołowym ściętym z góry (4), o grubości 50 m i szerokości 820 m. Przy kontraście gęstości – 0,44 Mg/m^3 uzyskano wypełnienie anomalii (krzywa 1 na ryc. 4), ale niepełne. Dla całkowitego wypełnienia należy zwiększyć kontrast do – 0,60 Mg/m^3 (krzywa 2), albo zwiększyć grubość cylindra ściętego do prawie 70 m.

Z powyższych rozważań wynika, że analiza poszczególnych anomalii grawimetrycznych, w powiązaniu z rezultatami pomiarów geoelektrycznych, umożliwia identyfikację występujących utworów. Oczywiście nie wszędzie to jest możliwe, ale w wielu przypadkach kompleksowe pomiary grawimetryczno-geoelektryczne na to pozwalają.

EFEKTYWNOŚĆ ZASTOSOWANEJ METODY

Efektywność metody elektrooporowej jest na ogół znana i nie wymaga tu szczegółowego omawiania. Jest ona szeroko stosowana od dziesiątków lat w badaniu utworów czwartorzędowych, w szczególności przy rozwiązywaniu typowych zagadnień hydrogeologicznych. Wiadomo, że w warunkach spokojnej budowy geoelektrycznej, przy na przemian występujących kompleksach przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych, o miąższościach porównywalnych z głębokością, metoda elektrooporowa daje dobre wyniki i z wystarczającą dokładnością odpowiada na stawiane pytania. W innych warunkach, gdy zmienność, zwłaszcza w kierunku poziomym, jest duża występują znaczne trudności interpretacyjne sondowań i dokładność wyników często jest niezadowalająca. Sytuację może pogorszyć niewystarczający kontrast oporności elektrycznej między glinami zwałowymi i warstwami wodonośnymi.

Metoda grawimetryczna opiera się na zróżnicowaniu gęstościowym utworów. Jak wykazuje analiza gęstości osadów czwartorzędowych i związków pola grawitacyjnego z opornością elektryczną potencjalne możliwości metody grawimetrycznej są znane i, co istotne, właśnie przy skomplikowanej budowie geologicznej jej przydatność powinna być największa. A z taką budową, jak wskazują wyniki wiercenia i mapa fotogeologiczna mamy do czynienia w zagłębieniu Szeszupy. Aby wykazać trafność teoretycznych ustaleń należałoby, na podstawie znanego obrazu pola grawitacyjnego, zaprojektować wiercenia i porównać wyniki wierceń z charakterem anomalii. W rozważanym rejonie wiercenia ze znaną litologią czwartorzędu znajdują się na profilu III. Były one jednak zlokalizowane w sposób przypadkowy jeśli chodzi o pole grawitacyjne. Jak widać z ryc. 1 niektóre otwory są na skraju anomalii bądź poza profilem, co utrudnia analizę. Mimo to dokonano zestawienia wielkości anomalii z ilością nawierconych glin zwałowych w poszczególnych otworach (tab. IV). Uśrednionym wartościom anomalii resztkowych z tabeli IV przyporządkowano udział procentowy glin zwałowych w profilu otworu do głębokości 100 m (ryc. 5). Z zestawienia

wynika, że na 12 otworów tylko dwa znalazły się w obrębie anomalii ujemnych. W otworze J1 do 100 m nie nawiercono wcale glin, natomiast w W4 gliny wystąpiły aż w 90%.

W zasadzie należałoby odrzucić otwory występujące na skraju anomalii, przynajmniej z przedziału –0,1–+0,1 mgal. Wtedy pozostałe otwory wykazywałyby tendencję wzrostu udziału glin ze wzrostem wartości anomalii. Niezależnie od małej ilości danych trudno oczekiwać jakiejś czystej zależności ponieważ w grę wchodzi wiele czynników, które taką zależność muszą zakłócać, jak np. dowolność wyboru przedziału głębokościowego, proces wyrównywania przy wydzielaniu anomalii resztkowych itd. Tym niemniej dane z ryc. 5 potwierdzałyby w jakimś stopniu wnioski wynikające z analizy gęstości. Jest to jednak za skromny materiał dla oceny efektywności metody. Konieczne są dalsze badania dla wzbogacenia zarówno metodyki pomiarów, jak i interpretacji. Już jednak ten przykład może być zachętą do szerszego wykorzystania grawimetrii w kompleksie z metodą elektrooporową.

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań geofizycznych i analiz materiałów archiwalnych, w tym zdjęć lotniczych, można stwierdzić co następuje:

1. Analiza gęstości utworów czwartorzędu na obszarze Suwalskiego Zagłębienia Rud Żelaza wykazała istnienie kontrastów gęstościowych między glinami zwałowymi a osadami piaszczysto-żwirowymi, o wielkości 0,18 Mg/m^3 .

2. Badanie związku między polem grawitacyjnym a opornością pozorną wzdłuż profili wykazało, że przeważa korelacja ujemna (70% sumarycznej długości profili), z czego trzecia część ma współczynnik korelacji mniejszy od –0,5. Oznacza to, że na ogół anomaliami dodatnim grawimetrycznym odpowiadają obniżenia oporności elektrycznej i na odwrót.

3. Uzyskany z analizy materiałów archiwalnych obraz grawimetrycznych anomalii resztkowych ma złożony charakter, raczej mozaikowy, chociaż wykazuje pewną kierunkowość w przebiegu anomalii (SW-NE). Wskazuje to na dużą zmienność w budowie czwartorzędu.

4. Wyraźne dodatnie anomalie grawimetryczne należy tłumaczyć zwiększonym występowaniem utworów cięższych (gliny zwałowe, bruk), natomiast anomaliami ujemnym odpowiadałyby strefy odwodnione w otoczeniu innych utworów i utwory zawodnione w otoczeniu glin. Małe miąższości torfów i bruku (do kilku metrów) nie zakłócają tych relacji w większym stopniu.

5. Przy kompleksowej analizie danych grawimetrycznych i geoelektrycznych przydatna okazała się mapa fotogeologiczna utworów przypowierzchniowych opracowana na podstawie zdjęć lotniczych. Przy przeniesieniu jej niektórych elementów na mapę określonych anomalii resztkowych można wyciągać wnioski nawet o przestrzennym układzie niektórych kompleksów litologicznych, które mają swoje wychodnie na powierzchni ziemi.

6. Z istoty metody grawimetrycznej wynika, że jest ona predysponowana do badań ośrodków skalnych o dużej zmienności poziomej. W takich warunkach do kompleksu najbardziej przydatna jest metoda profilowania elektrooporowego. Natomiast sondowania geoelektryczne powinny być stosowane punktowo, po analizie pola grawitacyjnego w celu rozpoznania źródeł ważniejszych anomalii dodatnich i ujemnych. W warunkach skomplikowanej budowy czwartorzędu, jak to ma miejsce na obszarze zagłębienia Szeszupy, gęstość pomiarów grawimetrycz-

nych w zdjęciu powierzchniowym nie może być mniejsza niż ta, która tworzy siatkę o oczku 200 m. Natomiast profile, na których pomiary nie mogą być rzadsze niż co 50 m, powinny przebiegać w odległościach średnio 1 km. Wskazane są dalsze badania o charakterze metodycznym.

LITERATURA

1. Ber A. — Czwartorzęd Pojezierza Suwalskiego. Biul. Inst. Geol. 1974 t. 269.
2. Kotowski A. — Założenia geologiczne do prac geoelektrycznych dla tematu „Ocena odnawialności wód podziemnych na obszarze Suwalskiego Zagłębia Rud Żelaza”. Arch. Inst. Geol. 1975
3. Królikowski C. — O metodyce badania gęstości utworów kenozoicznych. Prz. Geol. 1981 nr 3.
4. Królikowski C. — Modelowanie grawimetryczne niektórych form geologicznych ściętym walcem poziomym o przekroju kołowym. Arch. Inst. Geol. 1983.

SUMMARY

The paper presents results of the combined use of gravity and electric resistance methods in surveys on structure of Quaternary deposits. There are given density characteristics of Quaternary deposits in the studied area and the results of analysis of relations between gravity field and apparent electric resistance. Increased electric resistance was usually found to correspond to negative gravity anomalies and vice versa. The recorded gravity anomalies were subsequently compared with photogeological map of subsurface deposits. No unequivocal correlation was found between either positive anomalies and tills cropping out at the surface or negative anomalies and occurrences of peats and muds. Nevertheless, the data analysed in this way make it often possible to draw some conclusions on spatial distribution of certain Qua-

ternary deposits. In order to evaluate effectiveness of the used method, the obtained gravity image was compared with borehole data. The comparison showed geophysical conclusions to be fairly accurate.

It is concluded that the combined use of gravity and electric resistance methods supplies new data on structure of Quaternary deposits, especially in the case when the deposits are highly varying in lithology.

РЕЗЮМЕ

В статье рассматриваются результаты применения гравиметрического метода в комплексе с электросопротивительным методом для исследования строения четвертичных осадков. Приведена характеристика плотности четвертичных осадков рассматриваемого района, а также обращено внимание на связь между гравитационным полем и полным электрическим сопротивлением. В большинстве случаев отрицательным гравиметрическим аномалиям соответствуют повышенные электрические сопротивления и наоборот. Гравиметрические аномалии составлены с фотогеологической картой поверхностных отложений. Не была определена однозначная корреляция положительных аномалий с распространением валунных глин на поверхности Земли и отрицательных аномалий — с торфами и наносами. Но всё таки составленные таким образом материалы позволяют в многих случаях делать выводы касающиеся пространственного распространения определённых четвертичных отложений. Для оценки эффективности метода было проведено сравнение гравиметрического изображения с результатами бурения, которое подтвердило геофизические выводы.

Автор приходит к выводу, что гравиметрический метод применяемый вместе с электросопротивительным даёт новые информации по строению четвертичных отложений, особенно в условиях большой литологической изменчивости.