

Wykorzystanie danych geofizycznych w procesie budowy regionalnego modelu przepływu wód podziemnych

Marcin Honczaruk¹, Mirosław Musiatewicz¹, Sławomir Filar¹

The use of geophysical data in the process of building a regional model of groundwater flow. *Prz. Geol.*, 65: 1211–1217.

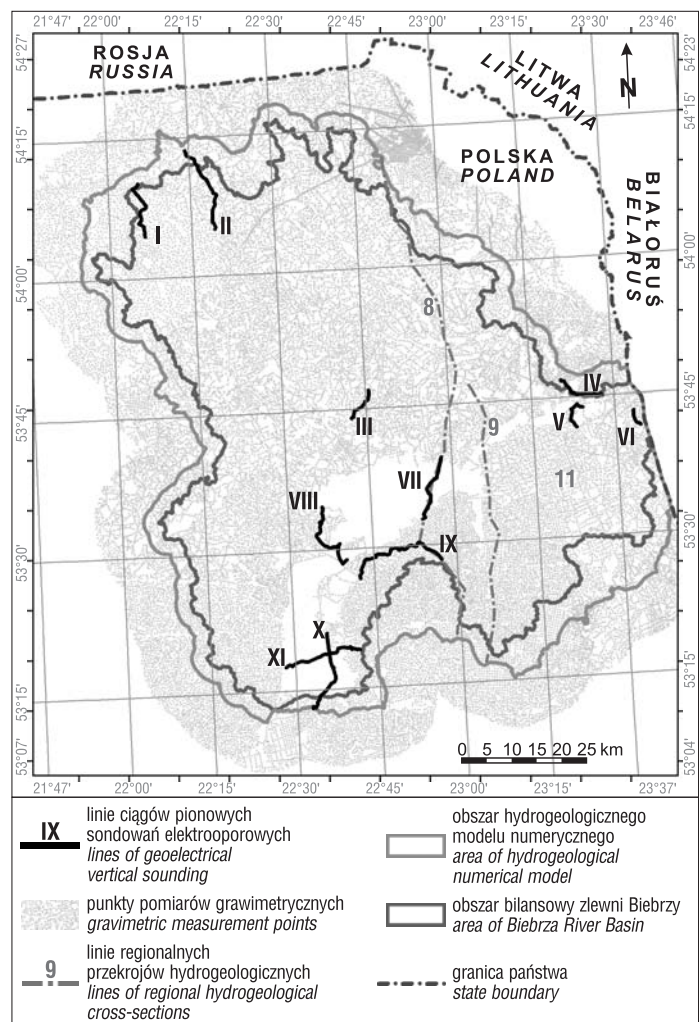
Abstract. This article presents the possibilities of using the results of geophysical research for constructing a regional model of groundwater flow to recognise the geological and hydrogeological structures, including the thickness and type of lithologies in the Biebrza catchment area. Interpretation has been made using archived gravimetric data and new geoelectric measurements. The most important goal set before the gravimetric method was the recognition of deep structure, such as deep subglacial channels and depressions in the sub-Quaternary layers. Furthermore, real resistance values were obtained from the interpretation of vertical electrical soundings (VES) and used to make cross-sections along geoelectric profiles. As a result of the combined interpretation of geophysical methods and borehole data, the maps of appropriate geological layers were constructed. After identifying the density variation in relation to the resistance diversity of geological complexes, the density and lithological horizontal and vertical boundaries were identified for aquifers and low permeability layers. The boundaries were derived as a GIS spatial data and imported into the regional groundwater flow model for the Biebrza catchment area.

Keywords: Gravimetry, vertical electroresistivity sounding, geoelectric regional model of groundwater flow

Postęp w dziedzinie modelowania przepływu wód podziemnych wymógł ostatnimi czasy stosowanie wielodyscyplinarnego podejścia do badań obszarów niedostatecznie rozpoznanych pod względem budowy geologicznej i wykorzystywanie metod geofizycznych. Celem pracy było rozpoznanie struktur geologicznych i hydrogeologicznych, w tym określenie miąższości i litologicznego zróżnicowania osadów w zlewni Biebrzy. Do zbudowania regionalnego modelu przepływu wód podziemnych wykorzystano wyniki badań geofizycznych, za pomocą których zidentyfikowano zmienność gęstości kompleksów geologicznych. Zmienność tę skorelowano ze zróżnicowaniem oporności skał. W ten sposób zidentyfikowano gęstościowe i litologiczne granice poziome i pionowe w górotworze, które powiązano z przebiegiem warstw wodonośnych i warstw o małej przepuszczalności. Zestaw danych przestrzennych GIS, opisujących granice warstw, został zaimportowany do modelu regionalnego przepływu wód podziemnych w zlewni Biebrzy. Najważniejszym zadaniem było rozpoznanie metodą grawimetryczną głębokich struktur stropu utworów podczwartorzędowych, w tym obniżień i rynien subglacialnych. Dokonano także interpretacji wyników badań geofizycznych z zamiarem określenia miąższości i typu litologicznego osadów piętra czwartorzędowego i neogeńskiego oraz stropu mezozoiku.

DANE I METODY BADAWCZE

Przetwarzaniu i interpretacji poddano archiwalne dane grawimetryczne oraz pomiary geoelektryczne wykonane metodą pionowych sondowań geoelektrycznych (ryc. 1). Dane archiwalne pochodziły z pomiarów wykonanych w ramach półszczegółowego zdjęcia grawimetrycznego Polski. Do kalibracji głębokościowej profili geofizycznych wykorzystano profile litologiczno-stratygraficzne otworów z Centralnej



Ryc. 1. Mapa lokalizacji pomiarów geofizycznych na obszarze zlewni Biebrzy

Fig. 1. Location map of geophysical measurements in the Biebrza River Basin

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

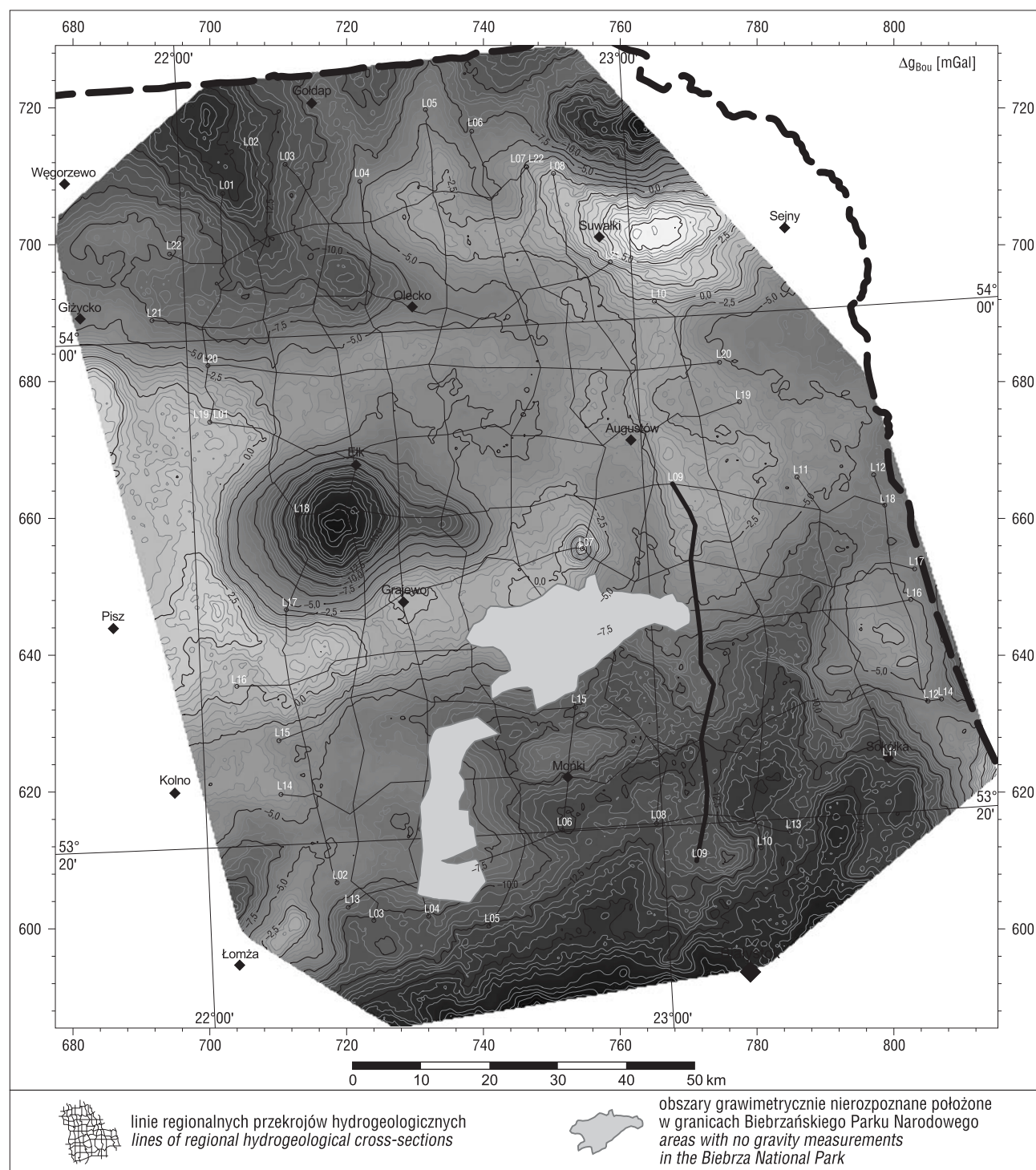
Bazy Danych Geologicznych (CBDG) oraz Banku Hydro.

Interpretacje geologiczne na podstawie pomiarów wykonanych jako poszczególne zdjęcia grawimetryczne są zwykle ograniczone do głębszych struktur geologicznych, zazwyczaj występujących poniżej 250 m p.p.t. Ponieważ prospekcja badań geoelektrycznych sięga do głębokości 250 m p.p.t. Z tego względu jako metodę uzupełniającą zaplanowano interpretację sondowań elektrooporowych.

Do wykonania nowych sondowań elektrooporowych, zastosowano symetryczny, czteroelektrodowy układ Schlumbergera, o maksymalnym rozstawie elektrod zasilających

nie mniejszym niż $AB/2 = 400$ m i średnim kroku pomiarowym 350 m. Łącznie wykonano 401 sondowań geoelektrycznych na linii 11 profili o długości całkowitej 152 km. W miejscach lokalizacji otworów wiertniczych o znanych profilach geologicznych, wykonano dodatkowo geoelektryczne sondowania parametryczne.

Charakterystykę opornościową opracowano na podstawie interpretacji pomiarów terenowych (Kacprzak, Kacprzak, 2017), metodą modelowania matematycznego 1D, z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania komputerowego IPI2win. Metoda modelowania polega na doborze takiej sekwencji miąższości, oporności właściwej,



Ryc. 2. Mapa anomalii grawimetrycznych w redukcji Bouguera
Fig. 2. Complete Bouguer Gravity Anomalies (CBA) distribution

następstwa i miąższości warstw, by obliczona dla niej krzywa teoretyczna $\rho_k = f(AB)$ pokrywała się możliwie dokładnie z krzywą pomiarową. W rezultacie interpretacji krzywych pomiarowych wydziela się w ośrodku warstwy geoelektryczne o określonych przedziałach oporności, którym przyporządkowuje się kompleksy litologiczne na podstawie rezultatów sondowań parametrycznych. Przyjęto następującą charakterystykę opornościową osadów: przy powierzchniowe utwory przesuszone (piaszczysto-żwirowe lub pyły) powyżej 350 Ωm ; żwiry i piaski różnej granulacji 350–95 Ωm ; piaski pylaste (w tym mułki piaszczyste i piaski gliniaste) 75–95 Ωm ; gliny piaszczyste, piaski gliniaste i pylaste 35–85 Ωm ; ility, mułki ilaste i niekiedy gliny ilaste i pylaste poniżej 35 Ωm ; kreda piszcząca oraz gezy 100–300 Ωm ; margle 45–80 Ωm ; piaski glaukonitowe (miocenu i oligocenu); piaski i mułki margliste drobnoziarniste (miocenu i oligocenu) 45–80 Ωm . Wyniki interpretacji 1D zostały powiązane ze sobą i zestawione w formie przekrojów geoelektrycznych. Tak wykonane przekroje geoelektryczne posłużyły jako narzędzie uszczegóławiające wyniki analizy danych grawimetrycznych.

W analizie danych grawimetrycznych wykorzystano archiwalne pomiary wykonane na obszarze północno-wschodniej Polski w latach 60. po 80. XX w. Dane te pozyskano z zasobu Centralnej Bazy Danych Geologicznych, prowadzonej przez Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy. Do przeprowadzenia analizy pola siły ciężkości użyto 45 178 punktów grawimetrycznych z obszaru 17 609 km^2 . Średnie zagęszczenie punktów grawimetrycznych wyniosło ok. 2,57 pkt./ km^2 . Stopień zagęszczenia pomiarów na analizowanym obszarze nie jest równomierny. Największe obszarowo luki w prospekcji grawimetrycznej występują na obszarze Biebrzańskiego Parku Narodowego, na którym do dziś nie wykonywano akwizycji grawimetrycznej. Występujące tu braki danych pomiarowych, zastąpiono danymi interpolowanymi na podstawie rozkładu pola siły ciężkości na obszarach przylegających. Ze względu na wielkość powierzchni, na której brakuje danych pomiarowych, wyniki przetwarzania i interpretacji danych grawimetrycznych z tego obszaru należy uznać za mało wiarygodne w odniesieniu do szczegółów. Na rycinie 1 pokazano mapę lokalizacji archiwalnych punktów grawimetrycznych ze zdjęć półszeregów wykorzystanych w transformacjach pola siły ciężkości i analizach danych.

Analizę pola siły ciężkości przeprowadzono na podstawie wyników szerokiego zakresu przetwarzania i transformacji danych grawimetrycznych, wykonanych z użyciem systemu OASIS Montaj. Mapy, przekroje oraz wykresy opracowano w programach Surfer i Grapher. Przygotowanie danych oraz ich analizy, zwłaszcza danych otworowych, wykonywano z wykorzystaniem oprogramowania MS Access i MS Excel.

Podstawę do analizy pola grawitacyjnego stanowiła regularna siatka interpolacyjna rozkładu anomalii przyspieszenia siły ciężkości w redukcji Bouguera, opracowana z zagęszczeniem oczek sieci 250 \times 250 m. Interpolację siatki wykonano metodą krigingu w programie Surfer. Pomierzony i zredukowany do poziomu morza rozkład pola grawitacyjnego z obszaru analizy danych przedstawiono na ryc. 2. Przetwarzanie danych grawimetrycznych obejmowało elementy interpretacji jakościowej, w tym: obliczenia rozkładu gradientu poziomego dg/ds , obliczenia rozkładu odchylenia standardowego (STD) anomalii Δg , rozkładu anomalii rezydualnych i regionalnych. W zakre-

sie interpretacji ilościowej wykonano dekonwolucje pola anomalnego: wg metody Eulera (3D) oraz 2D, wzdłuż linii profili hydrogeologicznych metodą Wernera i 2D dekonwolucji sygnału analitycznego (AS). W celu oczyszczenia anomalnego pola z przypadkowych zakłóceń lub błędów w większości wykonanych transformacji posiłkowano się rozkładem anomalii przedłużonych analitycznie na poziom +100 i sporadycznie +1000 m ponad poziom redukcji danych. W artykule zaprezentowano wybrane wyniki uzyskane w toku przetwarzania i interpretacji rozkładu pola anomalnego.

W pracach interpretacyjnych w szerokim zakresie wykorzystywano dane uzupełniające. Były to m.in. dane wysokościowe, udostępnione z obszaru Polski przez Głównego Geodetę Kraju (Numeryczny Model Terenu, 2015) w postaci cyfrowego modelu powierzchni terenu o rozdzielczości poziomej 100 \times 100 m. Ponadto przeprowadzono wiele analiz z wykorzystaniem danych otworowych z obszaru objętego opracowaniem. Wyjściowy materiał analityczny stanowiły dane otworowe z bazy bank HYDRO oraz bazy CBDG. Produktem końcowym przetwarzania i selekcji danych otworowych były szkice głębokościowe wydzielonych horyzontów stratygraficznych.

WYNIKI

Przedstawiona na rycinie 2 mapa anomalii Bouguera jest odwzorowaniem sumy efektów grawitacyjnych generowanych przez niejednorodności w rozkładzie gęstości ośrodka geologicznego, obejmującego podłoże krystaliczne płyty wschodnioeuropejskiej, pokrywę paleozoiczną i mezozoiczną, aż po niejednorodności w osadach neogeo-sko-paleogeońskich i czwartorzędu. Z uwagi na skalę mapy oraz możliwe do zastosowania cięcie warstwicowe 0,5 mGal słabo zaznaczyły się zaburzenia pola generowane przez płytkie źródła pola, występujące w kompleksie osadów kenozoicznych. Dominują efekty o dużym zasięgu poziomym, wywołane niejednorodnościami litologicznymi w podłożu krystalicznym oraz morfologią jego stropu (Królikowski, 2004; Królikowski, Petecki, 1995).

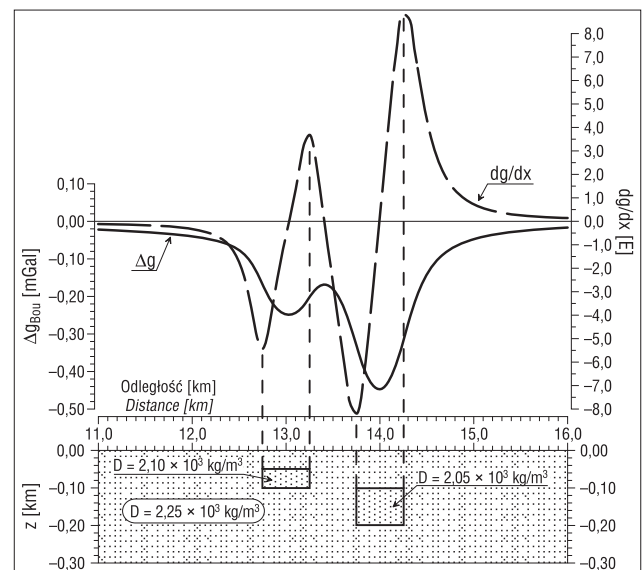


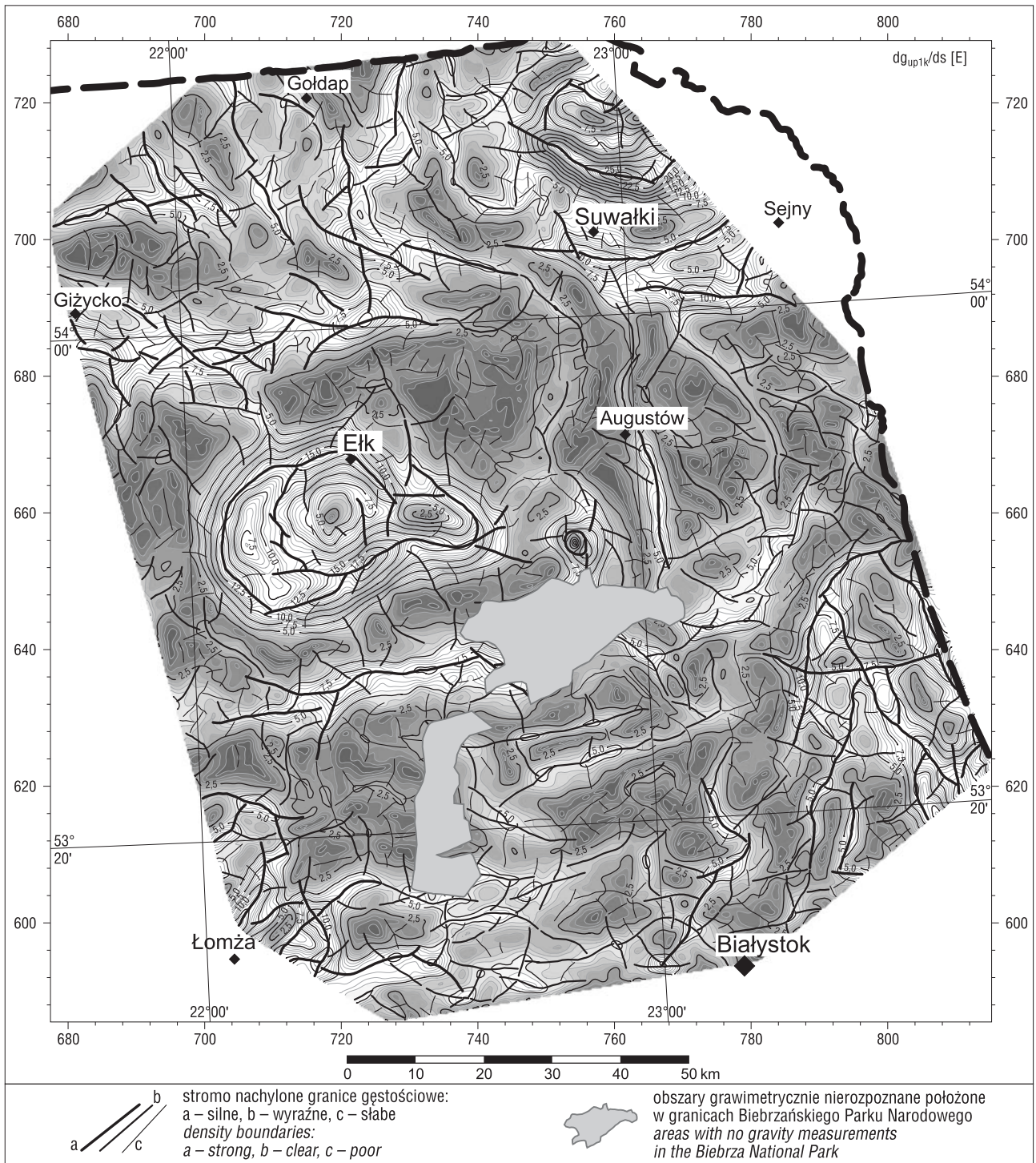
Fig. 3. Prosty model grawimetryczny dwóch rynien subglacialnych, prostopadłych do rozciągłości linii przekroju, wypełnionych osadami piaszczystymi

Fig. 3. The simple gravimetric model of two subglacial sand-filled channels perpendicular to the cross-section

Kluczową sprawą w ocenie możliwości wykorzystania danych grawimetrycznych na potrzeby konstrukcji hydrogeologicznego modelu przepływu wód było określenie przebiegu stromo nachylonych granic nieciągłości (kontakty, uskoki, wyklinowania warstw) oraz identyfikacja stref nagromadzenia osadów przepuszczalnych w utworach czwartorzędu. Z opracowania wcześniejszych badań parametrów gęstościowych skał wynika, że na badanym obszarze można się spodziewać dużych różnic gęstościowych pomiędzy typami litologicznymi wchodzącymi w skład kompleksu osadów polodowcowych (Grycko, Musiatewicz, 1985; Daniel-Danielewska i in., 1982; Mar-

gul i in., 1982; Margul 1982). Można przyjąć, że średnia gęstość piasków i żwirów czwartorzędowych waha się w granicach $2,06-2,11 \times 103 \text{ kg/m}^3$. Z kolei największą gęstość mają gliny zwałowe ok. $2,24-2,29 \times 103 \text{ kg/m}^3$ (Królikowski, Twarogowski, 1991). W skrajnych przypadkach kontrast gęstościowy pomiędzy głównymi typami geologicznymi może osiągać $0,25 \times 103 \text{ kg/m}^3$ i może być przyczyną silnych zaburzeń w rozkładzie pomierzonego pola.

Odpowiedź na pytanie, jak dużych efektów anomalnych można się spodziewać na powierzchni, daje prosty model geometryczno-gęstościowy pokazany na rycinie 3.



Ryc. 4. Mapa anomalii gradientu poziomego dg_{up1k}/ds anomalii siły ciężkości przedłużonych analitycznie na poziom +1000 m
Fig. 4. The map of gravity horizontal gradient distribution dg_{up1k}/ds based on anomalies continued up to the level of +1000 m

Z modelu wynika, że anomalie rezydualne Δg_{Rez} o amplitudzie rzędu 0,5 mGala oraz gradientie poziomym o amplitudzie przekraczającej wartość 8 E, mogą być generowane przez nieciągłości rozkładu gęstości w przypowierzchniowej części ośrodka geologicznego. Wyniki modelowania granic nachylonych pokazują, że nawet przy zapadaniu granicy pod kątem 60° położenie ekstremów gradientu poziomego nie ulega znaczącym zmianom, co ma istotne znaczenie praktyczne.

Lokalizację granic gęstościowych, wyznaczonych na obszarze objętym analizą na tle rozkładu anomalii gradientu obliczonego z pola siły ciężkości przedłużonego na poziom + 1000 nad powierzchnię redukcji, pokazuje rycina 4.

Wyinterpretowany system nieciągłości odnosi się do obrazu wygenerowanego głównie przez skały podłoża podkenozoicznego, nie zaś przez skokowe zmiany gęstości w utworach kenozoicznych. W ramach systemu wyodrębniono 3 umowne kategorie nieciągłości, z zastosowaniem

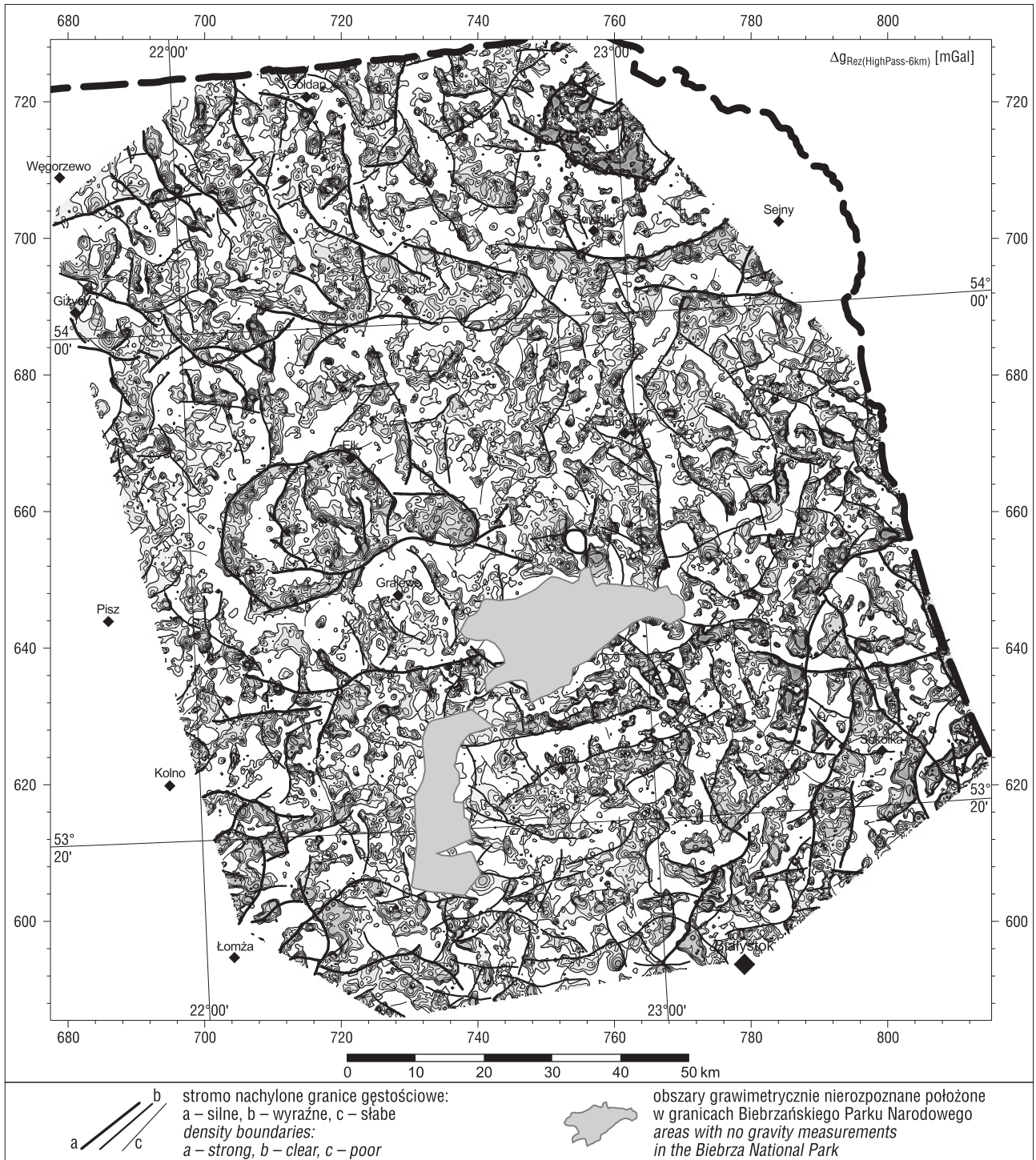


Fig. 5. Mapa warstwiczna ujemnych anomalii rezydualnych siły ciężkości $\Delta g(\text{Rez})$. Przy zastosowanej filtracji górnoprzepustowym (HPass) filtrem BTWR, graniczna długość fali $l_g = 6$ km

Fig. 5. The contour map of residual, negative gravity anomalies $\Delta g(\text{Rez})$ filtered by space-domain High Pass BTWR filter, cutting wave 6 km long

kryterium wielkości, amplitudy odzworowania się i ciągłości śledzenia nieciągłości w polu anomalnym.

Obraz układu granic gęstościowych porządkuje rozkład anomalii rezydualnych, związanych przede wszystkim z różnicowaniem gęstościowym utworów czwartorzędowych oraz morfologią podłoża kenozoiku, w ramach wizualnie definiowalnych i obszarowo ograniczonych stref.

Rozkład anomalii rezydualnych, ograniczony do anomalii ujemnych, odzwierciedlających występowanie stref

o obniżonej gęstości w utworach czwartorzędowych, obrazuje rycina 5. Przedstawiona mapa stanowi wynik filtracji częstotliwościowej pomierzonego pola siły ciężkości z wykorzystaniem górnoprzepustowego filtra Butterwortha (BTWR).

Wyniki filtracji zostały częściowo zweryfikowane poprzez porównanie z profilami otworów wiertniczych przebijających strop neogenu i paleogenu. Dla tych otworów wyznaczono procentowy wskaźnik udziału utworów

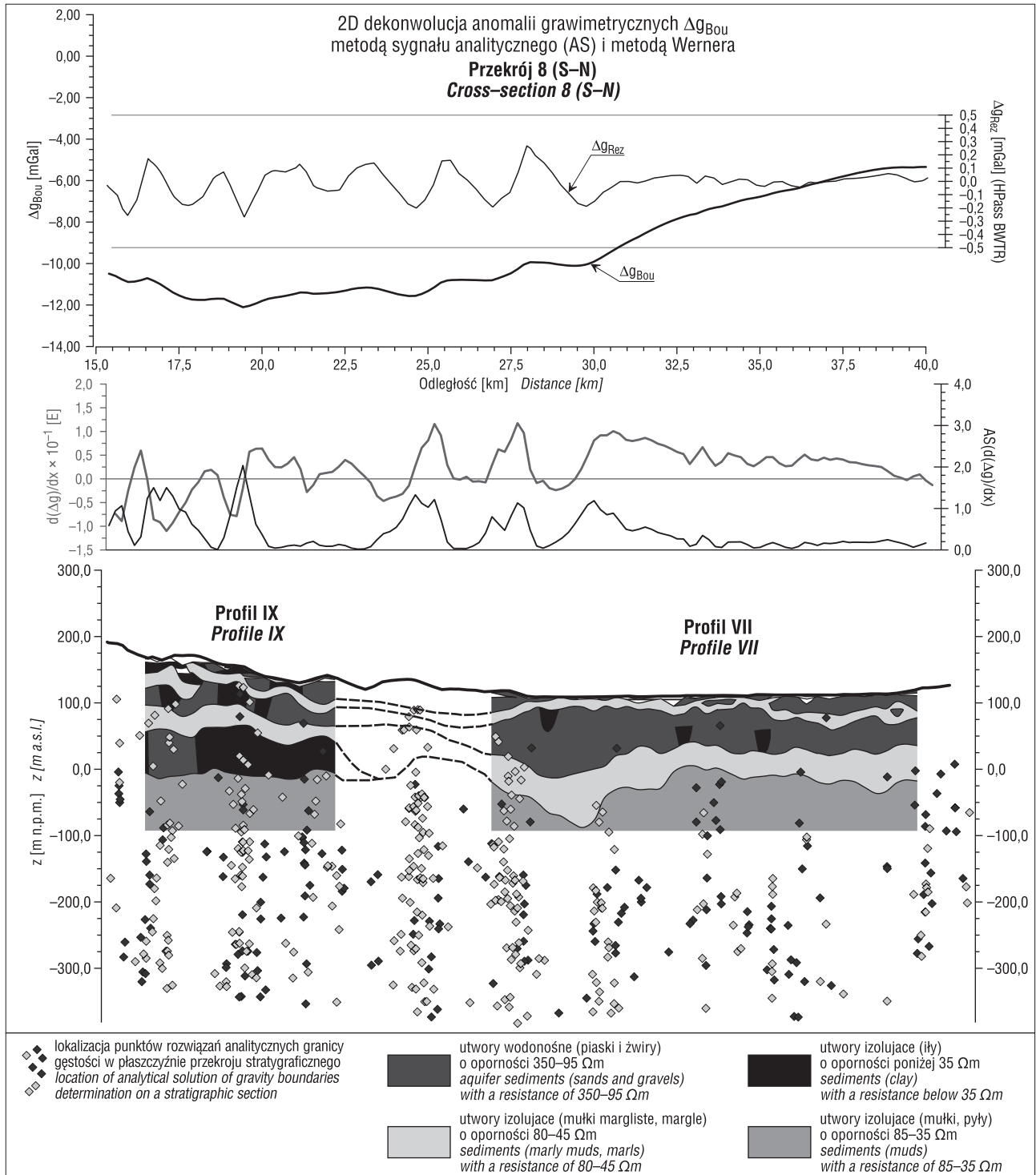


Fig. 6. Interpretacja geologiczna na podstawie analizy 2D dekonwolucji anomalii grawimetrycznych w powiązaniu z interpretacją 1D i 2D modeli geoelektrycznych wzdłuż przekroju 8

Fig. 6. Geological interpretation based on 2D deconvolution of gravity anomalies in association with interpretation of 1D and 2D geoelectric models along cross-section 8

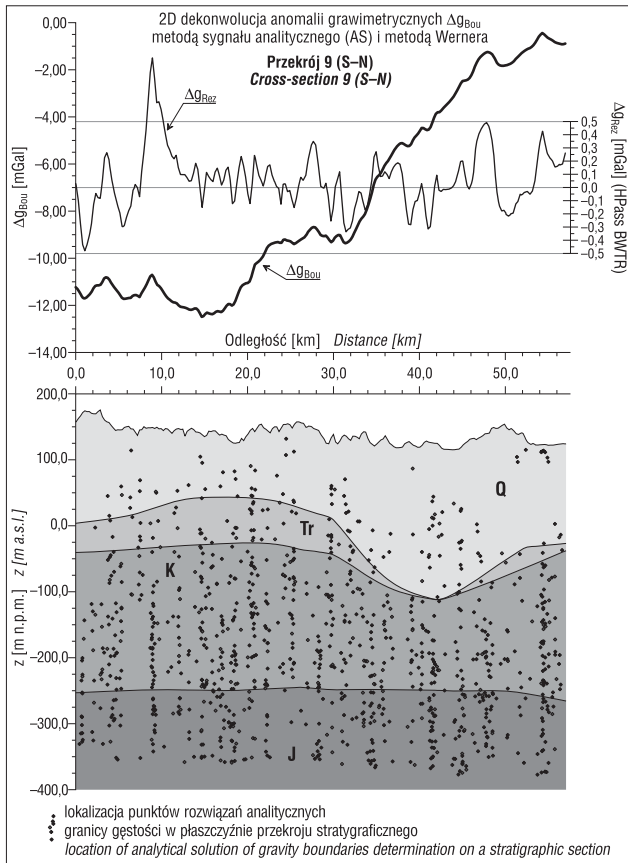


Fig. 7. Wyniki 2D dekonwolucji anomalii grawimetrycznych wzdłuż przekroju hydrogeologicznego 9

Fig. 7. Results of 2D deconvolution of gravity anomalies along hydrogeological cross-section 9

wodoprzepuszczalnych (o niższej gęstości) w profilu litologicznym czwartorzędu. Konfrontacja z mapą rozkładu anomalii rezydualnych pokazała, że znacząca większość otworów wiertniczych, w których udział osadów przepuszczalnych w profilu czwartorzędu jest wyższy niż 50%, lokuje się w ujemnych strefach anomalnych.

Dane uzyskane z interpretacji sondowań geoelektrycznych uszczegółowiły wyniki analizy grawimetrycznej (ryc. 6.) i w powiązaniu z danymi otworowymi umożliwiły dokładne odwzorowanie budowy geologicznej i rozkład parametrów hydrogeologicznych w modelowanym obszarze bilansowym zlewni Biebrzy.

Elementem ilościowym prac interpretacyjnych były dekonwolucje pola siły ciężkości, wykonane w celu wyznaczenia współrzędnych granic nieciągłości. Rycina 7 pokazuje wyniki dekonwolucji 2D pola anomalnego wzdłuż przekroju hydrogeologicznego 9 (ryc. 1). Położenie horyzontów stratygraficznych na przekroju wyznaczono na podstawie map morfologii tych horyzontów.

WNIOSKI

Na podstawie interpretacji pomiarów geoelektrycznych rozpoznano zasięg przestrzenny zróżnicowanych oporowo kompleksów geologicznych, który zobrazowano na przekrojach geoelektrycznych w postaci zmiennych kompleksów geoelektrycznych. Na ich podstawie wykonano warstwy informacyjne GIS jako dane wsadowe do numerycznego modelu hydrogeologicznego zlewni Biebrzy.

Posługując się mapą rozkładu anomalii rezydualnych wyznaczono rozkład anomalii ujemnych, które identyfikuje się ze strefami o zwiększonej miąższości utworów wodonośnych. Jednocześnie ze strefami anomalii ujemnych wiąże się występowanie w profilu utworów kenozoiku osadów charakteryzujących się wyższymi wartościami współczynnika filtracji.

Autorzy pragną serdecznie podziękować recenzentowi – dr. hab. inż. Jackowi Szczepińskiemu, za poświęcony czas oraz cenne uwagi do artykułu. Badania geofizyczne wykonano w trakcie sporządzania dokumentacji hydrogeologicznej w celu ustalenia zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych zlewni Biebrzy (numer projektu: 23.8100.1301.00.1). Zleceniodawcą zadania jest Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, a fundatorem Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

LITERATURA

- DANIEL-DANIELEWSKA B., KRÓLIKOWSKI C., TWAROGOWSKI J. 1982 – Opracowanie wyników badań geofizycznych i zdjęć lotniczych przy rozpoznawaniu warunków hydrogeologicznych czwartorzędu na Suwalszczyźnie. NAG Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.
- GRYCKO M., MUSIATEWICZ M. 1985 – Dokumentacja badań geofizycznych, temat: Ocena odnawialności wód podziemnych na obszarze Suwalskiego Zagłębia Rud Żelaza. NAG Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.
- KACPRZAK L., KACPRZAK I. 2017 – Dokumentacja wyników badań geoelektrycznych wykonanych 398 sondowań elektrooporowych (SGE) w celu rozpoznania budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych dla obszaru bilansowego zlewni Biebrzy. NAG Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.
- KRÓLIKOWSKI C. 2004 – Analiza jakościowa i ilościowa istniejących danych grawimetrycznych (krajowe na lądzie i na morzu oraz obszarów przyległych). NAG Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.
- KRÓLIKOWSKI C., PETECKI Z. 1995 – Atlas grawimetryczny Polski, 1 : 500 000 i 1 : 750 000. Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.
- KRÓLIKOWSKI C., TWAROGOWSKI J. 1991 – Mapa rozkładu gęstości skał występujących nad poziomem morza w Polsce. Kwart. Geol., 35 (3): 371–382.
- MARGUL B., CZERWIŃSKI T., GRYCKO M. 1982 – Dokumentacja badań geofizycznych, temat: Ocena odnawialności wód podziemnych na obszarze Suwalskiego Zagłębia Rud Żelaza (w zakresie prac metodycznych). NAG Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.
- MARGUL B. 1982 – Sprawozdanie techniczne z opracowania map grawimetrycznych dla tematu: Odnawialność wód na Suwalszczyźnie – Obniżenie Szeszupy. NAG Państw. Inst. Geol.-PIB, Warszawa.
- NUMERYCZNY Model Terenu 2015 – <http://www.codgik.gov.pl/index.php/darmowe-dane/nmt-100.html> – dostęp 23.06.2017 r.