

Marek Kachnic

WYZNACZANIE ZASIĘGU MIĘDZYMORENOWYCH WARSTW WODONOŚNYCH W SKALI PROBABILISTYCZNEJ W WYBRANYM FRAGMENTCIE POJEZIERZA POMORSKIEGO

NONPARAMETRIC EVALUATION OF THE CONFINED AQUIFER EXTENT EXEMPLIFIED ON THE POMERANIA LAKELAND QUATERNARY STRATA

Słowa kluczowe: wody podziemne, skala nieparametryczna, skala probabilistyczna, teoria Dempstera-Shafera, zbiory rozmyte, IDRISI, GIS

Key words: aquifer system, nonparametric scale, probabilistic scale, Dempster-Shafer theory, fuzzy logic, groundwater, IDRISI, GIS

Abstract: The research aimed to develop a technique of analyzing data for the determination of the confined aquifers extent. The extent of the aquifers was shown in a nonparametric (probabilistic) scale.

Data analyses were carried out in the Geographic Information System with help of IDRISI 32 release 2 software. The Dempster-Shafer probability theory supported by the module BELIEF of IDRISI was applied to the algebra of pixel maps. The geology of study area is mainly composed of the Quaternary postglacial sediments. The study area comprises one unconfined aquifer and four main confined aquifers. In these paper the analysis of confined aquifers was presented. The image showed the map of the aquifers' extents in a probabilistic scale i.e. in a range between 0 (the lack of the aquifer) and 1 (confirms the occurrence of the aquifer).

1. WSTĘP

Kartograficzne opracowania geologiczne i hydrogeologiczne przedstawiają budowę geologiczną obszaru badań w formie map i przekrojów będących rezultatem pracy zespołu autorskiego. Zróżnicowana jest jednak ilość i jakość danych użytych do przygotowania takich opracowań. O występowaniu „słabo rozpoznanych” fragmentów mapy najlepiej zorientowany jest zespół autorski, ale zwykle nie ma miejsca na przedstawienie tego w pracy. Natomiast dla czytelnika spoza zespołu autorskiego, szcze-

gólnie niezwiązanego z branżą geologiczną, wyszukanie słabo udokumentowanych fragmentów opracowania jest trudne lub wręcz niemożliwe. Pomocna byłaby tu uzupełniająca warstwa informacyjna, która przedstawiałaby wartość czytanej mapy pod kątem ilości i jakości danych wykorzystanych do jej opracowania. Ponieważ jakość danych jest parametrem trudno opisywalnym, uzasadnione byłoby wykorzystanie do konstrukcji takiej mapy metod bazujących na logice rozmytej.

Zbliżony problem występuje wraz z coraz częstszym wykorzystaniem metod geoinformacyjnych do konstrukcji nowych warstw infor-

macyjnych. Możliwości, jakie oferuje GIS wykorzystywane są do licznych zadań, w tym do analiz ułatwiających podejmowanie decyzji. Jak dotąd w metodach tych dominują przekształcenia danych na mapach metodą obliczeń za pomocą klasycznych reguł De Morgana. Są to działania dodawania, odejmowania, mnożenia zbiorów realizowane wg logiki klasycznej opartej na dychotomii (prawda/fałsz). Niestety metody te narzucają sztuczną dokładność na nieprecyzyjną z natury informację, nie informują użytkownika o niedokładności lub błędzie i nie są zgodne z ludzkim postrzeganiem i procesem myślenia, które jest generalnie związane z niedokładnością (Leung i in. 1993). W celu zminimalizowania tych wad coraz częściej wykorzystuje się sposoby przetwarzania danych oparte na logice rozmytej lub ogólniej – na metodach logik wielowartościowych (*multivalued logic*).

Prezentowany artykuł jest rozwinięciem zagadnienia referowanego na sympozjum „Współczesne problemy hydrogeologii” w Jastrzębiej Górze (Kachnic 2003). Przedstawiono wówczas metodykę wyznaczenia zasięgu warstwy wodonośnej o zwierciadle swobodnym. Badania współfinansowano z grantu KBN nr 3 P04D 05223 pt. „Rozpoznawanie warunków hydrogeologicznych z wykorzystaniem metod GIS” realizowanego w latach 2002–2003 i są częścią pracy doktorskiej wykonanej pod kierunkiem prof. dr. hab. A. Sadowskiego (Kachnic 2002).

1.1. CEL BADAŃ

Celem badań było opracowanie procedur analizy danych hydrogeologicznych do określenia w skali probabilistycznej zasięgu występowania międzymorenowych warstw wodonośnych w wybranym obszarze badań. W pracy analizowano wybór identyfikatorów, które najlepiej oddawałyby obecność i zasięg warstwy wodonośnej.

Zastosowana procedura wykorzystuje założenia teorii Dempstera-Shafera, będącej rozszerzeniem teorii prawdopodobieństwa Bayesa (Shafer 1976; Klir i Yuan 1997; Eastman 1999). Procedurę przygotowano za pomocą aplikacji komputerowych z pakietu rastrowych programów systemu informacji przestrzennej (GIS).

1.2. OBSZAR BADAŃ

Algorytm analizy danych testowano na danych z obszaru o powierzchni 1300 km² położonego we wschodniej części Pojezierza Pomorskiego. Obszar badań wyznaczają granice czterech arkuszy Mapy hydrogeologicznej Polski w skali 1:50 000. Są to arkusze: Osiek (Grdeń, Nikadon 1998), Zblewo (Krawiec, Kachnic 1998); Stara Kiszewa (Kreczko 2000) i Łąg (Prussak 2000).

Teren badań jest obszarem młodoglacjalnym. Wysokości bezwzględne terenu wahają się od 155 m n.p.m. w części północno-zachodniej do 85 m n.p.m. w części południowo-wschodniej, w dolinie Wdy. W rejonie badań stwierdzono występowanie warstw wodonośnych w osadach kenozoiku. Przy czym tylko piętro wodonośne plejstocenu jest rozpoznane i jest głównym użytkowym piętrem wodonośnym w tym rejonie. Składa się ono z warstwy wodonośnej o zwierciadle swobodnym i kilku międzymorenowych warstw wodonośnych o zwierciadle napiętym (ibidem, Kachnic 2003).

2. METODYKA

Źródłem danych były rekordy bazy danych o obiektach punktowych z Mapy hydrogeologicznej Polski w skali 1:50 000. Program realizujący obliczenia wg teorii Dempstera-Shafera przelicza dane zapisane jako macierz pikseli (tzw. obraz rastrowy), co oznacza, że opracowywane dane (jako warstwy informacyjne) muszą być zapisane w tej postaci. Przy wielkości piksela ustalonym na 100x100m obszar badań został podzielony na macierz zbudowaną z 132 096 elementów (384 wiersze i 344 kolumny). Do realizacji zadania wykorzystano program IDRSI 32 ver. 2 pracujący w systemie operacyjnym WINDOWS. Wybór programu podyktowany był rozbudowanymi możliwościami analitycznymi tej aplikacji i zestawem podprogramów dostosowanych do założeń teorii Dempstera-Shafera umożliwiających przekształcenia danych zgodnie z tą teorią. Teoria Dempstera-Shafera wykorzystuje skalę probabilistyczną i operuje pojęciem prawdopodobieństwa. Prawdopodobieństwa nie inter-

pretuje się tu w kryteriach częstości i zdarzeń losowych, ale jako subiektywne przekonanie o stopniu dopasowania dowolnego miejsca w obszarze badań do „zbioru” informacji o obecności warstwy wodonośnej.

2.1. DOBÓR DANYCH WEJŚCIOWYCH

Weryfikację hipotezy o występowaniu lub braku warstwy wodonośnej o zwierciadle napiętym, w dowolnym punkcie na mapie, oparto na informacjach z profili otworów wiertniczych i studziennych. W przeciwieństwie do warstwy wodonośnej o zwierciadle swobodnym (Kachnic 2003) w poziomach wodonośnych o zwierciadle napiętym znacznie trudniej znaleźć wskaźniki takiej warstwy. Pomocne mogą być jedynie zdjęcia geofizyczne i wyniki próbnych pompowań w reżimie nieustalonym, ale dla analizowanego obszaru odpowiednich badań nie prowadzono.

Właściwa analiza międzymorenowych warstw wodonośnych wymaga uwzględnienia ich wielopoziomowości. Najczęstszym sposobem analizy obiektów wielopoziomowych w klasycznych pakietach programowych SIP (GIS), analizujących macierze dwuwymiarowe, jest rozpozniomowanie piętra wodonośnego na oddzielne warstwy wodonośne (tomografia obiektu).

Wielopoziomowość warstw wodonośnych piętra plejstocenijskiego w obszarze badań jest pośrednim rezultatem kolejnych zlodowaceń, w tym głównie etapów postojów recesyjnych lądolodów. Serie osadowe, przedzielające gliny morenowe, zbudowane są głównie z osadów piaszczysto-żwirowych złożonych przez wody roztopowe (Galon 1967). Wśród **kopalnych** form akumulacji okruczowej główny udział w budowie wodonośnych poziomów o zwierciadle napiętym mają pogrzebane formy wodnolodowcowe, jak kopalne sandry lub pogrzebane rynny subglacjalne, a także wypełnione osadami piaszczystymi formy akumulacji rzecznej w postaci dolin kopalnych. Osady sandrowe, wypływające ze strefy krawędziowej lodowca, tworzą kolektor wody zalegający w pewnym przedziale wysokości względnej, nachylony w kierunku pierwotnego odpływu wód proglacjalnych. Z powodu braku szczegółowych prac o zaleganiu międzymorenowych poziomów wodonośnych w obszarze badań przyjęto, że po-

grzebane warstwy osadów fluwioglacjalnych ułożone są poziomo¹.

Przegląd materiałów geologicznych z obszaru badań nie daje podstaw do wyznaczenia dolin kopalnych lub rynien subglacjalnych, które należałoby analizować oddzielnie. Biorąc pod uwagę powyższe, przyjęto, że warstwy wodonośne o zwierciadle napiętym są w obszarze badań kopalnymi sandrami, a kluczem do interpretacji i właściwego przedstawienia zasięgu wystąpienia tych osadów jest analiza wysokości ich zalegania. Do wytypowania na przekroju poziomów wodonośnych o zwierciadle napiętym wykorzystano wartości rzędnych środka warstwy wodonośnej, pobrane z rekordów bazy danych².

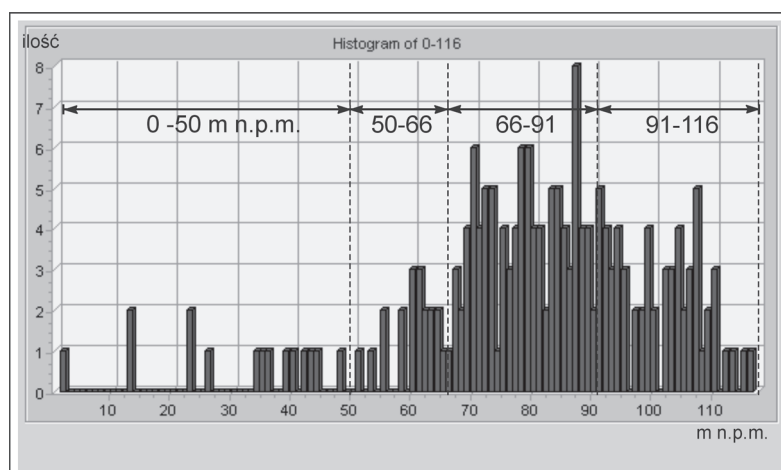
Weryfikacja hipotezy zasięgu występowania poziomów wodonośnych o zwierciadle napiętym została oparta na informacjach hydrogeologicznych z punktów rozpoznania warstw wodonośnych o zwierciadle napiętym, tj. studzien, otworów bez opróbowania hydrogeologicznego oraz z otworów bez stwierdzonych warstw wodonośnych, a także studzien, w których po pogłębieniu otworu poniżej płytszej warstwy wodonośnej, nie natrafiono na inne warstwy wodonośne.

W obszarze badań występuje wielowarstwowy system wodonośny. Do analizy takiego systemu w aplikacjach komputerowych wciąż konieczny jest jego podział na oddzielne warstwy zalegające w przyjętych przedziałach wysokościowych względem poziomu morza. Na ryc. 1 przedstawiono zakresy występowania wytypowanych głównych warstw wodonośnych na tle histogramu rzędnej środka tych warstw³. Wyznaczono 4 główne warstwy wodonośne. Najgłębsza zalega w szerokim przedziale wysokości od 0 do 50 m n.p.m., wyżej zalega warstwa występująca w interwale wysokości od 50 do 66 m n.p.m. Kolejną jest warstwa wodonośna w przedziale wysokości od 55 do 91 m n.p.m. Ostatnia, najpłytsza warstwa, zalega powyżej 91 m n.p.m.

¹ Budowa modelu rozciągłości i zalegania kopalnych sandrów wymaga bardziej wnikliwych badań.

² W przypadku studzien niezupełnych analizowano rzędną ich dna.

³ Histogram wykonano na podstawie analizy numerycznej map pikselowych. Uniknięto w ten sposób przeszacowań częstości występowania warstwy wodonośnej powstających przy budowie histogramów na podstawie rekordów z bazy danych. Zdarza się to, gdy w bliskim sąsiedztwie występuje kilka lub kilkanaście studzien ujmujących tę samą warstwę wodonośną.



Ryc. 1. Histogram rzędnej środka warstwy wodonośnej w studniach i otworach bez opróbowania hydrogeologicznego z wydzielonymi przedziałami wysokości zalegania głównych warstw wodonośnych

Fig. 1. Statistical distribution of elevation of center of aquifer in wells and boreholes in [m] a.s.l.

Na podstawie informacji z bazy danych o obiektach punktowych rozpoznania warstwy wodonośnej przygotowano dla każdej warstwy następujące cząstkowe mapy pikselowe:

- mapę zasięgu występowania warstwy wodonośnej w pobliżu studzien i otworów bez opróbowania hydrogeologicznego,
- mapę braku warstwy wodonośnej w pobliżu negatów hydrogeologicznych oraz studzien pogłębionych,
- mapę zasięgu występowania regularnie zalegających fragmentów warstwy wodonośnej.

Przygotowanie pierwszych dwóch map cząstkowych oparte było na metodzie zbliżonej do zastosowanej dla poziomów wodonośnych o zwierciadle swobodnym (Kachnic 2003). Po analizie przekrojów hydrogeologicznych z obszarów Niżu Polskiego, ustalono promień strefy występowania warstwy wodonośnej wokół studzien i otworów bez opróbowania hydrogeologicznego na 300 [m]. W tym promieniu wartość prawdopodobieństwa zmniejsza się liniowo do wartości tła. Tę samą wielkość promienia (300 m) przyjęto w przypadku braku warstwy wodonośnej.

Konstrukcja ostatniej mapy cząstkowej wymaga nieco szerszego omówienia. Na badanym obszarze występują rozległe, regularnie zalegające warstwy wodonośne, których zaleganie można łatwo określić na podstawie wzrokowej analizy położenia filtra studziennego w otworze z wykorzystaniem zwykłej korelacji geometrycz-

nej. Trudno jednak ustalić reguły, według których algorytm komputerowy byłby w stanie „nauczyć się” wyznaczania takich warstw lub ich jednorodnych fragmentów. W celu określenia kryteriów, które umożliwiłyby wyznaczanie zasięgu takich warstw, metodami analizy danych w systemach geoinformacyjnych, wykorzystano parametry statystyczne położenia środka warstwy wodonośnej (odchylenie standardowe rzędnej środka warstwy), a także wskaźnik zmienności parametrów hydrogeologicznych wg klasyfikacji Krasnego (1993).

Krasny (1993) przedstawia zmienność hydrogeologiczną środowiska sedymentacji, analizując wydajność jednostkową otworu. Zmienność tę wiąże jednak tylko ze zmiennością parametrów hydrogeologicznych. W niniejszej pracy założono dodatkowo korelację pomiędzy zmiennością parametrów hydrogeologicznych i geometryczną anizotropią poziomu wodonośnego. Założono, że zmienne warunki sedymentacji generują dużą zmienność facjalną osadów, a tym samym duży zakres zmienności parametrów hydrogeologicznych. Natomiast mało zmienne warunki sedymentacji stwarzają korzystne warunki do powstania warstw osadów jednorodnych, pod względem geometrii i własności hydraulicznych. Zasięg „mało zmiennych” fragmentów warstwy wodonośnej można wówczas szacunkowo określić na podstawie zbioru punktów z pomiarami położenia warstwy, zawartymi w ustalonym przedziale ufności. Szerokość prze-

działu ufnoci będzie zależec wówczas od oznaczonej zmienności parametrów hydraulicznych.

W celu przygotowania mapy zasięgu „regularnie-zalegającej” warstwy wodonośnej obliczono wskaźnik wydajności jednostkowej Y_q (wzór 1), uwzględniający logarytmiczno-normalny rozkład wydajności jednostkowej „q”.

$$Y_q = 6 + \log q \quad (1)$$

gdzie: q – wydajność jednostkowa w [m³/h]

Korzystając ze wskaźnika Y_q , określono typ zróżnicowania środowiska hydrogeologicznego, przyjmując klasy zmienności zaproponowane przez Krasnego (Witczak i in. 1999).

W rozpatrywanych warstwach wodonośnych występuje duża i średnia zmienność warunków hydrogeologicznych. W tej sytuacji, celem wy-

znaczenia zasięgu warstwy zalegającej „regularnie”, przyjęto do analiz tylko te studnie, w których rzędna środka warstwy wodonośnej mieściła się w przedziale ± 1 odchylenie standardowe (δ). Przykładowo dla warstwy wodonośnej z przedziału 50–66 m n.p.m. korzystano tylko z tych punktów, w których rzędna środka warstwy wodonośnej mieściła się w przedziale $60 \pm 5,1$ m n.p.m. Zasięg występowania warstwy wodonośnej przedstawiono za pomocą stref o promieniu 3000 m wokół wybranych punktów. Wymiar strefy określono subiektywnie na podstawie optycznego porównania wyników z przekrojami hydrogeologicznymi arkuszy MhP.

Z uwagi na ukształtowanie terenu z mapy wynikowej zasięgu najpłytszej warstwy wodonośnej wykluczono obszar, gdzie powierzchnia terenu obniża się do wysokości 90 m n.p.m. (patrz ryc. 2d).

Tabela 1. Opis statystyczny zmienności położenia środka warstw wodonośnych

Table 1. Statistical analysis of aquifers

WARSTWA OD–DO w m n.p.m.	ŚREDNIA WARTOŚĆ ŚRODKA WARSTWY [m] n.p.m.	ODCHYLENIE STANDARDOWE (δ)	LICZEBNOŚĆ ZBIORU	ŚREDNI Y_q	ODCHYLENIE STANDARDOWE Y_q	ZMIENNOŚĆ PARAMETRÓW HYDROGEOLOG.
[0–50)	31	13,5	14	6,2	0,70	duża
[50–66)	60	5,1	23	6,6	0,61	duża
[66–91)	79,3	6,9	111	6,8	0,47	Średnia
≥ 91	100,0	6,74	73	6,5	0,6	Średnia/duża

2.2. ETAP OBLICZEŃ

Wszystkim komórkom macierzy reprezentującej obszar badań przypisano na początku wartość prawdopodobieństwa równą wartości środkowej z przedziału domkniętego $\langle 0, 1 \rangle$, czyli 0,5. Tak założona wartość początkowa, oddaje brak danych, zarówno o występowaniu warstw wodonośnych, jak i ich braku.

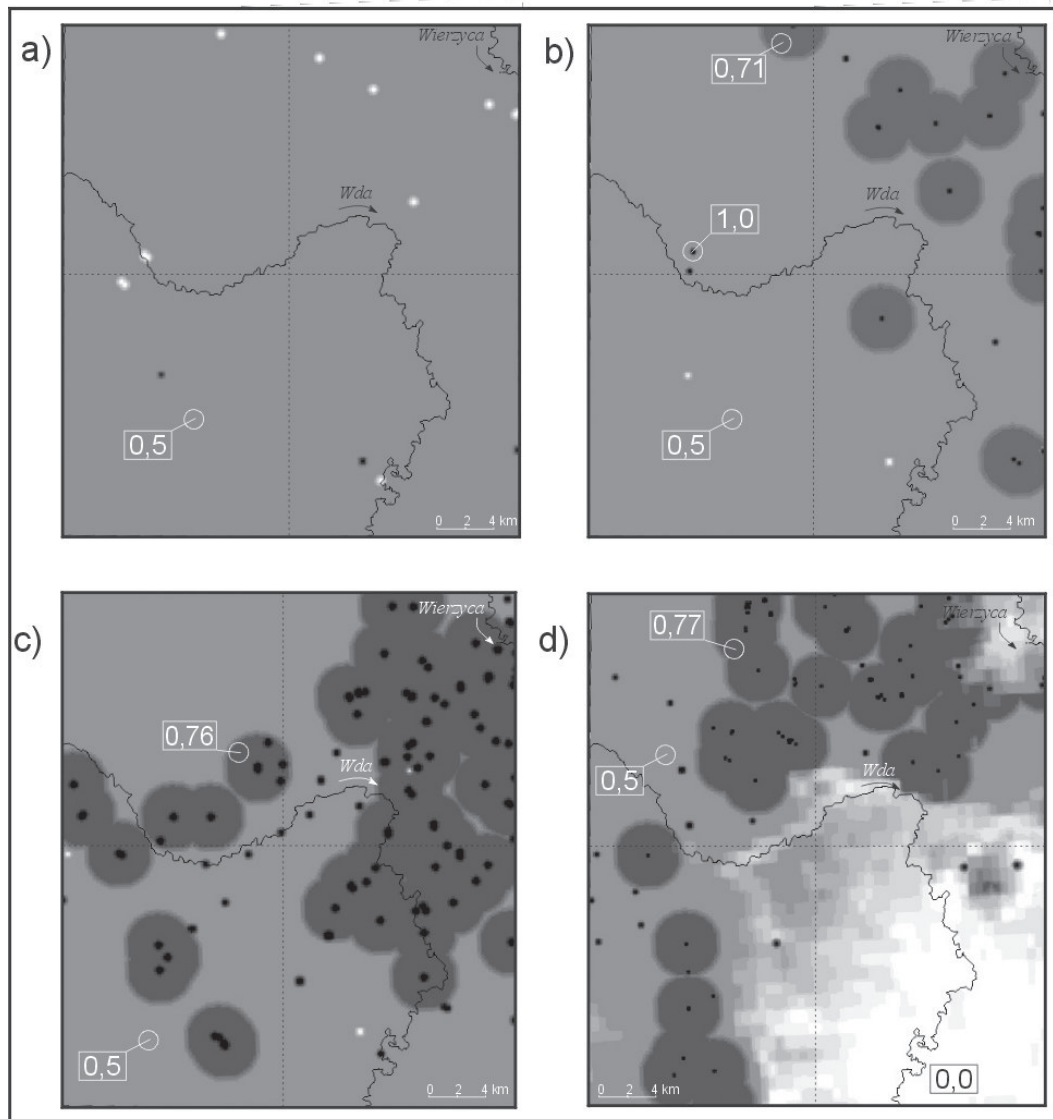
Przygotowane mapy pikselowe, które przedstawiały informacje zaprzeczające i potwierdzające występowanie warstwy wodonośnej zostały wprowadzone do modułu obliczeniowego BELIEF programu IDRISI. Moduł BELIEF umożliwia zbudowanie „bazy wiedzy”, według której jest generowana mapa wynikowa na podstawie formuły obliczeniowej Dempstera-Shafera. Na

ryc. 2. przedstawiono uzyskane mapy⁴ prawdopodobieństwa analizowanych warstw wodonośnych o zwierciadle napiętym. Mapy wynikowe przedstawiają prawdopodobieństwo wystąpienia warstwy w skali z przedziału liczbowego od 0 (potwierdzony badaniami brak warstwy wodonośnej w punkcie) do 1 (obecność warstwy wodonośnej potwierdzona badaniami). Wartości prawdopodobieństwa z przedziału od 0,1 do 0,49 oznaczają niewielką szansę wystąpienia warstwy wodonośnej, a od 0,51 do 0,99 wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia warstwy

⁴ Praktycznie mapa ta jest czytelna tylko w wersji kolorowej. Kolorową wersję tej mapy można obejrzeć na stronie internetowej http://www.uni.torun.pl/~kach/art2/mapa_wynikowa.jpg.

wodonośnej. Wartość środkowa z przedziału [0, 1] jest odpowiednikiem „białej plamy” na

mapach, czyli oznacza brak informacji o badanym obiekcie.



Ryc. 2. Mapy wynikowe z zasięgiem probabilistycznym warstwy wodonośnej o zwierciadle napiętym

Fig. 2. The results maps with probabilistic extend of confined aquifer

a) Najgłębsza warstwa wodonośna z przedziału rzędnych 0–50 m n.p.m.; b) warstwa z przedziału 50–66 m n.p.m.; c) warstwa z przedziału 66–91 m n.p.m.; d) warstwa zalegająca powyżej 91 m n.p.m. W ramkach podano obliczoną przez program wartość prawdopodobieństwa.

3. PODSUMOWANIE

Do określenia zasięgu międzymorenowych warstw wodonośnych o zwierciadle napiętym wykorzystano założenia logiki rozmytej oraz teorię prawdopodobieństwa Dempstera-Shafera. Danymi źródłowymi były informacje z rekordów

bazy danych Mapy hydrogeologicznej Polski w skali 1:50000 odnoszące się do obiektów punktowych rozpoznania warstwy wodonośnej (studzien, otworów wiertniczych i innych punktów rozpoznania hydrogeologicznego).

W wyniku przekształceń danych wejściowych uzyskano zestaw map pikselowych przedstawiających w skali wskaźnikowej od 0 do 1

prawdopodobieństwo wystąpienia warstwy wodonośnej w analizowanym przedziale wysokości. Uzyskany wynik pozwala na ilościową ocenę zasięgu głównych warstw wodonośnych. Decydent może, z pomocą takiej warstwy informacyjnej, określić szanse obecności warstw wodonośnych poprzez ilość informacji, które ją potwierdzają.

Zaletą przedstawionego sposobu informowania o „stanie wiedzy” badanego obszaru jest liczbowe opisanie stanu rozpoznania geologicznego. Za pomocą map tego typu można poinformować

czytelnika o brakach rozpoznania hydrogeologicznego na mapie, szczególnie wobec niewygodnej konieczności wypełnienia treścią całego arkusza mapy hydrogeologicznej (nawet przy braku dostatecznej ilości danych).

W celu zastosowania opisanej metody na szerszą skalę, konieczne jest opracowanie przez zespół ekspertów reguł normalizacji (fuzyfikacji) na podstawie wystarczających zbiorów danych i dobranie funkcji przynależności do specyficznych warunków poszczególnych regionów kraju.

LITERATURA

- EASTMAN J. R., 1999 – Decision Support, [w:] Guide to GIS and Image Processing, vol. 2, pp. 43 Clarc University.
- GALON R., DYLIK J., (red.), 1967 – Czwartorzęd Polski, PWN, Warszawa, s. 113.
- GRDEŃ J., NIKADON Z., 1998 – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami, ark. Osiek, maszynopis, Arch. PIG, Warszawa.
- KACHNIC M., 2002 – Wyznaczanie zasięgu warstw wodonośnych, metodami analizy danych w systemie informacji przestrzennej (SIP) na przykładzie wybranego rejonu Pojezierza Pomorskiego, praca doktorska, Arch. UMK, Toruń.
- KACHNIC M., 2003 – Wyznaczanie zasięgu warstwy wodonośnej w skali probabilistycznej w wybranym fragmencie Pojezierza Pomorskiego, Materiały X Sympozjum „Współczesne problemy hydrogeologii”, Jastrzębia Góra, s. 327–334.
- KLIR G. J., YUAN B., 1997 – Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications. Upper Saddle River, NJ Prentice Hall, [w:] Malczewski J., 1999 – GIS and Multicriteria Decision Analysis, John Wiley&Sons Inc.
- KRASNÝ J., 1993 – Classification of Transmissivity Magnitude and Variation, Ground Water (2), pp. 230–236.
- KRAWIEC A., KACHNIC M., 1998 – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami, ark. Zblewo, maszynopis, Arch. PIG, Warszawa.
- KRECKO M., 2000 – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami, ark. Stara Kiszewa, maszynopis, Arch. PIG, Warszawa.
- LEUNG Y., LEUNG K. S., 1993 – An intelligent expert system shell for knowledge-based geographical information system, International Journal of Geographical Information Systems, 7 (3), s. 189–213.
- PRUSSAK E., 2000 – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 wraz z objaśnieniami, ark. Łąg, maszynopis, Arch. PIG, Warszawa.
- SHAFER G., 1976 – Mathematical theory of evidence, Princeton University Press, Princeton NJ.