

WSPÓŁCZESNE KONCEPCJE KLASYFIKACJI I OCENY ZASOBÓW WÓD PODZIEMNYCH

UKD 556.34.001.33.072:553.048:681.3.06

Ocena zasobów wód podziemnych jest tą częścią działalności praktycznej, z którą hydrogeolog spotyka się najczęściej i której dokonanie jest przeważnie końcowym efektem przeprowadzonych badań hydrogeologicznych. Mimo że ocena zasobów jest tak ważną pozycją badań do chwili obecnej nie opracowano jednolitej klasyfikacji tych zasobów, a także klasyfikacji metod ich ustalania. Fakt ten nie świadczy jednak o słabości hydrogeologii, ale wręcz przeciwnie — jest dowodem stałego rozwoju tej dziedziny nauk geologicznych żywo reagującej na zmiany metodologii badania zjawisk przyrodniczych.

W klasyfikacji hydrogeologii, opartej na przyjęciu modelu tzw. **ustalonego przepływu wód podziemnych**, odróżniano trzy podstawowe rodzaje zasobów: **zasoby statyczne** — definiowane jako objętość wody wolnej, znajdującej się w strefie wodonośnej, **zasoby dynamiczne** — definiowane jako wydatek strumienia wód przepływających przez strefę wodonośną, utożsamiany z wydatkiem źródeł zasilających i **zasoby eksploatacyjne** — definiowane jako ilość wody podziemnej, którą można czerpać ze strefy wodonośnej w sposób racjonalny pod względem ekonomiczno-technicznym i przyrodniczym (12).

Obiektem badań zasobowych są w tej koncepcji kompleksy osadów wodonośnych tworzących warstwy i poziomy wodonośny. Szereg poziomów wodonośnych porozidzielanych osadami wodoszczelnymi, z ewentualnie występującymi w ich obrębie tzw. oknami hydrogeologicznymi lub sedymentacyjnymi tworzy w profilu pionowym **piętro osadów wodonośnych**, a w rozprzestrzenieniu poziomym — **jednostkę hydrogeologiczną**. Zasoby jednostki hydrogeologicznej uważane są za superpozycję zasobów poszczególnych poziomów wodonośnych wchodzących w jej skład.

Największe trudności, jakie pojawiają się przy realizacji tej koncepcji, dotyczą przede wszystkim metod oceny zasobów eksploatacyjnych i oceny ich relacji z zasobami dynamicznymi, licznymi dla poszczególnych poziomów wodonośnych jako średni przepływ w wieloletiu. Przy eksploatacji następuje bowiem zaburzenie naturalnego układu hydraulicznego, które zmienia sposób zasilania i drenażu obserwowanego w warunkach naturalnych. Zmiany te dotyczą przede wszystkim: wielkości przyjmowanego zasilania przez infiltrację wód opadowych, wielkości przepływów „międzywarstwowych” oraz udziału wód zmagazynowanych. Ponadto pomijanie w tej koncepcji zdolności inercyjnych ośrodka wodonośnego powoduje, że stawiane prognozy przebiegu eksploatacji nie uwzględniają czynnika czasowego. W efekcie najczęściej przy szacunkach regionalnych popelnia się błędy in plus w ocenie zasobów, natomiast przy obliczeniach szczegółowych dla ujęć — błędy in minus.

W latach sześćdziesiątych nastąpił bardzo istotny rozwój podstaw teoretycznych i metodologii analizowania zjawiska przepływu wód podziemnych (16, 17). Rozwój ten wpływa decydująco na koncepcje definicji obiektów badań hydrogeologicznych i metod oceny zasobów wód podziemnych. Ostatnio w pracach

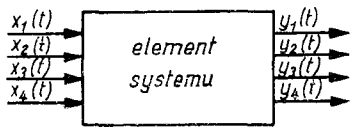
autorów amerykańskich i przede wszystkim francuskich (7, 8) zaczyna się coraz częściej pojawiać pojęcie tzw. **systemu wód podziemnych**. Jest to pojęcie zapożyczone z hydrologii (system hydrologiczny) (10) i jego zastosowanie pozwala na wykorzystanie przy analizie zjawisk hydrogeologicznych wielu rozwiązań z dziedziny cybernetyki (5, 17). Formalne zdefiniowanie koncepcji systemowego ujmowania jednostek hydrogeologicznych zostało po raz pierwszy przedstawione przez B. Kordasa w 1971 r. (6).

Założenia do systemowej koncepcji są jednak starsze; można je odnaleźć w poglądach nieżyjącego już prof. J. Gołąba z Uniwersytetu Warszawskiego, głoszonych jeszcze w latach pięćdziesiątych. Poglądy te streszcza cytując z jego pracy z 1964 r. (3) ...**„Konieczność uzyskania większej ilości wody podziemnej dla celów użytkowych uczyniła sprawę bilansu wód podziemnych najważniejszym zagadnieniem hydrogeologii. ...Ogromna komplikacja warunków hydrogeologicznych na obszarze Polski nie pozwala w większej mierze stosować wzorów, np. radzieckich, a równocześnie konieczność uchwycenia właściwej ilości wody podziemnej zmusza do przedstawiania bilansu w formie możliwie skończonej. Znany liczne przypadki, kiedy ilość wody pobieranej przez wodociągi nie odpowiada wyliczeniom... Aby uzyskać właściwy pogląd na tę sprawę, trzeba rozszerzyć podstawy bilansowania. Chodzi tu o takie czynniki, które z jednej strony mają decydujące znaczenie dla bilansu wód podziemnych i mogą być względnie dokładnie oznaczone oraz o usunięcie takich czynników, których waga jest mniejsza...**

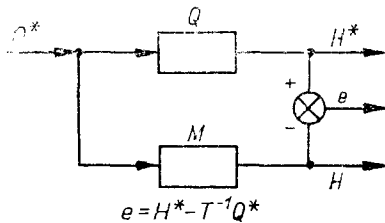
Przez bilans wód podziemnych rozumiemy wzajemny stosunek wód doprowadzonych do warstw zbiorczych i wód odprowadzonych, względnie mogących być odprowadzonymi. Bilansować możemy jedynie takie wody podziemne, które znajdują się w jednostce hydrogeologicznej. Przez jednostkę hydrogeologiczną rozumiemy zbiór zjawisk i faktów hydrogeologicznych powiązanych ze sobą.

Należy wyróżnić jednostki różnych rzędów... Z punktu widzenia hydrogeologicznego możemy kontynuować (w sensie geologicznym) uważać za jednostki pierwszego rzędu, główne struktury cyklu geologicznego za jednostki drugiego rzędu, poszczególne elementy danych struktur za jednostki wyższego rzędu..., wreszcie można doprowadzić do najmniejszej jednostki hydrogeologicznej, która składa się z obszaru zasilania..., dróg krążenia... i obszaru zbiorczego.

Aby uchwycić właściwy bilans wód podziemnych musimy znać układ bryły wodnej w skałach stałych... Taki układ nazywamy strukturą hydrogeologiczną, względnie hydrotektoniką... Ażeby uchwycić rzeczywisty bilans, musimy liczyć wody tego samego wieku (przy zasobach możemy łączyć wody różnych wieków). Jest to zagadnienie wieku wód, które nazywamy hydrostratygrafią, jako odpowiednik dla stratygrafii dla skał stałych... Aby oznaczyć wiek wody można używać wielu metod, ale najważniejsze są dwie: izotopowa i hydrodynamiczna”.



Ryc. 1. Ogólne przedstawienie elementu automatyki.
Fig. 1. General scheme of element of the automatics.



Ryc. 3. Koncepcje algorytmów identyfikacji modeli stacjonarnych jednostek hydrogeologicznych.

O — obiekt, M — model, T — macierz przewodności, Q — wektor zasilania, H — wektor funkcji naporu, gwiazdka T* oznacza, że parametry są znane.

Fig. 3. Concepts of identification algorithms for models of stationary hydrogeological units.

O — object, M — model, T — conductance matrix, Q — supply vector, H — vector of pressure function, asterix T* means that the parameters are known.

Pod pojęciem metody hydrodynamicznej J. Gołąb rozumiał obliczenie czasu, jaki upłynął od chwili infiltracji wody do momentu dostania się jej do obszaru zbiorczego, na podstawie równania Darcy'ego z uwzględnieniem porowatości efektywnej. Pojęcie jednostki hydrogeologicznej najniższego rzędu prof. Gołąba jest równoznaczne z pojęciem **strumienia wód podziemnych** wyznaczonego w przestrzeni przez przebieg powierzchni granicznych, w których wyróżnia się strefę zasilania i obszar drenażowy. Poziom wodonośny może tworzyć odrębny strumień lub być zbiorem mniejszych strumieni. W koncepcji prof. Gołąba ważną rolę odgrywało założenie ograniczonych możliwości mieszania się w warunkach naturalnych poszczególnych strumieni, co wiązało on z różnicami składu izotopowego wód różnowiekowych¹.

Rozpatrując jednostkę hydrogeologiczną najniższego rzędu prof. Gołąba, z punktu widzenia teorii systemów automatyki (5), można ją modelowo ująć z tw. **podstawowym elementem automatyki** zawierającym układ wejść, element systemu transformujący sygnały pojawiające się na wejściach oraz układ wyjść. Przedstawia to ryc. 1.

Opis matematyczny działania liniowego elementu automatyki mającego wiele wejść-wyjść, wyraża równanie zawierające tzw. macierz transmitancji $G(p)$

$$\bar{y}(p) = G(p) \bar{x}(p) \quad [1]$$

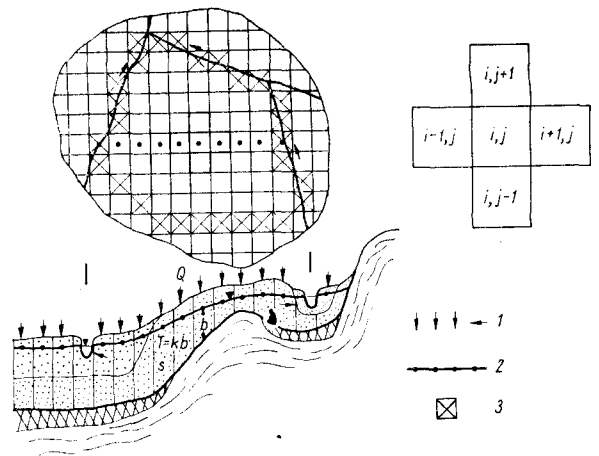
gdzie: $\bar{y}(p)$, $\bar{x}(p)$ — wektory transformacji sygnałów wejściowych i wyjściowych

p — parametr transformacji Laplace'a.

System może składać się z wielu elementów, które tworzą jego strukturę wewnętrzną. Modelowy opis działania tej struktury dla danej kombinacji wejść i wyjść jest zawarty w macierzy transmitancji.

Strumień wód podziemnych można rozpatrywać jako system składający się z wielu elementów. Elementem podstawowym jest blok o wymiarach $\Delta x \Delta y$. Dla ułatwienia przedstawienia opisu zajmie-

¹ Obecnie w Polsce badaniem zróżnicowania składu izotopowego wód podziemnych zajmuje się zespół doc. J. Dowgiałły z PAN.

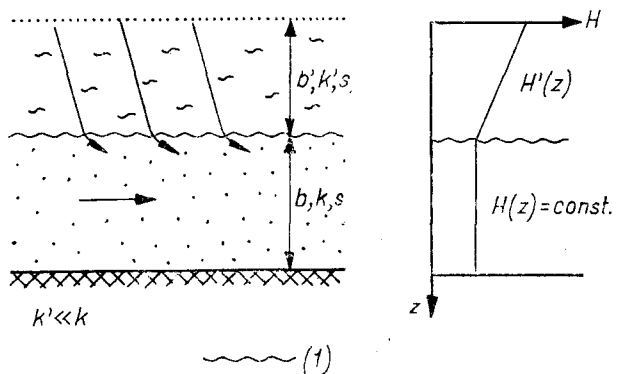


Ryc. 2. Schemat podziału na bloki strumienia „dwuwymiarowego”, jednostka prosta.

1 — „wejścia” do systemu, 2 — „wyjścia” z systemu, 3 — bloki brzegowe.

Fig. 2. Scheme of subdivision of „two-dimensional” stream into blocks; simple unit.

1 — „inputs” of the system, 2 — „outputs” of the system, 3 — marginal blocks.



Ryc. 4. Przykład granicy międzywarstwowej.

1 — granica międzywarstwowa, 2 — warstwa półprzepuszczalna, 2 — warstwa wodonośna, $H(z)$ — funkcja naporu hydraulicznego.

Fig. 4. Example of inter-layer boundary.

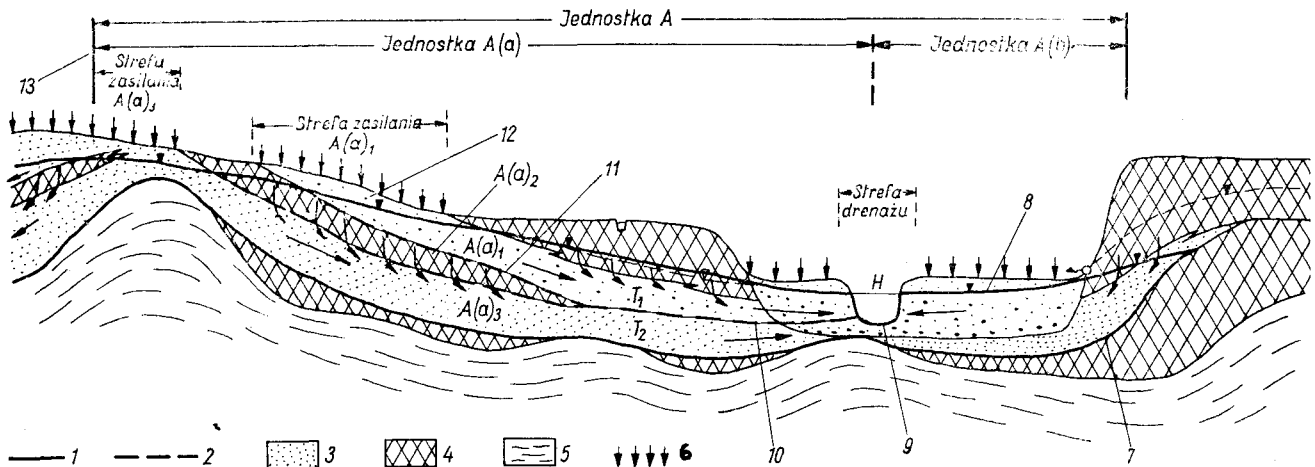
1 — inter-layer boundary, 2 — semipermeable layer, 2 — aquifer, $H(z)$ — function of hydraulic pressure.

my się tzw. strumieniem dwuwymiarowym, tj. takim, w którym zredukowano składową pionową przez wprowadzenie przewodności T ($T = k \cdot m$; gdzie: k — współczynnik filtracji, m — miąższość warstwy wodonośnej). Elementem podstawowym takiego strumienia jest blok o wymiarach Δx , Δy . W bloku tym są określone: przewodność T , współczynnik pojemności wodnej S , zasilanie ze źródeł zewnętrznych $Q(t)$ oraz wysokość naporu H/t (ryc. 2). Jeśli będziemy analizować średni stan przepływów przez ściany „bloku” w czasie $0,0 + t$ równanie bilansowe przedstawia się następująco:

$$\bar{T}_{j+1}, \bar{T}_{j-1}, \bar{T}_{i+1}, \bar{T}_{i-1} \left\{ \Delta \bar{H}_{j+1}, \Delta \bar{H}_{j-1}, \Delta \bar{H}_{i+1}, \Delta \bar{H}_{i-1} \right\}^T + \bar{Q} - \frac{\Delta x^2}{t} S H_{i,j}^* = 0 \quad [2]$$

gdzie:

\bar{T} — średnia przewodność pomiędzy blokami,
 $\Delta \bar{H}$ — różnica średniej wysokości naporu pomiędzy blokami,



Ryc. 5. Szkic prostej jednostki hydrogeologicznej typu dolinnego.

1 — granice zewnętrzne jednostki, 2 — granice wewnętrzne, 3 — osady wodonośne, 4 — osady półprzepuszczalne, 5 — osady zamknięte ze stałym przepływem zerowym, 6 — „zasilenie” — wejścia, 7 — granica zamknięta ze stałym przepływem zerowym, 8 — powierzchnia swobodna, 9 — granica otwarta z warunkami brzegowymi pierwszego rodzaju, 10 — granica zamknięta wewnątrz strumieni wód, 11 — granica międzywarstwowa, 12 — strefa przejściowa do systemów hydrologicznych (strefa aeracji), 13 — dział wód podziemnych, T — wiek wody.

Fig. 5. Sketch of simple hydrogeological unit of the valley type.

1 — external boundaries of the unit, 2 — internal boundaries of the unit, 3 — water-bearing deposits, 4 — semi-permeable deposits, 5 — impermeable deposits, 6 — „supply” — entrances, 7 — closed boundary with limit conditions of the first type, 8 — free surface, 9 — free surface with limit conditions of the first type, 10 — closed boundary inside water streams, 11 — inter-layer boundary, 12 — zone transitional to hydrogeological systems (aeration zone), 13 — underground watershed, T — age of water.

\bar{Q} — średnie zasilanie dodatnie lub ujemne (drenaż) ze źródeł zewnętrznych,

$H_{i,j}^*$ — różnica wysokości naporu w bloku bilansowym w czasie $0,0 + t$ ($H^* = H(t) - H(0)$),

S — współczynnik pojemności wodnej (zasobności sprężystej lub odsączalności).

Średnie w czasie są liczone jako średnie całkowite, np.

$$\bar{H} = \frac{1}{t} \int_0^t H(t) dt.$$

Jeśli jako wejście do elementu (bloku) uważać będziemy wielkość zasilania \bar{Q} , a jako wyjście przyjmiemy różnicę wysokości naporu $H_{i,j}^*$ i zbudujemy równania bilansowe dla wszystkich bloków (elementów), na które podzielono strumień, otrzymamy układ równań:

$$H^* = \frac{t}{\Delta x^2} S^{-1} (T\bar{H} + \bar{Q}) \quad [3]$$

gdzie:

H^* — wektor wyjść, czyli różnica wysokości naporu określonych w poszczególnych blokach w czasie $0,0 + t$, ($H^* = H(t) - H(0)$),

\bar{H} — wektor średniej wysokości naporu w czasie $0,0 + t$,

\bar{Q} — wektor wejść, czyli średniego zasilania ze źródeł zewnętrznych w czasie $0,0 + t$,

T — macierz przewodności, w przypadku strumienia dwuwymiarowego — pięciodiagonalna, w przypadku strumienia przestrzennego — siedmiodiagonalna,

S — macierz diagonalna współczynników pojemności wodnej,

Δx^2 — powierzchnia bloku rozpatrywana jako przypadek bloku kwadratowego,

t — czas, w którym przeprowadza się bilansowanie.

Transformując układ [3] metodą Laplace'a otrzymujemy jego postać:

$$H(p) = (T - \Delta x^2 p S)^{-1} Q(p) \quad [4]$$

gdzie:

$H(p), Q(p)$ — transformaty funkcji $H^*(t)$ i $Q^*(t)$,
p — parametr transformacji Laplace'a.

Łatwo zauważyć, że układ równań [4] jest bardzo podobny do układu [1]. Macierz $(T - \Delta x^2 p S)^{-1}$ spełnia w tym układzie rolę macierzy transmisji². Układ [3] przedstawia ogólną postać opisu matematycznego jednostki hydrogeologicznej prof. Gołaba ujętej według koncepcji systemowej i jest on równoważny zbudowaniu tzw. modelu parametrycznego tej jednostki (16).

Dla rozwiązywania problemów bilansowania jednostki hydrogeologicznej można korzystać z tzw. postaci bilansowej tego układu

$$\sum_{j=1}^n Q_{zj} + \sum_{j=1}^m Q_{dj} = \frac{A}{t} \sum_{j=1}^k S_j H_j^* \quad [5]$$

gdzie:

Q_{zj} — średni wydatek dopływu wody do jednostki, odniesiony do wycinka powierzchni konturującej jednostkę,

Q_{dj} — średni wydatek odpływu z jednostki, odniesiony do wycinka powierzchni konturującej jednostkę.

Człon występujący po prawej stronie równania [5] przedstawia sumę zmian zasobów zmagazynowanych w poszczególnych blokach (elementach jednostki) w okresie bilansowanym. Łatwo zauważyć, że jeśli jest analizowany długi odcinek czasu, tj. gdy $t \rightarrow \infty$ lub jeśli jest analizowany okres zamkniętego cyklu zmian położenia zwierciadła wody, tj. gdy $H(t) \approx H(0)$ we wszystkich punktach jednostki, w równaniach [3] i [5] redukują się człony zawierające współczynniki pojemności wodnej S i dla jednostki można przyjmować założenia przepływu ustalonego. Łatwo również zauważyć, że jeśli warunki te nie są spełnione, a bilansujemy jednostkę według koncepcji przepływu ustalonego, w bilansie pozostają nieuwzględnione czynniki związane ze zmianą zasobów zmagazynowanych. Najczęściej wchodzą one w zasilanie fałszując

² W przedstawieniu układu [4] pominięto element nieliniowy R i rozpatrujemy cały układ jako liniowy.

bilans. Jest to szczególnie groźne przy bilansowaniu jednostek zawierających powierzchnię swobodną, w których wielkość pojemności wodnej określa współczynnik odsączalności.

Bilansowanie jednostki hydrogeologicznej jest działaniem równoważnym do **identyfikacji** modelu opisanego równaniem [3]. Ogólny algorytm identyfikacji polega na badaniu izomorfizmu obiektu i modelu, czyli porównywaniu reakcji obiektu i modelu na te same bodźce. Mówimy, że model jest izomorficzny względem działania obiektu, jeśli reaguje identycznie na te same bodźce. Porównywane mogą być sygnały wejściowe, wyjściowe oraz razem: wejściowe i wyjściowe. W przypadku identyfikacji modeli jednostek hydrogeologicznych najczęściej porównuje się sygnały wyjściowe, czyli stan zwierciadła wody określony w różnych punktach jednostki. Ogólny algorytm identyfikacji przedstawiono na ryc. 3. Mówimy, że model jest zidentyfikowany, jeśli znajdziemy taki zbiór b parametrów hydrogeologicznych T i S , który spełnia następujący warunek (4, 15, 16):

przepływ nieustalony

$$N(b) = \left(1 / \sum_{i=1}^n w_i\right)^{1/2} \int_0^{+\infty} \left\{ \sum_{i=1}^n w_i [e_i(b, t)]^2 \right\}^{1/2} dt = mim \quad [6a]$$

przepływ ustalony

$$N(b) = \left\{1 / \sum_{i=1}^n w_i \sum_{j=1}^n w_j [e_j(b)]^2\right\}^{1/2} = mim \quad [6b]$$

gdzie:

w — wagi nałożone na poszczególne wyjścia,
 n — ilość wyjść.

Z punktu widzenia teorii systemów model zidentyfikowany na podstawie minimalizacji funkcji celu typu [6] jest modelem efektywnym obiektu według kryterium podobieństwa sposobu ich reakcji dla danej kombinacji wejść i wyjść, przy założonej strukturze wewnętrznej modelu. Optymalne podobieństwo tych reakcji można znaleźć także w tych przypadkach, gdy założona struktura modelu różni się od rzeczywistej struktury obiektu i przyjmowane parametry modelu mają charakter efektywny. Ważne jest tu, czy zidentyfikowany model będzie odzwierciedlał sposób reagowania obiektu dla innej kombinacji wejść i wyjść i dla innych sygnałów wejściowych niż te, przy których była przeprowadzona identyfikacja (16).

W systemowej koncepcji ujmowania jednostki hydrogeologicznej bardzo istotną rolę odgrywa zdefiniowanie charakteru granic jednostki. Odróżnia się następujące granice:

— **Granice otwarte**, przez które przepływ wody podziemnej może odbywać się swobodnie w obie strony, od i do jednostki. Charakter hydrauliczny działania takiej granicy określają tzw. **warunki brzegowe** pierwszego, drugiego i trzeciego rodzaju. Przykładem takich granic są: dno rzeki, wychodnia warstwy wodonośnej itp.

— **Granice zamknięte**, przez które nie następuje przepływ normalny wód podziemnych, np. granica z osadami nieprzepuszczalnymi. Jako specyficzną formę granicy zamkniętej można uważać granicę przebiegającą między dwoma strumieniami o wodach nie mieszających się. Granica taka zachowuje swój zamknięty charakter tylko w określonym reżimie hydraulicznym.

— **Granice międzywarstwowe**, otwarte, przebiegające pomiędzy ośrodkami o zdecydowanie różnym charakterze reżimu hydraulicznego, np. granica między warstwą wodonośną i półprzepuszczalną (ryc. 4).

— **Powierzchnia swobodna**, która jest granicą oddzielającą strefę aeracji od strefy saturacji, definiowana jako granica, na której ciśnienie jest równe ciśnieniu atmosferycznemu. Z punktu widzenia systemowej koncepcji ujmowania jednostek hydrogeologicz-

nych powierzchnia swobodna jest granicą jednostki charakteryzującą się zmiennym położeniem i ma właściwości granicy otwartej z warunkiem brzegowym drugiego rodzaju. Strefa aeracji jest strefą przejściową między systemem wód podziemnym i systemem wód powierzchniowych (systemy hydrologiczne).

Granice jednostki mogą mieć charakter zasilający, drenujący lub neutralny. Sposób działania granic jednostek jest podstawą do ich klasyfikacji. Kryteria tej klasyfikacji są uzależnione od celu, w jakim się ją przeprowadza. Odróżnić można dwa podstawowe cele, pierwszy z nich jest odtworzeniem naturalnej struktury przepływów w jednostce dla ewentualnej prognozy, np. przemieszczania się zanieczyszczeń. Przy takim celu konieczne jest schodzenie na bardzo niski poziom podziału strumieni wód podziemnych, w którym kryterium jest wydzielenie strumieni różnowiekowych poroździelanych granicami zamkniętymi. Strumienie te zachowują swój charakter tylko w warunkach przepływów naturalnych. Jest to problem odtworzenia szczegółowej hydrotektoniki jednostki. Drugim celem jest wydzielenie jednostek zasobowych, w których będzie prowadzona eksploatacja wód podziemnych, powodująca istotne zaburzenie naturalnej hydrologiki systemu. W takim przypadku można zatrzymać się na wydzieleniu jednostek wyższego rzędu o uśrednionych strumieniach mających bezpośredni związek z elementami struktur geologicznych, czyli wydzielenie warstw i poziomów wodonośnych, jednak w ujęciu przestrzennym i we wzajemnym powiązaniu.

Podstawowym kryterium wydzielenia jednostek zasobowych jest konturowanie ich granicami zachowującymi charakter neutralny lub granicami, na które są nałożone warunki brzegowe w optymalny sposób niezależne od działania hydrologiki systemu. Są to takie granice, przez które mogą być przekazywane sygnały do jednostki, natomiast ich warunki hydrauliczne nie zmieniają się w następstwie zmian zachodzących w jednostce. Przykładem mogą być: granice zamknięte ze stałym przepływem zerowym (kontakt z osadami nieprzepuszczalnymi), granice otwarte przebiegające wzdłuż linii przecięcia się powierzchni piezometrycznej z powierzchnią terenu (granica wypływu), granice otwarte, przebiegające w kontakcie z wodami powierzchniowymi oraz granice tzw. działów wód podziemnych mających założenia tektoniczne (ryc. 5).

Te granice oraz powierzchnia swobodna są granicami pierwszego rzędu, a jednostki okonturowane takimi granicami — jednostkami zasobowymi pierwszego rzędu. W praktyce wydzielenie jednostek pierwszego rzędu jest bardzo trudne i większość jednostek hydrogeologicznych, dla których przeprowadza się obliczenia zasobowe, zawiera granice o mniejszym lub większym związku z hydrologiką systemu. Są to granice i jednostki niższych rzędów. Problemem badań zasobowych jest wydzielenie takich jednostek, które zawierałyby jak najmniej granic najniższego rzędu, np. granic zamkniętych wyznaczonych w obrębie naturalnego strumienia wód podziemnych. Kryterium dla tych wydzieleni są potencjalne możliwości przepływu przez granice przy zmienionym reżimie hydraulicznym.

Jednostka hydrogeologiczna ma wewnętrzną strukturę, czyli hydrotektonikę. Obecne koncepcje ustalania hydrotektoniki jednostek zasobowych bazują na tradycyjnym podziale warstwowym. W podziale tym odróżnia się trzy podstawowe elementy strukturotwórcze: warstwy wodonośne, warstwy półprzepuszczalne oraz warstwy nieprzepuszczalne. Kombinacja tych elementów określa charakter struktury wewnętrznej jednostki. J. Margat (9) wyróżnia jeszcze dodatkowe elementy: formację nie nasyconą w pełni wodą (w tej koncepcji strefa aeracji jest zaliczana do jednostki hydrogeologicznej), warstwy półprzepuszczalne zawierające zasoby zmagazynowane i warstwy półprzepuszczalne nie zawierające zasobów zmagazynowanych. Wyróżnia się:

A. Jednostki zasobowe o **strukturze prostej** zawierające jedną warstwę wodonośną (uśredniony strumień wód podziemnych o zwierciadle swobodnym, napiętnym lub mieszanym) z przykryciem osadami nieprzepuszczalnymi lub półprzepuszczalnymi albo też

Dez przykrycia, zalegająca na podłożu przyjmowalnym za praktycznie wodoszczelne.

Jednostki proste można dodatkowo charakteryzować na podstawie: charakteru wodonośca (wodonośiec porowaty, szczelinowy, „krasowy” itp.), charakteru zasilania (zasilanie wodami opadowymi, zasilanie na kontaktach z wodami powierzchniowymi, brak zasilania itp.) oraz w zależności od sposobu transformacji sygnałów wejściowych (reakcje natychmiastowe, reakcje opóźnione, w zależności od wielkości stałej czasowej).

B. Jednostki zasobowe o strukturze złożonej zawierające wiele warstw wodonośnych porozidzielanych warstwami półprzepuszczalnymi. J. Margat (8, 9) odróżnia w tej klasie: **systemy wielowarstwowe** o warunkach mieszanych swobodno-aporowych, regulowane zmianami klimatycznymi, **systemy wielowarstwowe** o warunkach naporowych lub półnaporowych, zawierające formacje półprzepuszczalne o dużej pojemności wodnej, słabo reagujące na zmiany klimatyczne (systemy quasi-stacjonarne), **systemy wielowarstwowe** o warunkach naporowych z przykryciem formacją szczelną, zawierające warstwy półprzepuszczalne o małej pojemności wodnej, nie reagujące na zmiany klimatyczne (systemy stacjonarne).

Reasumując dotychczasowe stwierdzenia pod pojęciem jednostki hydrogeologicznej należy rozumieć daną bryłę wód podziemnych wraz z ośrodkiem skalnym, w którym jest uformowana, określoną w układzie przestrzennym przez powierzchnie konturujące o zdeterminowanym działaniu hydraulicznym, w których można wyróżnić strefy zasilania i strefy odpływu (drenażu). Jednostka hydrogeologiczna posiada określony układ hydrotektoniczny determinowany strukturą dróg krążenia (strumieni wód podziemnych). Pod pojęciem systemu wód podziemnych należy rozumieć jednostkę hydrogeologiczną wraz z zespołem czynników sterujących zmianami stanu wód w jej obrębie. Model systemu wód podziemnych jest odwzorowaniem określonego jego działania spełniającym przyjęte kryteria podobieństwa z oryginałem (ryc. 5). Jednostka hydrogeologiczna tworzy system o parametrach rozłożonych, zawierający wiele wejść i wyjść. W warunkach naturalnych jednostka jest sterowana sygnałami ciągłymi. Zawiera ona elementy inercyjne oraz opóźniające. Jednostka hydrogeologiczna, czyli system wód podziemnych kontaktuje się z systemami hydrologicznymi przez strefę przejściową, czyli strefę aeracji oraz przez granice otwarte kontaktów z wodami powierzchniowymi. Rząd jednostki jest uzależniony od stopnia jej powiązania hydraulicznego z jednostkami sąsiadującymi. Jednostka zasobowa jest jednostką wyższego rzędu, mającą zgeneralizowaną strukturę wewnętrzną strumieni sprowadzoną do układu warstwowego.

Odróżniamy 3 podstawowe klasy zasobów wód podziemnych jednostki hydrogeologicznej:

I. **Zasoby naturalne**; obejmują one objętość wody zmagazynowanej w jednostce, liczone dla średniego stanu naturalnego, są to zasoby retencyjne lub zmagazynowane oraz ilość wody dopływającej do obszarów drenażowych liczone w średnim stanie naturalnym, są to zasoby dynamiczne.

II. **Zasoby potencjalne**; obejmują one tę ilość wody, jaka może w ekstremalnym niskim reżimie hydraulicznym dopłynąć do jednostki ze stref zasilania — naturalnych i wtórnych.

III. **Zasoby eksploatacyjne**; obejmują one tę ilość wody podziemnej, która może być pobrana z jednostki hydrogeologicznej, przy założeniu nieprzekroczenia przyjętych warunków ograniczających; warunki te mają charakter relatywny i mogą obejmować takie zagadnienia, jak: nieprzekroczenie określonej depresji, uzyskanie dopływu wody o niezmiennych właściwościach fizyczno-chemicznych, zachowanie wydajności w istniejących ujęciach, koszty eksploatacji itp.

Zasoby dynamiczne i potencjalne można nazywać zasobami odnawialnymi (naturalnymi i potencjalnymi). Zasoby retencyjne są często nazywane rezerwami. Zasoby eksploatacyjne są określone w relacji do przyjętych warunków ograniczających dla określonego przedziału czasu. Mogą być one oceniane dla całej jednostki, dla jej fragmentów oraz dla konkret-

nych ujęć. Zasoby eksploatacyjne mogą być znacznie większe od zasobów dynamicznych. Górnym ich ograniczeniem są ogólnie zasoby potencjalne, przy założeniu, że w skali całej jednostki nie nastąpi szczypanie zasobów retencyjnych³.

Pojęcie kategorii zasobów dotyczy tylko stopnia poznania warunków hydrogeologicznych badanej jednostki i oceny możliwości poboru z niej wody podziemnej. Pojęcie bilansu jednostki hydrogeologicznej jest równoznaczne z oceną zasobów dynamicznych. **Zbilansowanie jednostki jest tylko ogólnym wskaźnikiem wielkości jej zasobów odnawialnych i nie powinno stanowić podstawy do oceny zasobów eksploatacyjnych.**

METODY OCENY ZASOBÓW WÓD PODZIEMNYCH

Stworzenie systemowej koncepcji ujmowania jednostek hydrogeologicznych z jednej strony oraz opisanie metod modelowania matematycznego z drugiej — stwarza nowe podstawy rozwoju metodologii oceny zasobów wód podziemnych. W dalszych rozważaniach będą omówione tylko te aspekty metodologii, które wiążą się z zastosowaniem modelowania matematycznego.

Ocena zasobów naturalnych jest działaniem w zasadzie równoważnym do przeprowadzenia identyfikacji jednostki hydrogeologicznej. Należy tu odróżnić dwa rodzaje działań: **identyfikację obiektu**, obejmującą wszystkie działania, podejmowane w celu uzyskania informacji o jego strukturze, parametrach, sposobie reakcji itp., czyli wszystko to, co się wykonuje w trakcie klasycznych badań hydrogeologicznych oraz **identyfikację modelu**, obejmującą wszystkie działania, które prowadzą do takiego uporządkowania zebranych informacji i stworzonych koncepcji, aby zbudowany — na ich podstawie — model był optymalnie zbliżony do badanego obiektu. Obie te części działań są ze sobą integralnie powiązane.

Metodologia identyfikacji obiektów jest znana, należy jednak podkreślić, że z punktu widzenia ewentualnej budowy modelu decydujące znaczenie ma obserwowanie wszelkich reakcji obiektu na znane bodźce, czyli obserwacje stacjonarne stanu zwierciadła wody w możliwie największej liczbie punktów, próbne pompowanie przeprowadzane przy tzw. dopływie nieustalonym, obserwacje zmian warunków brzegowych i zmian klimatycznych. Problem dokładnego wyznaczenia parametrów hydrogeologicznych, takich jak: przewodność i pojemność wodna, aczkolwiek ważny, nie ma jednak tak dużego znaczenia jak obserwacje stacjonarne. Z punktu widzenia budowy modelu można się w tym zakresie ograniczać do rozpoznania ogólnego charakteru zmienności tych parametrów (rozpoznanie struktury jednostki) oraz do określenia przedziałów tej zmienności w poszczególnych klasach. Ważną rolę może tu odgrywać zastosowanie metod geofizycznych (13).

Metodologia identyfikacji i modeli polega na badaniu ich izomorfizmu względem obiektu, czyli znajdowaniu takiego rozkładu parametrów hydrogeologicznych i zadawanych warunków brzegowych, aby reakcja modelu obserwowana na wyjściach była optymalnie zbliżona do reakcji obiektu na te same bodźce. Zidentyfikowany model, tj. taki, który minimalizuje funkcje celu, np. określoną równaniem [6], pozwala na obliczenie wielkości dopływu i odpływu wód do jednostki, czyli ustalenie zasobów dynamicznych oraz obliczenie zasobów retencyjnych. Należy jednak pamiętać, że obliczone wielkości tych zasobów są uzależnione od sposobu skonstruowania funkcji celu, czyli ilości i jakości wprowadzonych do niej obserwacji reakcji obiektu.

W praktyce identyfikację przeprowadza się w dwu cyklach (15). W pierwszym cyklu sprowadza się model do warunków stacjonarnych analizując uśrednione stany dla długich okresów czasowych (vide równanie [3]). Identyfikację przeprowadza się na podstawie funkcji celu [6b]. Taki model można praktycznie zidentyfikować, jeśli znane są: średni stan zwierciadła wody H w czasie bilansowania, orientacyjna

³ Dla dużych zbiorników wód podziemnych o słabej odnawialności zasoby eksploatacyjne mogą przekraczać zasoby potencjalne i być uzupełniane częścią zasobów retencyjnych.

wielkość średniej infiltracji \bar{Q} oraz ogólny zarys rozkładu przewodności T w warstwie. W trakcie identyfikacji będą one ulegały korekcie. Jako wynik identyfikacji otrzymuje się przewodność T dla średniego stanu oraz bilans średnich przepływów przez brzegi jednostki, czyli zasoby dynamiczne.

Dla oceny zasobów retencyjnych konieczne jest zidentyfikowanie współczynnika pojemności wodnej S (współczynnik odsączalności). Identyfikację przeprowadza się na modelu niestacjonarnym (drugi cykl) na podstawie funkcji celu [6] przy założeniu, że znane jest: T , zmiany położenia zwierciadła wody w warstwie $H(t)$ oraz orientacyjnie charakter zmian infiltracji $Q(t)$ (obserwacje zmian klimatycznych).

Ocena zasobów potencjalnych jest zagadnieniem dotychczas najslabiej rozpracowanym i dotyczy takich zagadnień, jak: ocena zmian intensywności infiltracji zależnie od położenia zwierciadła wody, zmian przepuszczalności koryt rzecznych zależnie od wielkości gradientów hydraulicznych formujących się na granicach, czasu eksploatacji itp. Są to wszystko zagadnienia, które wymagają intensywnych prac badawczych. Przybliżoną ocenę zasobów potencjalnych można w pewnym sensie przeprowadzić symulując, na zidentyfikowanym modelu, ekstremalne warunki poboru wody z jednostki, przy założeniach: maksymalnej infiltracji i maksymalnych możliwych dopływach przez brzegi jednostki. W takim przypadku jest korzystne przedstawianie warunków brzegowych w postaci warunków trzeciego rodzaju.

Ocena zasobów eksploatacyjnych jest działaniem równoznacznym z przeprowadzeniem symulacji określonego poboru wody na zidentyfikowanym modelu jednostki. Symulację tę można przeprowadzać, przy założeniu najprzeróżniejszych warunków ograniczających, np. osiągnięcie określonych depresji w danym punkcie i danym czasie, nieprzekroczenie wielkości określonego dopływu z danej strefy itp. W trakcie oceny zasobów eksploatacyjnych na modelach jednostek jest np. możliwe takie optymalizowanie rozmieszczenia ujęć, aby uzyskać najkorzystniejszy rozkład ciśnień przy maksymalnym poborze itp. Obecna technika modelowania matematycznego pozwala na budowę bardzo dużych i zróżnicowanych modeli symulacyjnych, szczególnie jeśli wykonuje się obliczenia na silnych komputerach. Jeśli występują jakieś trudności, to dotyczą one przede wszystkim metod identyfikacji.

UWAGI KOŃCOWE

Obecny rozwój hydrogeologii w zakresie rozwiązywania zagadnień zasobowych zmierza w kierunku ujednolicenia formy przedstawiania obiektu badań w postaci mniej lub bardziej złożonego systemu wód podziemnych o ciągłym sterowaniu. System ten tworzy bryła wodna uformowana w osadach o różnych właściwościach hydrogeologicznych, mająca różną od geologicznej strukturę wewnętrzną (hydrotektonikę). Systemy wód podziemnych są powiązane z systemami hydrologicznymi przez strefę przejściową oraz tzw. kontakty wód powierzchniowych i podziemnych. Struktury tych systemów są tylko częściowo współzależne.

Jest dużą satysfakcją, szczególnie w rocznicę powstania Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego, że założenia do koncepcji systemowego ujmowania jednostki hydrogeologicznej zrodziły się na tym wydziale i były przedstawione przez niezwykłego już Profesora Józefa Gołęba w czasach, gdy nie było jeszcze mowy o stosowaniu komputerów, a hydrogeologia tkwiła w ramach sztywnego i statycznego układu warstwowego.

Dzisiaj — na przykład we Francji — jest realizowany państwowy program systemowego ujęcia zasobów wodnych całego kraju opierający się na zupełnie nowej koncepcji rejonizacji hydrogeologicznej (8). Ujęcie takie wykonano już dla całej północnej Afryki.

Obecnie stworzono w Polsce podstawy metodyczne do przeprowadzania analiz systemów wód podziemnych oparte na technice modelowania analogowego i matematycznego. Realizuje się temat badawczy, w ramach którego jest tworzona biblioteka programów na EMC przystosowanych do budowy modeli mate-

matycznych jednostek hydrogeologicznych. Biblioteka ta zawiera już kilkadziesiąt programów o różnym przeznaczeniu (14).

Jest ona realizowana przez Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej UW oraz Ośrodek Badawczo-Doświadczalny Kombinat Geologicznego „Zachód” w Poznaniu. Obecnie najpilniejszym problemem w dziedzinie dalszego wdrożenia metod modelowania w celu oceny zasobów wód podziemnych jest przeprowadzenie nowej rejonizacji hydrogeologicznej kraju oraz dostosowanie metod identyfikacji obiektów do potrzeb modelowania.

LITERATURA

1. Emsellem Y. — Budowa modeli matematycznych w hydrogeologii. Wyd. Przeds. Hydrogeol., Poznań 1975.
2. Gołąb J. — Wstęp do hydrogeologii dla studentów (skrypt). 1958.
3. Gołąb J. — Podstawy racjonalnego ujęcia bilansu hydrogeologicznego dla obszaru Polski. Sprawozd. z Czynn. i Post. Nauk. ŁTN, 1964, nr 1.
4. Isermann R. — Modeling and identification of dynamic processes. Proc. of the IFIP Work. Conf., Ghent Belgium, North-Holland Publishing Company, 1975.
5. Kaczorek T. — Teoria układów regulacji automatycznej. Wyd. PW, 1969.
6. Kordas B. — Matematyczne modelowanie ruchu wód gruntowych. Prz. geof. 1971, z. 1—2.
7. Luckner L., Szestakow W. — Simulation der Geofiltration. Leipzig, 1975.
8. Margat J. — Project de nouvelle legende de cartes, hydrogeologique. BRGM, rapport 75 SGN 259 AME, 1975.
9. Margat J. — Analyse des systemes aquiferes et evaluation des ressources en eau souterrain. Konspekt referatu wygłoszonego 10 X 1976 na seminarium w IHiGI UW, 1976.
10. Neuman S. P. — Role of subjective value judgement in parameters identification, Proc. of the IFIP Work. Conf., Ghent Belgium, North-Holland Publishing Company, 1975.
11. Ozga-Zielińska — Metody opisu i analizy systemów hydrogeologicznych. Wyd. PW, 1976.
12. Pazdro Z. — Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., 1964.
13. Stenzel P., Szymanko J. — Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich. Wyd. Geol., 1973.
14. Szymanko J., Kreczmar A. i in. — Budowa modeli matematycznych w hydrogeologii — Biblioteka Systemowa HYDRYLIB. Mat. Konf. Janowice, 1976 (w druku).
15. Szymanko J. — Problemy identyfikacji modeli matematycznych jednostek hydrogeologicznych. Ibidem.
16. Szymanko J. — Modele matematyczne w hydrogeologii. Geoinformatyka, 1977, nr 1 (w druku).
17. Walton W. — Groundwater resources evaluation. McGraw-Hill Book Company, 1970.
18. Węgrzyn S. — Modele matematyczne i identyfikacja procesów. Wyd. PAN, 1972.

SUMMARY

The classic hydrogeology assuming the concept of subdivision of hydrogeological units into layers and the model of stable groundwater flow always encountered difficulties in establishing relationships between dynamic and exploitable resources as well as in precise assessment of the latter. The developments in the theory and methodology of the analysis of hydrogeological phenomena, which took place in the sixties, resulted in origin of new concepts of classification and establishing resources of groundwaters. The concepts are based on interpretation of hydrogeological unit as a system and they make it possible to assess groundwater resources using various

algorithms from the field of cybernetics. The basic premises of these concepts may be found in the papers of the late Józef Gołąb, Professor of the Warsaw University.

The paper presents hydrogeological aspects of the concepts of Professor J. Gołąb with the reference to some modern theories of system identification from the fields of automatics and methodology of mathematical modelling. The premises of classification of hydrogeological units are given and there is presented the classification of groundwater resources, on which are based both the system concept and the construction of new mathematical models used in evaluating groundwater resources.

РЕЗЮМЕ

В классической гидрогеологии основанной на концепции слоевого разделения гидрогеологических единиц и принятия модели стационарного течения подземных вод всегда выступали трудности с установлением соотношений между вычисленными динамическими и эксплуатационными ресурсами, а

также с точной оценкой эксплуатационных ресурсов.

В результате развития — в шестидесятых годах — теоретических основ и методологии анализа гидрогеологических явлений, в настоящее время появились новые концепции в области классификации подземных вод и методов оценки их ресурсов. Эти концепции базируются на системном подходе к гидрогеологической единице, что позволяет использовать ряд алгоритмов применяемых в кибернетике. Основные положения этих концепций можно найти в работах покойного профессора Варшавского Университета Юзефа Голомба.

В статье представлены гидрогеологические аспекты концепции проф. Голомба в связи с современной теорией идентификации систем автоматизации и методики математического моделирования. Приведены основы классификации гидрогеологических единиц, а также принципы классификации ресурсов подземных вод, на которых основана системная концепция и которые являются основой для строения математических моделей служащих для оценки ресурсов подземных вод.