

Wyznaczanie zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych oparte na metodyce PDE

Janusz Michalak*

Estimation of disposable groundwater resources based on PDE methodology. Prz. Geol., 50: 846–851.

Summary. Methodologies of disposable groundwater resources estimation encounter an essential problem, arising from discrepancies between law regulations and proper nature of these resources. The PDE methodology proposes to resolve these differences by introduction a new term: space of permissible exploitations (in Polish: Przestrzeń Dopuszczalnych Eksploatacji — PDE). In this case estimation of disposable resources resolves itself into calculation of two surfaces in the form of function $q = f(x,y)$. These surfaces are found through optimization by using numerical model of the investigated groundwater system. PDE methodology is performed by implementation of the object oriented program system ASPAR, which in turn operates within GIS GRASS system environment on Unix platform. Two practical usages of this methodology related to cases in different scale, regional and local, confirm the correctness of its basic assumption. However, wider practical application of this methodology requires further research and application studies.

Key words: groundwater resources, safe yield, estimation of resources, hydrogeological modeling

Problematyka wyznaczania zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych od lat stanowi temat wielu prac badawczych i zastosowawczych. Przykładem może być lista 68 publikacji zawarta w poradniku metodycznym (Paczyński i in., 1996). Jednak ciągle przy rozwiązywaniu praktycznych problemów dotyczących tych zagadnień napotyka się na wiele wątpliwości wynikających głównie z trudności pogodzenia wymogów formalno-prawnych z przyrodniczą naturą tych zasobów. Metodyka PDE proponuje rozwiązanie tej rozbieżności poprzez wprowadzenie nowego pojęcia – przestrzeni dopuszczalnych eksploatacji (PDE).

Takie podejście do problemu wyznaczania zasobów dyspozycyjnych jest oparte na próbie znalezienia „wspólnego mianownika” dla przepisów prawnych i praw przyrodniczych rządzących tymi zasobami. Rozbieżność, jaką możemy tu zaobserwować, jest zrozumiała, ponieważ w obu tych obszarach operuje się odmiennym aparatem pojęciowym. Wynika to w sposób naturalny z różnic pomiędzy potrzebami administracyjnymi, dla których prowadzone są postępowania zatwierdzania zasobów, a przyrodniczą specyfiką zjawiska, jakim jest przepływ wód podziemnych i w konsekwencji — fizyczno-matematycznym opisem tego zjawiska. Taki „wspólny mianownik” wymaga pewnego kompromisu — znalezienia wspólnego i w miarę możliwości, jak najbardziej spójnego aparatu pojęciowego.

Analiza literatury dotyczącej tych zagadnień prowadzi do postawienia wielu pytań:

□ Czy zasoby dyspozycyjne powinny być wyrażone jedną liczbą określającą „ilość wód”?

□ Jaka jest teoretycznie i praktycznie możliwa dokładność określenia tych zasobów?

□ Dla jakiego obszaru można wyznaczać zasoby dyspozycyjne — czy może to być dowolny obszar np. obszar administracyjny: gmina, powiat lub województwo?

□ Czy zasoby dyspozycyjne powinny być wyznaczone dla określonego obszaru, czy dla dla wyróżnienia hydrogeologicznego?

□ Jakie wyróżnienie hydrogeologiczne byłoby najbardziej odpowiednie w tym przypadku: jednostka hydrogeologiczna, system wodonośny, region hydrogeologiczny, a może poziom wodonośny lub zlewnia podziemna?

□ Czy zasoby dyspozycyjne są wielkością stałą — nie zależną od okoliczności, dla jakich były wyznaczone i jaki jest okres ich „ważności”?

Odpowiedzi na te pytania stanowią podstawę przedstawianego tu podejścia do wyznaczania zasobów dyspozycyj-

nych. Aby jednak móc odpowiedzieć na te pytania trzeba dokładniej przeanalizować definicje terminów hydrogeologicznych, które w tych zagadnieniach są stosowane.

Podstawowe pojęcia i ich definicje

Poniżej został zacytowany zestaw definicji wybranych ze *Słownika hydrogeologicznego* (Kleczkowski i in., 1997) dotyczących pojęć związanych z wyznaczaniem zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych. Zacytowanie ich (ze skrótnymi częściami nie dotyczącymi tego tematu) jest konieczne ze względu na znaczenie szczegółów. Na końcu każdej definicji jest umieszczony słownikowy numer tej definicji.

□ Kontakt hydrauliczny (więź hydrauliczna) — 1. Wzajemna łączność wód podziemnych (...) w obrębie zróżnicowanego układu warstw wodonośnych (...) powodująca, iż przepływy między warstwami (również przez rozdzielające warstwy półprzepuszczalne) (...) są jednoznacznie określone (...) (def. 314).

□ Poziom wodonośny — 1. (...) Zbiorowisko wód podziemnych (...) pozostające w łączności hydraulicznej, a więc: warstwa wodonośna w obrębie utworów warstwowych lub strefa wodonośna w obrębie utworów szczelinowych lub kawernowych (def. 596).

□ System wodonośny — 1. Zespół poziomów wodonośnych znajdujących się w kontakcie hydraulicznym, ograniczony ściśle zdefiniowanymi przestrzennie i dynamicznie granicami (...) (def. 838).

□ System hydrogeologiczny — każdy obiekt lub układ hydrogeologiczny zdefiniowany i opisany z pewnego punktu widzenia pod względem jego wewnętrznej struktury, zasad organizacji i/lub działania. Przykłady: system wodonośny, system krążenia wód podziemnych (def. 835).

□ Region hydrogeologiczny — obszar, który ze względu na całokształt stosunków hydrogeologicznych wyraźnie różni się od obszarów sąsiednich (...) (def. 666).

□ Granica systemu wodonośnego — powierzchnia lub linia (...) ograniczająca (...) system wodonośny, dająca się scharakteryzować określonymi (...) warunkami hydrodynamicznymi, stanowiąca przeszkodę w rozprzestrzenianiu się wpływów (wymuszeń) między systemem hydrogeologicznym a jego otoczeniem (def. 208).

□ Jednostka hydrogeologiczna — fragment litosfery stanowiący przestrzennie i dynamicznie zdefiniowany system hydrogeologiczny (...) (def. 272).

□ Zbiornik wód podziemnych — 1. (...) Zespół utworów przepuszczalnych (...) pozostających we wzajemnej łączności hydraulicznej. O zbiorniku wód podziemnych

*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089, Warszawa; jwm@geo.uw.edu.pl

mówi się zwykle, gdy utwory wodonośne dobrze przepuszczalne mają duży zasięg przestrzenny i zawierają zasoby o znaczeniu użytkowym (ekonomicznym). W tym sensie (...) w opracowaniach regionalnych wprowadzono pojęcie: użytkowy poziom wód podziemnych (...) (def. 1150).

□ Zasoby wód podziemnych — ilość wód podziemnych traktowanych jako surowiec (...) zawarta w zbiorniku wód podziemnych, zlewni wód podziemnych lub innej jednostce hydrogeologicznej (...) (def. 1140).

□ Zasoby dyspozycyjne — ilość wód podziemnych zbiornika lub jego części nadających się i możliwych do wykorzystania gospodarczego przy zachowaniu ograniczeń związanych z wymaganiami ochrony środowiska naturalnego. Definicja zasobów dyspozycyjnych wynikająca z przepisów obowiązujących w Polsce (Rozporządzenie Ministra OŚNiL z 23.08.1994 r., Dz. U. Nr 93, poz. 444 § 2.1) jest następująca: „zasoby wód podziemnych z obszaru bilansowego, możliwe do zagospodarowania w określonych warunkach środowiskowych i hydrogeologicznych bez wskazania lokalizacji i warunków techniczno-ekonomicznych ujęcia” (def. 1130)

Analiza powyższych definicji nasuwa następujące uwagi:

□ W słowniku nie ma terminu łączność hydrauliczna, ale można przyjąć, że jest to synonim terminu kontakt hydrauliczny.

□ Zasoby dyspozycyjne odnoszą się do zbiornika wód podziemnych (def. 1130), ale według przepisów prawnych wyznacza się je dla obszaru bilansowego.

□ Pojęcie obszar bilansowy nie jest zdefiniowane w *Słowniku hydrogeologicznym*.

□ W słowniku można znaleźć dwa pojęcia, których definicje odwołują się do terminu obszar, są to region hydrogeologiczny (def. 666) i granica systemu wodonośnego w sensie linii zamykającej system wodonośny jako jednostkę płaską (def. 208).

□ Zasoby dyspozycyjne wód podziemnych odnoszą się do zbiornika wód podziemnych, zlewni wód podziemnych lub innej jednostki hydrogeologicznej (def. 1140). Uogólniając można powiedzieć, że zasoby dyspozycyjne odnoszą się do jednostki hydrogeologicznej.

□ Ponieważ jednostka hydrogeologiczna jest przestrzenią, w której funkcjonuje system hydrogeologiczny (def. 272), można powiedzieć, że zasoby dyspozycyjne odnoszą się do systemu hydrogeologicznego.

□ Systemem hydrogeologicznym może być: system wodonośny, system krążenia lub inny układ hydrogeologiczny (def. 835). Przedstawione w dalszej części rozważania wykazują, że z punktu widzenia wyznaczania zasobów dyspozycyjnych jedynie granice systemu wodonośnego są dostatecznie niewrażliwe na zmiany czynników zewnętrznych, co jest koniecznym warunkiem metodycznej poprawności wyznaczania tych zasobów.

Pobór wody podziemnej jako silne wymuszenie zewnętrzne

Z definicji zasobów dyspozycyjnych wynika pośrednio, że można się spodziewać znacznych poborów wody z rozpatrywanego systemu hydrogeologicznego. Jedynymi ograniczeniami tego poboru są wymagania środowiska naturalnego, najczęściej formułowane jako przyjęte z góry kryteria ograniczające pobór wody ze względu na niekorzystne przyrodniczo skutki tego poboru, do których nie można zaliczyć zmiany granic wyodrębnionych wcześniej

wyróżnień przestrzennych. Systemy hydrogeologiczne, takie jak systemy krążenia lub zlewnie podziemna, w wyniku dużego poboru wody mogą ulegać znacznym deformacjom przestrzennym — poczynając od istotnych zmian granic i kończąc na zaniku systemu lub łączenia się razem systemów sąsiednich. Sens wyznaczania zasobów dyspozycyjnych dla takich systemów budzi poważne wątpliwości metodyczne — do czego będą się w przyszłości odnosiły te zasoby, czy do przestrzeni w której był pierwotny system, czy też do nowego układu, który utworzy się w wyniku poboru wody jako silnego wymuszenia zewnętrznego. Wynika z tego, że zasoby dyspozycyjne powinny być wyznaczane tylko dla systemów odpornych na deformacje przestrzenne spowodowane eksploatacją, czyli o granicach charakteryzujących się słabym więziami hydraulicznymi z otoczeniem, tak jak to jest określone w def. 208.

Z powyższych powodów określanie przestrzennych lub obszarowych wyróżnień (jednostek) dla wyznaczania zasobów dyspozycyjnych powinno być oparte na analizie zmienności poziomej i pionowej więzi hydraulicznych pomiędzy poszczególnymi fragmentami rozpatrywanej przestrzeni hydrogeologicznej. Takie wyróżnienie przestrzenne jest najbliższe definicji systemu wodonośnego (def. 838) i w zależności od potrzeb może być określone jako przestrzeń trójwymiarowa (3D), w której ten system się mieści lub jako obszar (2D) odpowiadający temu systemowi. Można przyjąć, że taki obszar może być rozumiany jako „obszar bilansowy” dla zasobów dyspozycyjnych.

Właściwości przestrzenne zasobów dyspozycyjnych

Woda podziemna jako eksploatowany surowiec charakteryzuje się umiarkowaną, ale jednocześnie znaczącą ruchliwością. Pomijając nieistotny w tym przypadku problem odnawialności zasobów, z punktu widzenia określania zasobów dyspozycyjnych można to określić jako przypadek pośredni pomiędzy dwoma skrajnościami: zupełnie nieruchliwym złożem kruszywa i całkowicie ruchliwym zasobem wody powierzchniowej w jeziorze. W pierwszym przypadku wydobywanie surowca w określonym miejscu nie zmniejsza zasobów dyspozycyjnych w innych miejscach — takie zasoby dyspozycyjne wyznaczone dla określonego obszaru nie zależą od miejsca eksploatacji. W drugim przypadku w wyniku całkowitej ruchliwości surowca wielkość zasobów dyspozycyjnych odnosi się zawsze do całego obszaru (powierzchni jeziora) i w rezultacie tu również zasoby dyspozycyjne tego obszaru nie zależą od miejsca eksploatacji. Pośredni przypadek, jakim są wody podziemne o ograniczonej ruchliwości, stwarza zupełnie odmienną sytuację — nie jest obojętne, w którym miejscu będzie pobierana woda. W pewnych częściach systemu wodonośnego można jej pobrać znacznie więcej bez naruszenia ograniczeń przyjętych dla całego systemu niż w innych. Z tego wynika, że wyznaczenie zasobów dyspozycyjnych, tak jak to określają przepisy prawne — bez wskazania miejsca eksploatacji, nie może być sprowadzone jedynie do sumy zasobów danego obszaru. Rozwiązaniem kompromisowym, czyli „wspólnym mianownikiem” może być w tym przypadku funkcja przestrzenna: $f(x,y)$ dla 2D lub $f(x,y,z)$ dla 3D określająca przestrzenną zmienność zasobów dyspozycyjnych. Takie rozwiązanie jest zgodne z przepisami prawnymi — daje podstawę dla swobodnego podejmowania decyzji administracyjnych w planowaniu przestrzennym i w zakresie zatwierdzania zasobów eksploatacyjnych. Jest ono także zgodne z przyrodniczą naturą zasobów wody pod-

ziemnej. W dalszej części opisu metodyki (dla uproszczenia wyrażen matematycznych i formy wizualizacji) funkcje przestrzenne określające zasoby dyspozycyjne będą ograniczone tylko do przestrzeni 2D i w konsekwencji mogą być interpretowane jako odnoszące się do sumy zasobów dyspozycyjnych ze wszystkich poziomów wodonośnych danego systemu wodonośnego lub jako odnoszące się do jednego poziomu bez rozpatrywania „współdzielenia” tych zasobów pomiędzy wszystkimi poziomami w danym systemie.

Inny problem, związany z ograniczoną ruchliwością wód podziemnych jest wzajemne przestrzenne powiązanie zasobów dyspozycyjnych w obszarach sąsiadujących – pobór wody w jednym miejscu zawsze zmniejsza zasoby w obszarze sąsiednim, lecz liczbowe określenie tego zmniejszenia jest zadaniem bardzo trudnym. Powracając do przedstawionych powyżej dwóch przypadków skrajnych można to określić następująco:

□ Eksploatacja kruszywa w jednym miejscu nie zmniejsza zasobów w innym — zasoby dyspozycyjne w jednym miejscu $QD_n = f(x_n, y_n)$ nie są funkcją zasobów dyspozycyjnych w innym miejscu $QD_{-n} = f(x_{-n}, y_{-n})$.

□ Eksploatacja wody z jeziora w jednym punkcie zmniejsza zasoby dyspozycyjne w innym o swoją własną wielkość:

$$QD_{-n}(x_{-n}, y_{-n}) = QDC - QD_1(x_n, y_n) \quad [1]$$

gdzie: QDC — zasoby dyspozycyjne całkowite.

W obu przypadkach można w prosty sposób określić, o ile zostały zmniejszone zasoby dyspozycyjne w innym miejscu. Jednak w przypadku wód podziemnych wyznaczenie tego zmniejszenia jest bardzo złożone — współczynnik zmniejszenia zależy od wielu parametrów charakteryzujących zarówno środowisko hydrogeologiczne, jak i oddziaływania zewnętrzne, a także odległość pomiędzy rozpatrywanymi punktami. Związek pomiędzy dopuszczalną eksploatacją i przyjętymi warunkami ograniczającymi jest również złożoną zależnością przestrzenną. W rezultacie, wyznaczenie zmniejszenia zasobów może być dokonane jedynie przy pomocy symulacji komputerowych i w tym przypadku wynikiem musi być także funkcja przestrzenna $WZ = f(x, y)$.

Sposób określania zasobów dyspozycyjnych

Punktem wyjścia do opracowania metodyki PDE była definicja pojęcia „zasoby dyspozycyjne” zawarta w Rozporządzeniu Ministra OŚZNiL z 23.08.1994r. (Dz.U. nr 93, poz. 444, § 2.1.1.) i zacytowana powyżej.

Uwzględniając bezsporny przyrodniczy fakt, że ilość wody podziemnej, jaka może być pobierana z określonego obszaru w określonych warunkach środowiskowych i hydrogeologicznych „z zachowaniem ograniczeń związanych z wymaganiami ochrony środowiska naturalnego” (z def. 1130. Zasoby dyspozycyjne) jest zależna od lokalizacji ujęcia, zarówno w sensie położenia geograficznego, jak i w sensie określenia ujętego poziomu wodonośnego.

Z powyższego bezpośrednio wynika, że zasobów dyspozycyjnych nie można wyrazić jedną liczbą i należy je rozumieć jako jednoznacznie określoną przestrzeń dopuszczalnych możliwości rozmieszczenia ujęć z uwzględnieniem, że każde (rzeczywiste lub potencjalne) ujęcie ma określone trzy niezbędne atrybuty: lokalizację, określenie ujętego poziomu i dopuszczalną wielkość poboru wody. Tak rozumiane zasoby dyspozycyjne pozwalają na względnie swobodne i racjonalne dysponowanie wodami podziemnymi

rozpatrywanego obszaru i w konsekwencji na podejmowanie optymalnych decyzji administracyjnych w zakresie zatwierdzania zasobów eksploatacyjnych i wydawania pozwoleń na eksploataowanie wód podziemnych.

Przyjmując powyższe rozwinięcie definicji zasobów dyspozycyjnych za podstawę metodyki PDE, wyznaczenie zasobów dyspozycyjnych sprowadza się do wyznaczenia granic przestrzeni dopuszczalnych rozmieszczeń ujęć (rzeczywistych lub potencjalnych) z uwzględnieniem trzech atrybutów każdego ujęcia.

W przedstawianej tu metodyce dla przypadku 2D przyjęto następujący schemat pojęciowy:

□ Przestrzeń PDE jest określona w układzie współrzędnych kartezjańskich (x, y, q) .

□ Zasoby dyspozycyjne odnoszą się do obszaru S odpowiadającemu systemowi hydrogeologicznemu i w dowolnym punkcie $s(x, y)$ można wyznaczyć ich potencjalną wielkość przy zdefiniowanych ograniczeniach we wszystkich punktach $c(x, y)$ należących do obszaru C , który jest odpowiednio większy od S i obejmuje go w całości.

□ Ograniczenia p stanowiące zbiór ograniczeń P i definiuje się je jako funkcje przestrzenne:

$$p = f(c(x, y)) \quad \text{dla: } c \in C \text{ i } p \in P \quad [2]$$

ograniczenia mogą być wyrażone w postaci równań lub nierówności ($=, >, <, \geq$ lub \leq) i mogą odnosić się do różnych wielkości fizycznych związanych z zasobami dyspozycyjnymi, jak na przykład: potencjał hydrodynamiczny, gradient, prędkość przepływu lub wydatek przepływu.

□ Granice przestrzeni PDE określone są następująco:

— boczną powierzchnię stanowi zbiór linii pionowych przechodzących przez punkty stanowiące granicę obszaru S ,

— dolną powierzchnię stanowi płaszczyzna $q = 0$, co odpowiada stanowi braku eksploatacji,

— górne ograniczenie tej przestrzeni ma charakter strefy przejściowej (strefy ryzyka) i jest określone dwoma powierzchniami odpowiadającymi dwóm skrajnym przypadkom i zdefiniowanymi poniżej.

□ Pierwszą powierzchnię (dolną granicę strefy ryzyka) stanowi funkcja przestrzenna:

$$q_1 = f(s(x, y)^{z'})_P \quad \text{w: } s \in S \quad \text{i dla: } P \quad \text{w: } C \quad [3]$$

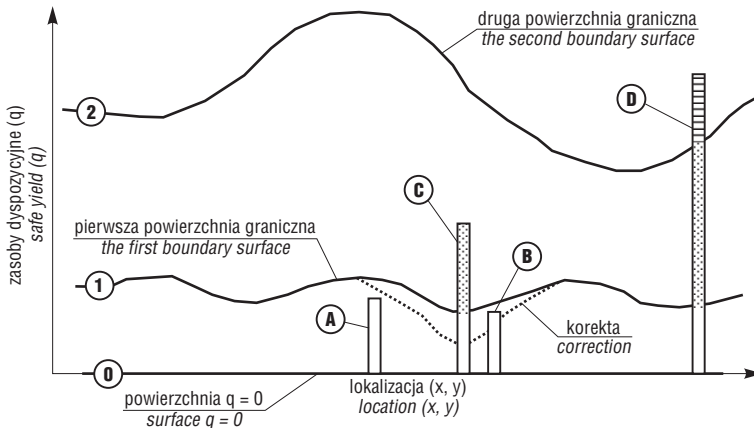
gdzie: x i y — położenie geograficzne ujęcia, z' — wskazanie ujętego poziomu i q_1 — maksymalny dopuszczalny pobór wody w dowolnym punkcie s obszaru S przy spełnieniu zdefiniowanego zbioru ograniczeń P w obszarze C i założeniu, że pobór wody jest rozłożony na całym rozpatrywanym obszarze S w sposób optymalny, tak aby suma wszystkich poborów była wartością maksymalną. W przypadku dwuwymiarowym (płaskim) wielkość q_1 określa się w jednostkach o wymiarze: $\dim q_1 = LT^{-1}$ (wymiar prędkości liniowej) i najczęściej są to metry sześciennicne na dobę i na kilometr kwadratowy.

□ Drugą powierzchnię (górną granicę strefy ryzyka) stanowi podobną funkcja przestrzenna:

$$q_2 = f(s(x, y)^{z'})_P \quad \text{w: } s \in S \quad \text{i dla: } P \quad \text{w: } C \quad [4]$$

gdzie: x , y i z' — jak wyżej, a q_2 — maksymalny dopuszczalny pobór wody przy spełnieniu zdefiniowanego zbioru ograniczeń P w obszarze C i założeniu, że ujęcie to jest jedynym w rozpatrywanym obszarze S . Wymiar q_2 jest taki sam jak q_1 .

Przy przyjętym wyżej założeniu upraszczającym, że zasoby dyspozycyjne dotyczą tylko jednego poziomu



Ryc. 1. Schematyczne przedstawienie przestrzeni możliwych wyborów lokalizacji i wielkości poborów wody podziemnej przy znanej pierwszej (1) i drugiej (2) powierzchni granicznej zasobów dyspozycyjnych w schemacie 2D; **A** — pobór dopuszczalny i niewymagający korekty; **B** — pobór dopuszczalny przed i niedopuszczalny po korekcie w przypadku, jeżeli nie jest w niej uwzględniony; **C** — pobór dopuszczalny, ale wymagający korekty powierzchni pierwszej; **D** — pobór niedopuszczalny duży bez możliwości korekty

Fig. 1. Schematic portrayal of possible choices of location and amount of groundwater take off, assuming well known the first (1) and the second (2) boundary surfaces of safe yield in 2D scheme; **A** — admissible take off without requirement of correction; **B** — admissible take off before correction and inadmissible after correction in case if it is not taken into consideration; **C** — admissible take off, but with required of correction of the first surface; **D** — inadmissible take off without possibility of correction

wodonośnego lub są sumą ze wszystkich poziomów, przestrzeń PDE może być przedstawiona graficznie (ryc. 1).

Jeżeli dla danej lokalizacji pobór wody mieści się w przestrzeni zawartej pomiędzy płaszczyzną $q = 0$, a powierzchnią pierwszą, to nie powoduje to naruszenia ograniczeń dla poboru wody w innych lokalizacjach, pod warunkiem, że pobory w innych lokalizacjach również są poniżej powierzchni pierwszej.

W żadnej lokalizacji pobór wody nie może przekroczyć powierzchni drugiej, ponieważ w takim przypadku zostają naruszone ograniczenia, nawet w sytuacji gdyby to było jedyne ujęcie w rozpatrywanym obszarze.

Jeżeli dla danej lokalizacji pobór wody zawiera się w przestrzeni pomiędzy pierwszą powierzchnią i drugą, to taki pobór jest dopuszczalny (nie narusza ograniczeń) pod warunkiem, że w najbliższym otoczeniu pierwsza powierzchnia zostanie odpowiednio obniżona. Takie bezwarunkowe obniżenie pierwszej powierzchni jest możliwe tylko w przypadku, gdy w obszarze tym nie ma ujęć wody o wielkości eksploatacji zbliżonej do tej powierzchni. W przeciwnym razie funkcja przestrzenna obniżenia pierwszej powierzchni musi być superpozycją oddziaływania wszystkich ujęć przekraczających tą powierzchnię lub zbliżających się do niej. Przybliżone wartości tego obniżenia można wyznaczyć przez rozdzielenie „nadwyżki” poboru wody na sąsiednie obszary i odjęcie tych części od wartości opisujących powierzchnie pierwszą. Ponieważ jest to sposób przybliżony przy takim postępowaniu należy zastosować odpowiedni współczynnik bezpieczeństwa. Dokładne wyznaczenie nowej pierwszej powierzchni granicznej przy istniejących ujęciach, w których pobory wody przekraczają pierwotną powierzchnię pierwszą jest możliwe tylko na drodze optymalizacyjnych obliczeń z zastosowaniem numerycznego modelu przepływu wód podziemnych.

Przykłady stosowanych kryteriów ograniczających

Wielkość zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych zależy w dużej mierze od ograniczeń związanych z wymaganiami ochrony środowiska naturalnego (def. 1130, *Zasoby dyspozycyjne*). W przedstawianej tu metodzie ograniczenia przyrodnicze są wyrażone w postaci wyrażeń matematyczno-fizycznych. Poniżej przedstawiono przykłady takich ograniczeń zastosowanych do konkretnych rzeczywistych przypadków:

□ Jeżeli względna depresja zwierciadła wody w rozpatrywanym głębszym poziomie wodonośnym jest większa niż 10 m, to zwierciadło to nie może obniżyć się poniżej powierzchni znajdującej się w połowie pomiędzy spągiem poziomu leżącego powyżej a stropem poziomu rozpatrywanego:

$$H^d \geq \min((H^d_0 - 10), ((z^d_{st} + z^s_{sp}) / 2.))$$

w: $c \in C$ [5]

gdzie: H^d — rzędne zwierciadła w dolnym poziomie obliczane w procedurach optymalizacyjnych, H^d_0 — rzędne zwierciadła w dolnym poziomie obliczone przy istniejącej eksploatacji w górnym poziomie i bez eksploatacji w dolnym poziomie, z^s_{sp} — rzędna spągu poziomu górnego, z^d_{st} — rzędna stropu poziomu dolnego.

□ Względna depresja w poziomie górnym wywołana eksploatacją wody w rozpatrywanym poziomie dolnym nie może być większa niż 5 m:

$$H^s \geq H^s_0 - 5. \quad \text{w: } c \in C$$
 [6]

gdzie: H^s_0 — rzędne zwierciadła w poziomie górnym obliczone przy istniejącej eksploatacji w tym poziomie i bez eksploatacji w poziomie dolnym, H^s — rzędne zwierciadła w poziomie górnym obliczane w procedurach optymalizacyjnych.

□ Względna ilość wody uczestnicząca w obiegu poziomym górnego i nieuczestnicząca w obiegu poziomym dolnego nie może zmienić się więcej niż dwukrotnie. W terminologii opisu modelu oznacza to, że stosunek względnych różnic przepływów całkowitych w danym elemencie modelu (bloku) w poziomie górnym i w warstwie rozdzielającej musi zmieścić się w przedziale zawartym pomiędzy 0,5 i 2,0:

$$0,5 \leq ((q^g_d - q^p_d) / q^g_a) / ((q^s_0 - q^p_0) / q^s_0) \leq 2,0 \quad \text{w: } c \in C$$
 [7]

gdzie: q^g_d — całkowity przepływ wody w poziomie górnym w danym elemencie modelu przy rozpatrywanym poborze wody z poziomu dolnego, q^p_d — całkowity przepływ wody pomiędzy poziomami w danym elemencie przy rozpatrywanym poborze wody z poziomu dolnego, q^s_0 — całkowity przepływ wody w poziomie górnym w danym elemencie przy braku poboru wody z poziomu dolnego, q^p_0 — całkowity przepływ wody pomiędzy poziomami w danym elemencie przy braku poboru wody z poziomu dolnego.

□ Rzędne zwierciadła w rozpatrywanym poziomie nie może obniżyć się poniżej powierzchni znajdującej się 5 m ponad spągiem tego poziomu:

$$H_l \geq z_{sp} + 5. \quad \text{w: } c \in C$$
 [8]

gdzie: H_l — rzędne zwierciadła w rozpatrywanym poziomie, z_{sp} — rzędne spągu tego poziomu.

□ Ze względu na zanieczyszczenia chemiczne poziomu górnego nie można dopuścić do odwrócenia pionowych gradientów potencjałów hydraulicznych pomiędzy poziomem górnym i dolnym. W rezultacie zwierciadło w dolnym poziomie w rejonach zanieczyszczeń nie może obniżyć się poniżej powierzchni zwierciadła w górnym poziomie:

$$H^d \geq H^g \quad \text{w: } c \in C \quad [9]$$

gdzie: H^d — rzędne zwierciadła w dolnym poziomie, H^g — rzędne zwierciadła w górnym poziomie.

Analogiczne kryterium może być zastosowane do przypadków ascenzji solanek i migracji wód morskich lub zanieczyszczonych. W takich przypadkach trzeba jedynie odpowiednio zdefiniować obie strony wyrażenia nierównościowego — dokładny sens rzędnych, jakie tam występują.

Przedstawione powyżej kryteria ograniczające są jedynie przykładami. W pewnych przypadkach może być konieczne zdefiniowanie kryteriów, które będą ograniczały zasoby dyspozycyjne, tak aby nie naruszać ustalonej dla danego miejsca wielkości zasobów odnawialnych.

Wyznaczanie powierzchni granicznych

W metodyce PDE powierzchnie graniczne wyznaczane są przy pomocy procedur optymalizacyjnych, działających na numerycznym modelu przepływu wody podziemnej. Dla realizacji tych procedur definiuje się funkcje celu, w które wbudowany jest model jako wewnętrzny składnik tych funkcji. Z uwagi na odmienny charakter obu powierzchni granicznych, odpowiadające im funkcje celu są różne. Wyznaczenie drugiej powierzchni (leżącej wyżej) jest łatwiejsze niż pierwszej i wynik wyznaczenia powierzchni drugiej jest traktowany jako punkt wyjścia dla wyznaczenia powierzchni pierwszej. Z tego względu pierwszą fazą obliczeń jest wyznaczenie powierzchni drugiej.

Wyznaczenia drugiej powierzchni granicznej. Obliczenia optymalizacyjne dla wyznaczenia tej powierzchni, określonej wyrażeniem [4], polegają na znalezieniu maksymalnej wartości poboru wody w danym punkcie $s \in S$ przy całkowitym braku poboru wody we wszystkich pozostałych punktach rozpatrywanego obszaru i przy zachowaniu warunków zdefiniowanych w zbiorze kryteriów ograniczających P w obszarze C .

W takim przypadku procedura optymalizacyjna szuka dla poszczególnych punktów należących do wybranego podzbioru punktów $S' \subset S$, najczęściej wszystkich elementów (bloków) modelu maksimum funkcji celu dla mnożnika poboru wody w jednym rozpatrywanym punkcie:

$$f^{s'}_P(\omega_w) = \max_{\omega \in \Omega} f^{s'}_P(\omega) \quad \text{dla: } s' \in S' \quad [10]$$

gdzie: $f^{s'}_P$ — funkcja celu dla punktu $s' \in S'$ z ograniczeniami P w obszarze C , ω — mnożnik dla wartości poboru wody w jednym punkcie, Ω — obszar dopuszczalnych rozwiązań, ω_w — wartość mnożnika stanowiąca wynik zakończonej procedury identyfikacyjnej, P — zbiór ograniczeń dla wszystkich punktów c w obszarze C .

Wyznaczenie wartości maksymalnego mnożnika ω_w w jednym punkcie s' , najczęściej jednym elemencie (bloku) wymaga wykonania około 20 symulacji stanu modelu ($n^{\omega s'} \cong 20$). Gdy zbiór S' liczy m_S punktów, liczba symulacji potrzebna do wyznaczenia drugiej powierzchni granicznej wynosi $n^{\omega S} = n^{\omega s'} * m_S$ (dla modelu o 2500 blokach z punktami s' : $n^{\omega S} \cong 50\,000$).

Wyznaczanie pierwszej powierzchni granicznej.

Obliczenia optymalizacyjne dla wyznaczenia pierwszej powierzchni granicznej są bardziej skomplikowane i wykonuje się je cyklicznie, stosując na przemian dwa algorytmy:

□ Pierwszy algorytm wyznacza na drodze optymalizacji największy ogólny mnożnik dla wielkości poboru wody we wszystkich punktach s' , redukujący te wielkości do takich wartości, aby ograniczenia P były spełnione. W pierwszym cyklu wartościami redukowanymi są wartości drugiej powierzchni granicznej wyznaczonej w sposób opisany powyżej, a w kolejnych — wartości „względnej drugiej powierzchni granicznej” wyznaczone w drugim algorytmie. Funkcja celu w tym przypadku ma postać:

$$f^{s'}_P \Sigma_{S'}\{\psi_w\} = \max_{\psi \in \Psi} f^{s'}_P \Sigma_{S'}\{\psi \in \Psi\} \quad \text{dla: } s' \in S' \quad [11]$$

gdzie: $f^{s'}_P \Sigma_{S'}\{\}$ — funkcja celu dla wspólnego mnożnika ψ wszystkich wielkości poboru wody w S' z ograniczeniami P w obszarze C , ψ — wspólny mnożnik dla wartości we wszystkich punktach s' , Ψ — obszar dopuszczalnych rozwiązań, ψ_w — wartość wspólnego mnożnika stanowiąca wynik zakończonej procedury identyfikacyjnej, P i S' — jak poprzednio.

Wynikiem realizacji obliczeń pierwszego algorytmu jest funkcja przestrzenna określająca wartości poborów wody o rozkładzie zgodnym z funkcją „względnej drugiej powierzchni granicznej”, ale jednocześnie spełniającym ograniczenia — jest to kolejne przybliżenie wyliczanej powierzchni granicznej pierwszej. Funkcja ta zostaje dodana do funkcji stanowiącej przybliżenie powierzchni granicznej pierwszej z poprzedniego cyklu (lub do funkcji z wartościami zerowymi — w przypadku, jeżeli jest to pierwszy cykl obliczeń). Liczba symulacji potrzebnych do wyznaczenia tej funkcji w przybliżeniu wynosi $n^{\psi S} \cong 20$.

□ Drugi algorytm wyznacza nową „względną drugą powierzchnię graniczną” w sposób bardzo zbliżony do algorytmu stosowanego do wyrażenia [10], ale przy założeniu, że we wszystkich punktach s' istnieje już pobór wody zgodny z wartościami wyznaczonymi w wyniku realizacji pierwszego algorytmu (kolejnego przybliżenia pierwszej powierzchni granicznej). Wynik działania tego algorytmu stanowi w następnym cyklu dane wejściowe dla algorytmu pierwszego. W tym przypadku liczba symulacji jest zbliżona do liczby potrzebnej przy wyznaczaniu powierzchni drugiej $n^{\omega S}$.

Gdy wartości „względnej drugiej powierzchni granicznej” wyznaczone w kolejnym cyklu są dostatecznie małe, obliczenia cykliczne zostają przerwane i wynik pierwszego algorytmu traktowany jest jako wynik końcowy obliczeń wyznaczenia pierwszej powierzchni granicznej. Najczęściej niezbędna liczba tych cykli wynosi $i_c \cong 15$, a całość obliczeń związanych z wyznaczeniem pierwszej powierzchni granicznej wymaga wykonania $n^I_S = i_c (n^{\psi S} + n^{\omega S})$, co dla 2500 bloków w przybliżeniu wynosi 750 tys. symulacji stanu. Jednak przy obecnym poziomie rozwoju technik komputerowych obliczenia takie nie stanowią istotnego problemu.

Realizacja metodyki PDE w systemie ASPAR

Metodyka PDE została praktycznie zrealizowana w obiektowym systemie ASPAR przeznaczonym do budowy modeli hydrodynamicznych w hydrogeologii (Michalak, 1996, 1997b). System ASPAR jest hierarchiczną biblioteką klas w ujęciu obiektowym napisaną w języku C++. System ten funkcjonuje w programowym środowisku systemu GIS GRASS (Neteler, 2000) w wersji 5.0.b.11. Zarówno system

ASPAR, jak i system GRASS działają w środowisku systemu operacyjnego Unix — w tym przypadku systemu Solaris 8. System GRASS został opracowany w amerykańskim wojskowym ośrodku badawczym USA-CERL (U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories) i jest szczególnie odpowiedni do takich zastosowań (Michalak, 1997c).

Dane hydrogeologiczne (wejściowe, wewnętrzne i wynikowe) zawarte są w obiektach klas danych systemu ASPAR: NGC (*Numeric Grid Cell*), BGC (*Boolean Grid Cell*) i LT (*Leyer Topology*). Klasy te są pochodnymi od wirtualnych klas bazowych GC (*Grid Cell*), PD (*Physical Data*) i VO (*Void linked Object*). Modele hydrodynamiczne utworzone dla realizacji przedstawianych tu zadań są obiektami klas N1, NH1 i NH2. Klasami bazowymi dla klas modeli są wirtualne klasy HDM (*Hydro-Dynamic Model*) i VO (*Void linked Object*). Część tych klas i ich składowych metod została opracowana specjalnie w celu realizacji metodyki PDE.

Dzięki wbudowaniu systemu ASPAR w środowisko systemu GRASS podstawowe dane hydrogeologiczne, dotyczące badanego wyróżnienia rzeczywistego, znajdowały się trwale w bazie danych GRASSa. Poszczególne procedury systemu ASPAR (metody należące do wymienionych powyżej klas) mają bezpośredni dostęp do tej bazy, a wcześniejsze badania studialne (Michalak, 1997a, c) wykazały, że takie rozwiązanie daje największe możliwości budowy skomplikowanych modeli hydrogeologicznych przy pełnej weryfikacji danych wejściowych i wyników. Inne metodyki badań modelowych — niepowiązane z systemami GIS lub oparte na mechanizmach pre- i postprocesorów mają wiele ograniczeń, są znacznie mniej efektywne i nie mogą być stosowane w badaniach bardzo złożonych. System GIS przejmując od systemu symulacyjnego wiele funkcji: interfejsu graficznego użytkownika, zarządzania bazą danych przestrzennych, przetwarzania tych danych w aspekcie informacji geoprzestrzennej, wymiany danych z innymi systemami, graficznego opracowania i wyprowadzania danych w formie map i wydruków i wielu innych. Dzięki takiemu rozwiązaniu wszystkie wyniki badań modelowych opisanych w tym opracowaniu mogą być w prosty sposób przedstawione graficznie z zachowaniem wymagań kartograficznych, a także przetransformowane do rastrow numerycznych o innej definicji dla porównania z wynikami innych badań modelowych lub przeniesione do baz danych innych systemów GIS.

Przykłady zastosowań metodyki PDE

Metodykę PDE zastosowano w dwóch przypadkach:

□ W temacie badawczym PIG *Symulacyjne badania modelowe dla subregionu centralnego niecki mazowieckiej z wyznaczeniem zasobów dyspozycyjnych wód piętra trzeciorzędowego wód podziemnych piętra trzeciorzędowego*. Uzyskane wyniki potwierdziły przydatność tej metodyki w zastosowaniach regionalnych — dla dużych jednostek hydrogeologicznych. Powierzchnia obszaru, dla którego wyznaczono zasoby wynosi 19,6 tys. km². Pomimo wyznaczania zasobów tylko dla piętra trzeciorzędowego obliczenia symulacyjne obejmowały także piętro czwartorzędowe ze względu na przyjęte tam kryteria ograniczające.

□ Do określenia zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych międzyglinowego poziomu wodonośnego rejonu

zlewni Krynki. W tym przypadku powierzchnia obszaru zasobowego wynosiła 34,7 km² i można to uznać za przykład zastosowania skali lokalnej. Ze względu na problemy metodyczne wyznaczenia granic obszaru zasobowego badania te były wykonane w dwóch etapach. W pierwszym etapie analizowano znacznie większy obszar (123,7 km²) i na podstawie uzyskanych wyników w drugim etapie został określony bardziej szczegółowy model właściwy dla wyznaczenia zasobów zgodny z wymaganiami metodyki. Opis tych badań przedstawiony jest w pracy Małeckiej i in. (2001).

Wnioski

Przedstawiona tu metodyka wyznaczania zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych jest zgodna zarówno z przepisami prawnymi, jak i z przyrodniczą naturą tych zasobów. Jednak, pomimo udanych przykładów zastosowania jej zarówno w skali regionalnej, jak i lokalnej, stopień zaawansowania prac jest nadal na etapie eksperymentu naukowo-badawczego. Na tym etapie możliwość wprowadzenia jej do szerokiego praktycznego stosowania jest ograniczona i wymaga wielu dalszych prac, w szczególności nad zagadnieniami:

□ Wylimitowanie konieczności modyfikowania kodu źródłowego biblioteki klas ASPAR w celu określenia różnych typów i form warunków ograniczających odpowiednich dla różnych systemów hydrogeologicznych.

□ Dobór najefektywniejszych metod optymalizacji przy wyznaczaniu obu powierzchni granicznych.

□ Pełna automatyzacja procedury wyznaczania pierwszej powierzchni granicznej, ponieważ w obecnej postaci obliczenia te są wykonywane półautomatycznie, czyli wymagają w każdym kolejnym cyklu podawania „ręcznego” nowych parametrów początkowych wyznaczanych na podstawie oceny wyników cyklu poprzedniego.

□ Określenie przyrodniczego zakresu stosowalności tej metodyki i wbudowanie w oprogramowanie mechanizmów sprawdzania, czy zakres ten nie jest przekroczony. Szczególnie dotyczy to poprawności określania kryteriów ograniczających i przestrzennego zasięgu działania tych kryteriów.

Literatura

- KLECZKOWSKI A. S. & RÓŻKOWSKI A. (red.) 1997 — Słownik hydrogeologiczny. Wyd. TRIO, Warszawa.
- MAŁECKA D., MICHALAK J. & MAŁECKI J. 2001 — Zasoby dyspozycyjne wód podziemnych rzeki Krynki. Mat. X Ogólnopolskiego Symp. Nauk. Współcz. Probl. Hydrogeol., 1: 209–218.
- MICHALAK J. 1996 — Zastosowanie metod programowania obiektowego w języku C++ w sieci komputerowej do symulacji i analizy przepływu wody w systemach hydrogeologicznych. Sprawozdanie z realizacji projektu bad. KBN nr 9-S602-022-4. Arch. KBN, Warszawa.
- MICHALAK J. 1997a — OGIS — integracja systemów informacji geoprzestrzennej w geologii. Mat. Konf. Nauk. KBN Infobazy'97: 146–151, Gdańsk.
- MICHALAK J. 1997b. — Obiektowe modele w hydrogeologii — system ASPAR. Wyd. UW, Warszawa.
- MICHALAK J. 1997c — Modelowanie procesów hydrogeologicznych w środowisku GIS. Mat. XII Symp. Modelowanie matematyczne w hydrogeologii i ochronie środowiska: 9–15, Częstochowa.
- NETELER M. (ed.) 2000 — GRASS 5.0 — Programmer's Manual, URL: <http://www.baylor.edu/~grass/grass50/progmangrass50.pdf>.
- PACZYŃSKI B., MACIOSZCZYK T., KAZIMIERSKI B. & MITRĘGA J. 1996 — Ustalanie dyspozycyjnych zasobów wód podziemnych. Poradnik metodyczny. Wyd. TRIO, Warszawa.