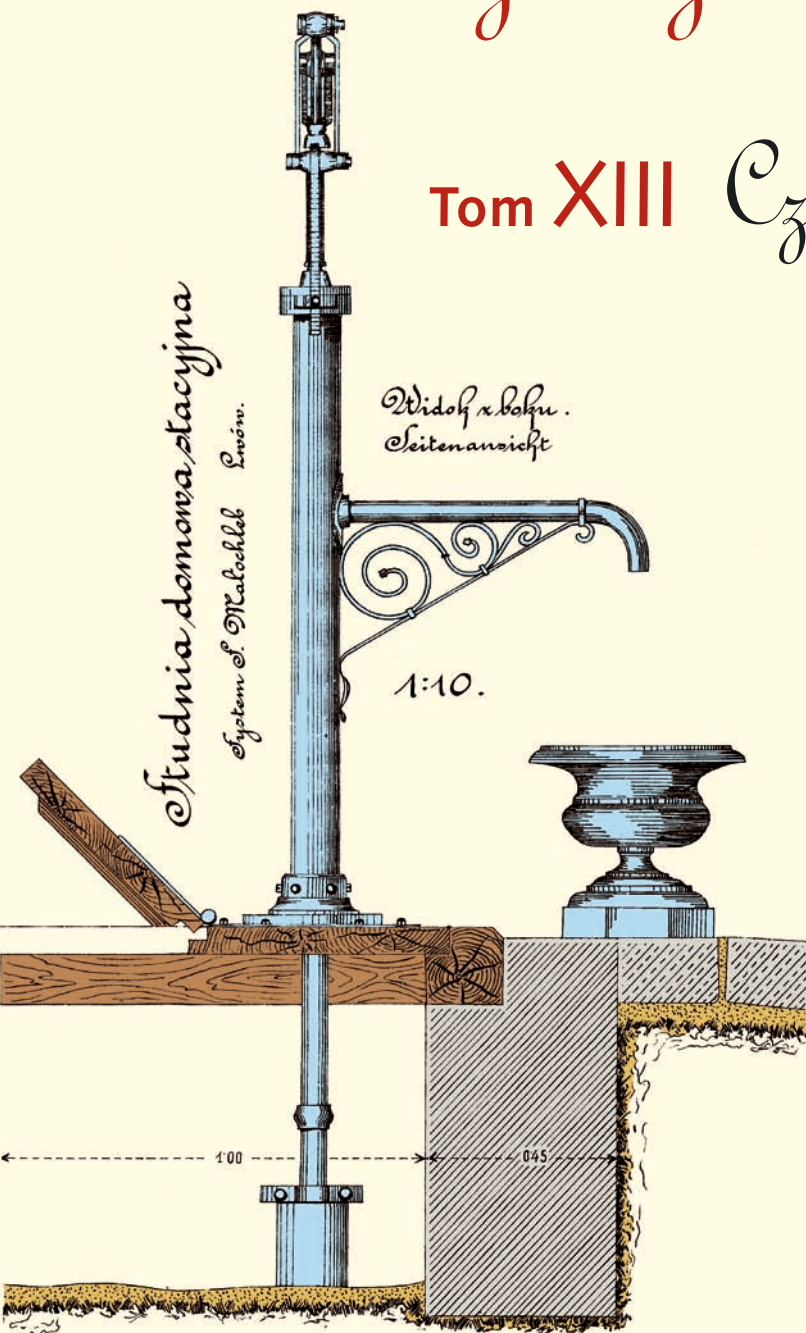


Współczesne problemy hydrogeologii

Tom XIII Część 3.





Wydanie publikacji zostało sfinansowane przez
Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej

Recenzenci:

Jadwiga Szczepańska
Wojciech Ciężkowski
Józef Górski
Andrzej Kowalczyk
Ewa Krogulec
Grzegorz Malina
Jerzy Małecki
Marek Marciniak
Jacek Motyka
Marek Nawalany
Jan Przybyłek
Andrzej Rózkowski
Andrzej Sadurski
Andrzej Szczepański
Stanisław Staško
Stanisław Witczak
Andrzej Zuber

Redakcja: Andrzej Szczepański, Ewa Kmiecik, Anna Żurek

Teksty artykułów w częściach 2. i 3. zostały wydrukowane z wersji elektronicznej dostarczonej przez Autorów, metodą bezpośredniej reprodukcji (*camera ready*)

Projekt okładki i stron tytułowych: Andrzej Tomaszewski

Na okładce: fragment projektu studni miejskiej we Lwowie z 1906 roku
— ze zbiorów prof. **Antoniego S. Kleczkowskiego** (1922–2006)

Korekta: Zespół

Skład komputerowy systemem $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$: pre $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ t, www.pretext.com.pl

Druk: ROMA-POL, www.romapol.pl

ISBN-13 978-83-88927-16-4

Janusz Michalak

Wysokorozdzielcze hydrogeologiczne modele przepływu

High-Resolution Hydrogeological Models of Flow

Słowa kluczowe

model hydrogeologiczny, symulator przepływu, GIS, informacja geoprzestrzenna, pokrycie macierzowe

Key words

hydrogeological model, flow simulator, GIS, geospatial information, matrix coverage

Abstract

Hydrogeological models of flow base on the mathematical physics equations, which assume continuity of porous medium. Due to this their numerical realization, both in the finite elements method and the finite differences method, requires considerable simplifications. Scope of these reductions in main measure depends on resolution of tessellation network. Application of networks with variable density is not well-founded in every case and often it improves quality of model only in low degree. Comparison of results obtained from highresolution hydrological model of surface flow with the grid applied in typical hydrogeological models distinctly shows too low resolutions of the second ones. Now, we can construct hydrogeological models with considerable higher resolution then it is commonly used. In many cases, it is necessary in order that models will be sufficiently faithful to modeled real objects. Data preparation for such models and analysis of results involve application of geospatial information software, for instance GIS. But it does not resolve entirely all problems computer-aided data preparation and there are necessary research works in that scope. Their results bring opportunities to develop algorithms of processing geospatial data in vector format to form appropriate for application in numerical models.

1. Wstęp

Termin model ma wiele znaczeń – dotyczy wieku różnych pojęć. Wikipedia (Wolna Encyklopedia) podaje kilka definicji tego terminu (Wikipedia, 2006), w odniesieniu do nauki model to: „System założeń, pojęć i zależności między nimi pozwalający opisać (zamodelować) w przybliżony sposób jakiś aspekt rzeczywistości, na przykład model fizyczny, model neurologiczny, model statystyczny itp. Model na ogół wyrażany w języku matematyki (tzw. model matematyczny), gdyż taki sposób zapisu daje możliwość jego doświadczalnego sprawdzenia. Modelowanie matematyczne to użycie języka matematyki do opisanego zachowania jakiegoś układu, na przykład układu automatyki, biologicznego, ekonomicznego, elektrycznego, mechanicznego, termodynamicznego. Model to także przedmiot badań, podobna oryginału, której badanie pozwala otrzymywać informacje na temat rzeczywistości. Model to również reprezentacja otaczającego świata w umyśle człowieka. Ludzie tworzą przez cały czas własne modele otoczenia, często myślą je jednak z rzeczywistością.”

W hydrogeologii nasze wyobrażenia o zjawiskach i procesach dotyczących lub związanych z wodą znajdującą się pod powierzchnią ziemi również oparte są na wielu różnych modelach zapisywanych i wyrażanych na wiele różnych sposobów. Wśród różnych rodzajów modeli hydrogeologicznych szczególne znaczenie mają modele przepływu wody podziemnej oparte na równaniach fizyki matematycznej (Tichonow, Samarski, 1963) odniesionych do przepływu cieczy w ośrodku porowatym. Równania te są rozwinięciem równania Laplace’a, należącego do typu równań eliptycznych, przy uwzględnieniu prawa zachowania masy i prawa Darcy’ego jako wtórnego odpowiednika prawa zachowania energii. Najogólniejszą postać równania opisującego przepływ wody podziemnej podają Remson i inni (1971). Jego trochę zmodyfikowana postać jest następująca:

$$\frac{\partial(\rho \theta)}{\rho \partial t} = \nabla [K(\theta) \nabla \varphi] + q$$

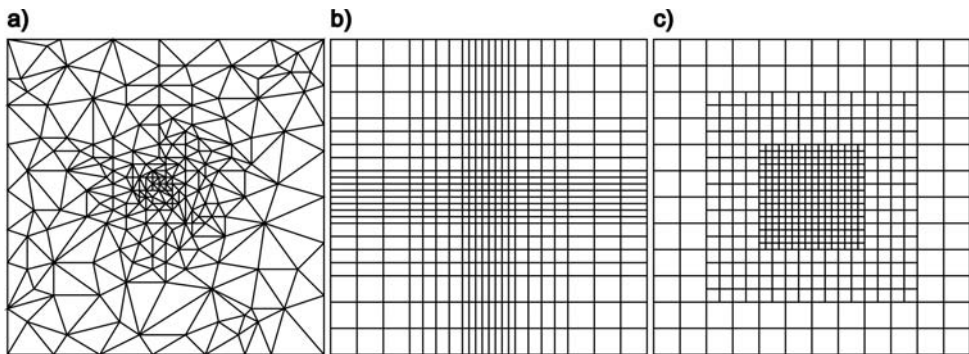
gdzie: ρ – gęstość wody [ML^{-3}], θ – wskaźnik nasycenia [L^3L^{-3}], $K(\theta)$ – współczynnik filtracji jako funkcja wskaźnika nasycenia [LT^{-1}], φ – potencjał całkowity wody podziemnej wyrażony wysokością słupa wody: ψ/g [L], ψ – potencjał całkowity wody podziemnej [L^2T^{-2}], g – przyspieszenie ziemskie [LT^{-2}], q – funkcja źródła [T^{-1}], $\partial/\partial t$ – pochodna cząstkowa po czasie [T^{-1}], ∇ – operator nabra.

Na bazie tego równania, a także wielu innych wyprowadzonych z niego na drodze uproszczeń, budowane są modele numeryczne przepływu wody podziemnej. W stosowanych tu metodach numerycznych opartych na aproksymacji różniczek za pomocą różnic skończonych, zjawiska i procesy ciągłe w przestrzeni i czasie są przedstawiane za pomocą schematów dyskretnych określonych w skończonej liczbie punktów przestrzeni i chwil czasu. Taka aproksymacja prowadzi często do daleko idących konsekwencji – może sprawić, że wierność modelu wobec obiektu rzeczywistego jest daleka od oczekiwanej. Jedną z tego przyczyn może być nieprzestrzeganie heurystycznej „reguły trzech punktów” – trzech pośred-

nich węzłów siatki dyskretyzacji, w myśl której pomiędzy dwoma istotnymi elementami modelu, na przykład brzegiem rzeki i studnią, a ściślej pomiędzy punktami lokalizującymi te elementy, dla poprawności opisu matematycznego powinny być przynajmniej trzy punkty pośrednie.

2. Metodyka tradycyjne

Spełnienie tej reguły jest często bardzo trudne, a czasem nawet niemożliwe. Z pierwszym przypadkiem mamy do czynienia w modelach „lokalnych”, które obejmują stosunkowo niewielki obszar będący najczęściej otoczeniem studni lub ujęcia jako grupy studni. W takim przypadku część modelu jest szczególnie „ważna” – jest to bezpośrednie otoczenie ujęcia, a inne fragmenty modelu bardziej odległe od ujęcia są mniej „ważne”. Dla spełnienia wymagań „reguły trzech punktów” stosuje w tej sytuacji nieregularną teselację przestrzeni modelu – bardziej gęstą w części „ważnej” i rzadszą w częściach pozostałych. W modelach opartych na metodzie elementu skończonego teselacją taką jest nieregularna triangulacja, w wyniku której powstaje nieregularna sieć trójkątów (rys. 1a). W modelach bazujących na metodzie różnic skończonych zagadnienie to jest trochę trudniejsze. Można w takim przypadku zastosować nieregularną dyskretyzację – zmienne wartości Δx i Δy , co jest mało efektywnym rozwiązaniem (rys. 1b) lub lokalne zagęszczenie siatki poprzez zastosowanie tak zwanej „lupy” (rys. 1c). To ostatnie rozwiązanie stosowane jest od wielu lat w programach biblioteki Hydrylib (Szymanko i in., 1977), a ostatnio także w nowej wersji systemu Modflow (Mehl, Hill, 2005). Jednak każdy z tych sposobów komplikuje obliczenia i znacznie utrudnia przygotowanie danych. Również uznanie jakiegoś fragmentu modelu za „ważny” budzi wiele wątpliwości nie zawsze jest metodycznie poprawne, szczególnie, gdy badania modelowe mają charakter wielowariantowy w poszukiwaniu najkorzystniejszej lokalizacji projektowanego ujęcia.



Rysunek 1. Trzy sposoby zagęszczania siatki teselacyjnej hydrogeologicznego modelu przepływu wody: a) dla metod elementów skończonych; b) i c) w metodach różnic skończonych (zmienne wartości Δx i Δy lub tak zwana „lupa”)

Figure 1. Three ways of grid refinement of tessellation in hydrogeological models of groundwater flow: a) for finite element methods; b) and c) in finite difference methods (variable values of Δx and Δy or so-called „magnifying glass”)

Znacznie więcej problemów z tego zakresu występuje w modelach regionalnych lub „pół-regionalnych” (Michalak, 1985), na przykład modelu obejmującym zlewnię. Najczęściej w takich modelach wszystkie fragmenty są jednakowo „ważne”, a stosowane siatki są tak „grube”, że w jednym bloku występuje często kilka istotnych elementów modelu, na przykład fragment rzeki i kilka studni lub innych elementów silnie oddziałujących na stan modelu. W takich przypadkach stosowana jest często koncepcja modeli komórkowych nazywanych także modelami blokowymi (Szymanko, 1980), w których opis procesu przepływu wody podziemnej wewnątrz bloku jest bardzo uproszczony, a prawa zachowania masy i energii stosuje się tylko do przepływów międzyblokowych i warunków brzegowych – zewnętrznych i „wewnętrznych”.

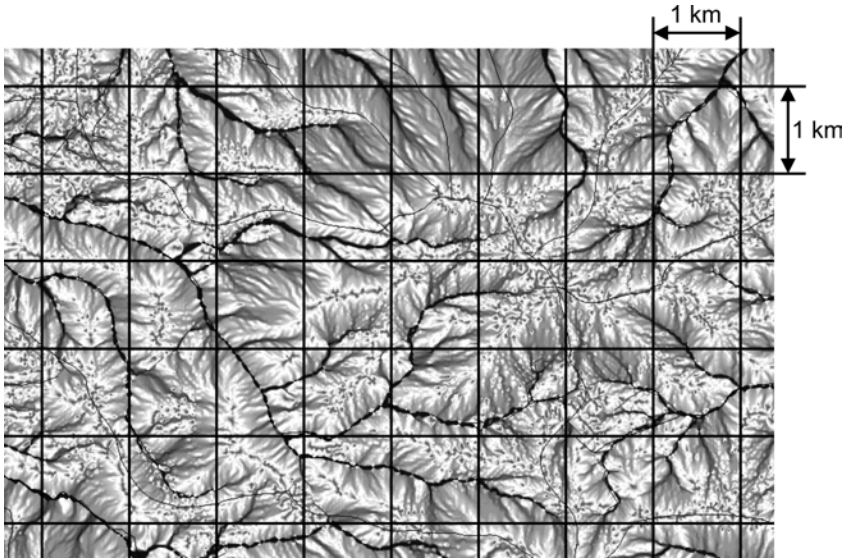
Szczególnym rodzajem modeli regionalnych i „pół-regionalnych” są modele, których zadaniem jest wyznaczenie zasobów dyspozycyjnych (Michalak, 2002). W takich modelach wszystkie miejsca są jednakowo „ważne” i stosowanie lokalnego zagęszczenia siatki jest całkowicie nieuzasadnione. W tym przypadku najbardziej racjonalnym rozwiązaniem jest przyjęcie siatki jednakowo „gęstej” dla całego obszaru i możliwie jak najprostszej, co w konsekwencji prowadzi do siatki kwadratowej. Taka siatka ma wiele zalet, a przede wszystkim znacznie upraszcza obliczenia, w rezultacie znacznie skraca czas ich trwania i nie angażuje znacznych zasobów komputera – pamięci operacyjnej i mocy obliczeniowej procesora. Również przygotowanie danych do modelu o siatce kwadratowej jest znacznie prostsze i mniej czasochłonne, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia liczby błędów w tych danych.

Przedstawione tu korzyści wynikające z zastosowania siatek kwadratowych pozwalają na zwiększenie ich „gęstości”, często aż dwukrotnie. Jednak pomimo tego gęstość ta prawie zawsze jest niedostateczna – nie pozwala na spełnienie wymagań „reguły trzech punktów”. Prowadzi to do wniosku, że w większości przypadków numeryczne modele przepływu wody podziemnej są budowane w oparciu o niedostatecznie „gęste” siatki teselacyjne i jednym ze sposobów na zwiększenie wierności tych modeli jest stosowanie siatek znacznie gęstszych. Pozostaje pytanie, jak bardzo „gęste” siatki można obecnie w tych modelach stosować?

Odpowiedź na to pytanie jest uzależniona od stosowanych rozwiązań technologicznych i technicznych. Stan obecny pod tym względem w większości przypadków jest następujący:

- Do badań modelowych stosuje się komputery osobiste lub „komputery domowe” nie przystosowane do obliczeń profesjonalnych.
- Najczęściej stosowanym oprogramowaniem jest Visual Modflow – stosunkowo łatwy w obsłudze, lecz ukierunkowany na tradycyjne podejście do modelowania hydrogeologicznego i praktycznie niemodyfikowalny.
- Dane do modeli przygotowywane są „ręcznie na papierze” bez, lub z ograniczonym wykorzystaniem danych w postaci cyfrowej. Pewne wspomaganie w tych pracach daje interfejs graficzny programu Visual Modflow.
- Również analiza wyników i ich opracowanie końcowe dokonywane są w znacznym stopniu „ręcznie” – czasami z zastosowaniem programów graficznych.

Taka sytuacja w zakresie stosowanych technologii i technik ogranicza przestrzenną rozdzielczość modeli i w rezultacie najczęściej ich siatki nie przekraczają wymiarów $100 \times 100 = 10\,000$ bloków, co daje w rezultacie liczbę bloków w modelu około 5 000 do 7 000. W konsekwencji w modelach regionalnych lub „pół-regionalnych” wielkości Δx i Δy wynoszą najczęściej 1000 m, a znacznie rzadziej 500 m. Program Visual Modflow pozwala na budowanie modeli o wymiarach siatki do $500 \times 500 = 250$ tys. bloków, jednak poważne problemy z „ręcznym” lub „półautomatycznym” przygotowaniem danych i analizą wyników sprawiają, że takie modele są budowane niezwykle rzadko.



Rysunek 2. Fragment siatki hydrogeologicznego modelu „pół-regionalnego” o blokach $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ dla wyznaczania zasobów dyspozycyjnych wody podziemnej na tle wyników symulacji spływu powierzchniowego uzyskanych z modelu hydrologicznego o blokach $10\text{ m} \times 10\text{ m}$

Figure 2. Fragment of grid in semi-regional hydrogeological model with cells size $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ for potential resources of groundwater estimation against the background of results of run-off simulation from hydrological model with cells size $10\text{ m} \times 10\text{ m}$

3. Doświadczenia wynikające z praktyki

Doświadczenia autora, uzyskane w trakcie realizacji badań modelowych dla wyznaczenia zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych części D (Radzymin) obszaru bilansowego Z8b położonego na Mazowszu, wykazały potrzebę stosowania siatek o znacznie wyższej rozdzielczości niż ta, którą się najczęściej w takich przypadkach stosuje. Dotyczy to szczególnie sytuacji, gdy:

- modelowany jest pierwszy poziom wodonośny,

- na modelowanym obszarze lub jego części panują warunki zwierciadła swobodnego,
- ukształtowanie powierzchni terenu jest bardzo urozmaicone,
- występuje dobrze rozwinięta sieć wód powierzchniowych,
- związki wód podziemnych z wodami powierzchniowymi są silne,
- znajduje się tam wiele ujęć wód podziemnych, często w skupiskach, gdzie odległości pomiędzy ujęciami są niewielkie,
- poszczególne ujęcia są położone w bliskim sąsiedztwie rzek i mniejszych cieków.
- Porównanie zastosowanej w tym modelu siatki o kroku $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ z obrazem uzyskanym z hydrologicznego modelu spływu powierzchniowego z siatką o kroku $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ wyraźnie pokazuje, że traktowanie bloku o powierzchni 1 km^2 jako elementu jednorodnego jest bardzo dużym uproszczeniem (rys. 2). Teselacja porównywanych modeli jest następująca:
- Model zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych – wymiar bloków: $\Delta x = \Delta y = 1000 \text{ m}$, 2 835 bloków w obrębie modelu, 63 kolumny i 45 wierszy.
- Model hydrologiczny spływu powierzchniowego – wymiar bloków: $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ m}$, ponad 28 mln. bloków w obrębie modelu, 6 300 kolumn i 4 500 wierszy.

4. Uwagi metodyczne

Model hydrologiczny w porównaniu z modelem hydrogeologicznym należy w takim przypadku uznać za model o wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Uzyskanie tak wysokiej rozdzielczości dla modeli przepływu wody podziemnej jest bardzo trudnym zadaniem i prawdopodobnie jest to nie potrzebne. Należy przypuszczać, że stosowną rozdzielczością byłaby siatka o wymiarach bloków w granicach od 20 m do 100 m, co w rozpatrywanym przypadku dałoby od około 7 mln. do około 283 tys. bloków w obrębie modelu. Realizacja takich modeli hydrogeologicznych nie jest łatwa, ale jest całkowicie realna. Konieczne jest jednak spełnienie określonych poniżej warunków metodycznych, technologicznych i technicznych:

- Rozwiązywanie tak dużych układów równań podczas symulacji stanu wymaga zastosowania odpowiednich metod numerycznych gwarantujących poprawność i stabilność rozwiązania, które następnie powinno być zweryfikowane.
- Do obliczeń symulacyjnych potrzebne jest zastosowanie profesjonalnych komputerów, na przykład wieloprocesorowych o architekturze 64-bitowej z pamięcią operacyjną przynajmniej 4 GB. Wskazana jest także dostatecznie duża pojemność dysków z możliwością zapisywania plików roboczych o wielkości powyżej 4 GB. Obecnie dostęp do takich komputerów nie stanowi istotnego problemu.
- Przygotowanie danych do modelu i analiza uzyskanych wyników wymaga zastosowania odpowiednich systemów geoinformatycznych (typu GIS) i wykorzystania dostęp-

nych danych w postaci cyfrowej. Doświadczenia wykazały, że spełnienie obu tych warunków jest możliwe, na przykład można zastosować system GIS Grass lub system MMS wspomagany przez ArcInfo, a niezbędne dane cyfrowe dla większości obszaru Polski także są dostępne.

- Do budowy modeli o tak wysokiej rozdzielczości nie mogą być zastosowane popularne programy na przykład Visual Modflow. To również nie stanowi problemu, ponieważ opracowany przez autora system Aspar (Michalak, 1997a) spełnia wszystkie potrzebne w tym przypadku wymagania, a fakt, że działa on w środowisku GIS Grass (Michalak, 1997b) spełnia również wymagania określone w punkcie poprzednim. Pewnym utrudnieniem w szerszym zastosowaniu proponowanych tu rozwiązań jest to, że oba systemy, GIS Grass i system Aspar działają w środowisku systemu operacyjnego Unix, w tym przypadku Solaris. Jednak fakt ten ma także pozytywne znaczenie – umożliwia użycie komputerów profesjonalnych, spełniających wymagania wyszczególnione wcześniej.
- Odrębnym zagadnieniem wymagającym dalszych szczegółowych prac badawczych jest opracowanie optymalnych algorytmów i w konsekwencji oprogramowania przeznaczonych do przetwarzania dostępnych danych w postaci cyfrowej do postaci odpowiedniej dla budowy modeli (Michalak, 2003). Wymienione wcześniej systemy geoinformacyjne posiadają wiele procedur i funkcji odpowiednich dla takiego przetwarzania geoinformacji, lecz jednak mają one charakter „ogólnego zastosowania” i często nie spełniają wymagań specyficznych dla rozwiązywania zagadnień brzegowych w hydrogeologii. W szczególności dotyczy to „automatycznego” generowania danych opisujących warunki brzegowe, na przykład liniowa interpolacja rzędnych zwierciadła wody w ciekach wzdłuż opisujących je linii segmentowanych zapisanych wektorowo.

5. Wnioski

- 1) Numeryczne modele przepływu wody podziemnej są słabo przybliżoną aproksymacją równań różniczkowych opisujących te procesy. Stopień tej aproksymacji w głównej mierze zależy od gęstości siatki teselacyjnej.
- 2) Ze względów technicznych i technologicznych powszechnie stosowane w tych modelach siatki są zbyt „grube”, co sprawia, że w wielu przypadkach nie jest spełniona „reguła trzech punktów” i z tego powodu często wierność modeli nie jest dostateczna.
- 3) Rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie siatek znacznie bardziej gęstych, modele takie można nazwać modelami wysokorozdzielczymi i w tym przypadku najbardziej racjonalnym typem siatki jest regularna siatka kwadratowa.
- 4) Modele wysokorozdzielcze mają przynajmniej kilkaset tysięcy bloków i z tego względu wymagają zastosowania zaawansowanych technologii przygotowania danych i analizy wyników, także dobranych metod numerycznych i profesjonalnego sprzętu komputerowego.

- 5) Przygotowanie danych do takich modeli i analiza wyników wymagają zastosowania systemów informacji geoprzestrzennej (GIS) i danych pierwotnych w postaci cyfrowej, które już najczęściej są dostępne.
- 6) Nowa technologia przygotowania danych i analizy wyników wymaga ścisłego powiązania oprogramowania symulacyjnego z systemami GIS i powiązanie to powinno być oparte na zasadach interoperacyjności lub przez wbudowanie symulatora w system geoinformatyczny.
- 7) W modelach takich proporcje pomiędzy poszczególnymi fazami prac „przygotowanie danych → symulacja → analiza wyników” są bardziej odpowiednie: „1 do 3 miesięcy → kilkadziesiąt godzin → kilka dni”. W modelach tradycyjnych to: „kilka miesięcy → kilkadziesiąt sekund → kilka tygodni”.
- 8) Zaawansowane wektorowo-rastrowe systemy GIS posiadają większość procedur i funkcji niezbędnych do przetwarzania danych dla potrzeb symulatorów, jednak one nie zawsze spełniają dostatecznie stawiane wymagania i potrzebne są tu dalsze prace badawcze i programistyczne.

Literatura

- Mehl S. W., Hill M. C., 2005: *Modflow-2005, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – Documentation of Shared Node Local Grid Refinement (LGR) and the Boundary Flow and Head (BFH) Package*. Chapter 12 of book 6, Modeling Techniques – Section A – Ground Water, Colorado, Denver, U.S. Geological Survey.
URL: <http://pubs.usgs.gov/tm/2006/tm6a12/pdf/TM6-A12.pdf>
- Michalak J., 1985: *Charakterystyka pakietu programów ANPLA jako podstawa budowy dużych modeli regionalnych*. Materiały Konferencji „Modelowanie dużych regionalnych systemów wodonośnych”. Warszawa, Wydawnictwo OPT NOT, str. 55-71.
- Michalak J., 1997a: *Obiektowe modele w hydrogeologii – system ASPAR*. Warszawa, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, ISBN 83-230-9965-0.
- Michalak J., 1997b: *Modelowanie procesów hydrogeologicznych w środowisku GIS*. Materiały XII Sympozjum „Modelowanie matematyczne w hydrogeologii i ochronie środowiska”, Częstochowa, str. 9-15.
- Michalak J., 2002: *Wyznaczanie zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych oparte na metodyce PDE*. Przegląd Geologiczny, vol. 50, nr 10, str. 846-851.
- Michalak J., 2003: *Modele pojęciowe hydrogeologicznych danych geoprzestrzennych – podstawy metodyczne*. Biuletyn PIG – Hydrogeologia, z. V, nr 406, Warszawa, Państwowy Instytut Geologiczny, ISBN 83-7372-633-0.
- Remson I., Hornberger G. M., Molz F. J., 1971: *Numerical Methods in Subsurface Hydrology*. New York, Wiley-Interscience, ISBN 0-471-71650-2.
- Szymanko J., 1980: *Koncepcje systemu wodonośnego i metody jego modelowania*. Warszawa, Wydawnictwa Geologiczne, ISBN 82-220-0027-8.
- Szymanko J., Kreczmar A., Nowicki K., Poliszot W., Dąbrowski S., 1977: *Budowa modeli matematycznych w hydrogeologii – biblioteka systemowa HYDRYLIB*. Materiały konferencji NOT „Zastosowanie metod matematycznych w geologii”, Warszawa.
- Tichonow A. N., Samarski A. A., 1963: *Równania fizyki matematycznej*. Warszawa, Państwowe Wydawnictwa Naukowe.
- Wikipedia (praca zbiorowa), 2006: *Wolna encyklopedia – hasło: model*.
URL: <http://pl.wikipedia.org/wiki/Model>.