

NUMERYCZNE MODELOWANIE W POLSKIEJ HYDROGEOLOGII – KRÓTKI PRZEGLĄD DOKONAŃ Z LAT 2004–2017

NUMERICAL MODELLING IN POLISH HYDROGEOLOGY – SHORT REVIEW OF RESULTS IN 2004–2017 YEARS

STANISŁAW STAŚKO¹

Abstrakt. Przegląd ponad 200 publikacji z zakresu numerycznego modelowania w hydrogeologii stanowi podstawę do zaprezentowania postępu i rozwoju tej szeroko stosowanej metody, szczególnie w latach 2004–2017. Wskazano trzy etapy rozwoju badań metodami modelowania. Omówiono główne trendy w zakresie modelowania przepływu wód podziemnych, migracji mas i zanieczyszczeń, zastosowań praktycznych, badania procesów i doskonalenia warsztatu badawczego. Podkreślając wiele zalet tej metody, podano wybrane przykłady, jak również wskazano na jej ograniczenia i wady. Na zakończenie przedstawiono przegląd najczęściej używanych słów kluczowych. Z natury rzeczy tego typu przegląd jest subiektywnym opisem opartym na doświadczeniu autora i doniesieniach literaturowych.

Słowa kluczowe: modelowanie numeryczne, modele zasobowe, transport mas, ograniczenia i wady modelowania.

Abstract. Review of more than 200 publications on numerical modelling in hydrogeology has been presented as a base for the presentation the progress and development of this widely used method, especially during the years 2004–2017. Three stages in the research methods of modelling has been noticed. The main trends in the field of modelling groundwater flow, the mass transport and pollutants migration, practical applications, research processes and improvement of the research method has been discussed. Highlighting the many benefits of this method are given some examples as well as indicated on the constraints and disadvantages during the groundwater modelling. At the end provides an overview of the most frequently used keywords. The nature of things the review is subjective descriptions based on the experience of the author and of literature review.

Key words: numerical modelling, resources model, mas transport, limitation and deficiency of groundwater modelling.

WSTĘP

Badania modelowe wód podziemnych zapoczątkowano w latach 60. ubiegłego stulecia, a już od lat 70. datuje się zastosowanie metod numerycznych w naszym kraju. Badania modelowe były głównie rozwijane na AGH w Krakowie i w ośrodkach wrocławskich związanych z górnictwem odkrywkowym. Stosowano wówczas metody analogii hydraulicznej i modele analogii elektrohydrodynamicznej AEHD (np. Bieniewski, 1968; Szczepański, 1974; Flisowski, Wiczysty, 1979). Postęp w numerycznym modelowaniu nastąpił natomiast wraz z rozwojem technik komputerowych i programów modelujących. Można tu wyróżnić dwa etapy

– poznański i warszawski. Etap poznański to opracowanie biblioteki hydrogeologicznych programów modelujących HYDRYLIB w latach 1974–1992 pod kierunkiem J. Szymanko. Algorytmy numeryczne programów bazowały na metodzie różnic skończonych (Szymanko, 1980; Szymanko i in., 1980).

Etap warszawski to modelownie dużych regionalnych systemów hydrogeologicznych (głównie niecki mazowieckiej) i programy systemu ANPLA.

Wyniki ówczesnych prac zaprezentowano m.in. na sesji naukowej w Warszawie, która odbyła się w dniach 25–26 listopada 1985 r. Sesję zorganizowały zespoły badawcze Polskiego Komitetu Naukowo-Technicznego NOT oraz

¹ Uniwersytet Wrocławski, Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska, ul. Cybulskiego 32, 50-205 Wrocław; e-mail: stanislaw.stasko@uwr.edu.pl.

Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej Uniwersytetu Warszawskiego.

Szczegółowy opis dokonań poszczególnych autorów z tego okresu można znaleźć w drugim rozdziale monografii pt. „Metodyka modelowania matematycznego w badaniach i obliczeniach hydrogeologicznych. Poradnik metodyczny” pod redakcją S. Dąbrowskiego, J. Kapuścińskiego, K. Nowickiego, J. Przybyłka i A. Szczepańskiego (2011).

Pod koniec XX w. i na przełomie XX i XXI stulecia pojawiły się nowe programy, takie jak: MODFLOW, MIKE, SHE, GMS, FEFLOW, AQUA, MT3D, MTSD i PHREEQC czy SPILCAD i in., ukazujące nowe możliwości w rozwiązywaniu skomplikowanych zagadnień przepływu wód podziemnych, transportu mas i ciepła, obliczeniach dopływów do kopalń, tworzenia prognoz i wizualizacji ich wyników.

MODELOWANIE HYDROGEOLOGICZNE I WYBRANE WYNIKI BADAŃ Z LAT 2004–2017

Od 2004 r. możemy mówić o trzecim etapie regularnych sesji naukowych i publikacji wyników badań modelowych w hydrogeologii. Etap najnowszy to cykliczne spotkania i dyskusje pod hasłem „Modelowanie przepływu wód podziemnych” (MPWP). Zapoczątkowano je warsztatami na Uniwersytecie Wrocławskim w Instytucie Nauk Geologicznych (2004 r.), które przerodziły się w spotkania specjalistów z zakresu modelowania i regularne konferencje MPWP – ich zestawienie zawarto w [tabeli 1](#). Pierwsze w XXI w. spotkanie hydrogeologów, specjalizujących się w modelowaniu matematycznym, zaowocowało 22 artykułami, w których skoncentrowano się głównie na zagadnieniach bilansowych i zasobowych ([tab. 2](#), [fig. 1](#)). Drugą grupą problemów były zagadnienia metodyczne, natomiast w niewielkim stopniu opisano wyniki modelowania procesów hydrochemicznych. Jednak już na drugiej konferencji MPWP wzrosło zainteresowanie jakością wód podziemnych i procesami hydrochemicznymi, o czym może świadczyć większa liczba publikacji w czasopiśmie *Geologos* – 5 artykułów.

W [tabeli 2](#) i na [figurze 1](#) zestawiono zagadnienia ujęte w opublikowanych pracach z zakresu modelowania w podziale na pięć kategorii:

1. obliczenia zasobowe i bilanse wodne ujęć oraz głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP);
2. badania geochemiczne;
3. problemy hydrogeologii górniczej;
4. metodyka modelowania;
5. procesy hydrogeologiczne i wyniki ich modelowania.

W czwartej kategorii – metodycznej – zawarto takie problemy jak: przygotowanie tablic danych, identyfikacja parametrów, weryfikacja i walidacja modelu na podstawie znaczników. Do tej grupy należy zaliczyć również wykorzystanie infrastruktury geoinformatycznej INSPIRE, stosowanie metody przekształceń stałoobjętościowych, GIS oraz badania ośrodków anizotropowych i o podwójnej porowatości. Niewątpliwie można tu dodać także zagadnienia z zakresu granicy modelu przy ustalaniu zasobów dyspozycyjnych

czy schematyzacji struktury modelu w przypadku złożonych wielowarstwowych zbiorników wód podziemnych.

Do piątej kategorii – procesów – zaliczono głównie: zasilanie infiltracyjne wód podziemnych, model efektów zatlaczania CO₂ do poziomów wodonośnych, laboratoryjne eksperymenty kolumnowe i migrację wód intensywnie zabarwionych.

W 2014 r. w Toruniu przyjęto podział zagadnień na trzy grupy:

1. metody i narzędzia wspomagające modelowanie procesów hydrogeologicznych;
2. modele przepływu wód podziemnych;
3. modele hydrogeochemiczne i termodynamiczne.

W spotkaniu modelowym zorganizowanym przez AGH w Zakopanem w 2016 r. wprowadzono nowość w postaci sesji panelowych dotyczących oceny przestrzennego zasilania wód podziemnych oraz krytycznej oceny wyników modelowania pod hasłem „nie taki (model) dobry, jak go malują”.

Kolejne wydaniach z dotychczasowych siedmiu konferencji MPWP zawierają wyniki badań modelowych, największą liczbę publikacji odnotowano w 2008 r. – 35 art., najmniej natomiast ukazało się w 2004 r. – 22 art. Modelowanie systemów wodonośnych do obliczeń zasobowych i prognoz realizowano głównie dla GZWP oraz dużych ujęć wodnych czy kopalń. Wiele prac dotyczyło określenia zasobów wód podziemnych oraz kształtowania się ich zasobów w odmiennych ośrodkach hydrogeologicznych Sudetów na podstawie badań modelowych (np. Olichwer, Weisło, 2014).

W początkowym okresie modelowano głównie zasoby wód podziemnych GZWP i systemy przepływów. Obecnie w publikacjach dominują badania z zakresu doskonalenia metodyki i integracji różnego rodzaju oprogramowania do modelowania przepływu wód podziemnych (ponad 40% wydanych artykułów). Podobną tendencję wykazują badania z zakresu analizy procesów geochemicznych. Wraz z pojawieniem się cyklu konferencji pt. „Hydrogeologia w praktyce...” zanikają publikacje odnoszące się do problemów górniczych.

W 2006 r. Felkel i Kasztelan, wykonując pierwszy przegląd publikacji o numerycznych metodach modelowania w hydrogeologii, stwierdzili, że w latach 1980–2004 termin „modelownie numeryczne przepływu wód” pojawił się 330 razy. Oznacza to średnio ok. 14 publikacji rocznie. Przy czym większość symulacji przeprowadzano głównie za pomocą programu MODFLOW na modelach o 1-, 2- lub 3-warstwowych układach. Sygnalizowano brak analiz w warunkach filtracji nieustalanej na modelach regionalnych.

W kolejnych latach wykorzystywano niestacjonarny model przepływu przykładowo do oceny rzeczywistej wielkości eksploatacji wód podziemnych z piętra jurajsko-kredowego na obszarze intensywnych nawodnień rolniczych w rejonie Kalisza (Matusiak, Przybyłek, 2017). Próby modelowania procesów niestacjonarnych podejmowali również Dąbrowski i in. (2006), modelując zmienność zasilania na ujęciu Zduny, Polańska i Piekarek-Jankowska (2006) w strefie brzegowej zatoki Gdańskiej oraz Gruszczyński i Małecki (2006), jak również Zdechlik i in. (2008) dla kopalni GZW.

Tabela 1

Konferencje „Modelowanie przepływu wód podziemnych” (MPWP) i ich organizatorzy

Conferences on “Modelling of groundwater flow” and organizations

Nr konferencji	Data	Organizatorzy	Miejsce	Redaktorzy wydań
I	24–25.09.2004	Uniwersytet Wrocławski, Instytut Nauk Geologicznych	Wrocław	J. Gurwin, S. Staško (<i>Acta Universitatis Wratislavenensis</i> nr 2729)
II	15–17.11.2006	Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu, Instytut Geologii	Ciążeń	K. Dragon, M. Okońska, M. Marciniak, J. Przybyłek (<i>Geologos</i> nr 10)
III	16–18.11.2008	Politechnika Warszawska, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa	Warszawa	M. Nawalany (<i>Biuletyn PIG</i> nr 431)
IV	15–16.11.2010	Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska	Gdańsk	R. Szymkiewicz (<i>Biuletyn PIG</i> nr 442, seria Hydrogeologia z. XI)
V	14–16.11.2012	Uniwersytet Śląski, Katedra Hydrogeologii, Sosnowiec	Ustroń	A. Witkowski, A. Sadurski (<i>Biuletyn PIG</i> nr 451, seria Hydrogeologia z. XIII)
VI	16–18.11.2014	Uniwersytet M. Kopernika w Toruniu, Wydział Nauk o Ziemi	Ciechocinek	A. Krawiec, I. Jamorska (<i>Modele matematyczne w hydrogeologii.</i> Wydaw. Nauk. UMK)
VII	9–12.10.2016	AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków	Zakopane	S. Witczak, A. Żurek (<i>Praktyczne metody modelowania przepływu wód podziemnych.</i> Wydaw. AGH)

Obecnie dla lepszego rozpoznania struktur wodonośnych stosuje się oprogramowanie do interpolacji i wizualizacji przestrzennej budowy systemu wodonośnego. Podczas tworzenia modeli konceptualnych i schematyzacji warunków hydrogeologicznych wykorzystuje się narzędzia wspomagające, jak np.: GIS, HydroGeoBuilder (Czekaj, Witkowski, 2012), GDM (Grodzka, Pazio-Urbanowicz, 2012) czy HydroGeoAnalyst (Sitek, Orzechowski, 2016). Na uwagę zasługują coraz częstsze oznaczenia wieku wód podziemnych (średniego czasu przebywania) i jednocześnie weryfikacja przyjętych założeń w modelu (np. Szklarczyk i in., 2004; Knez, 2006). Oznaczany wiek wody na podstawie trytu i SF₆ np. dla ujęcia Kielce w węglanowych utworach dewonu wskazuje na zakres 20–35 lat (Knez, 2006). Przy czym nasuwa się pewien dysonans poznawczy na podstawie zestawienia wyników oznaczenia tzw. wieku wód czy inaczej średniego czasu przebywania w systemie wodonośnym a wartością współczynnika filtracji. Tak np. na wyspie Wolin czas przepływu wód podziemnych w osadach piaszczystych o miąższości 10–70 m wynosi 70–100 lat, a tempo przepływu 30–50 m/rok (Gurwin, Krawiec, 2012). Podobne wyniki tzw. wieku pozornego rzędu 17–68 lat dla węglanowych serii podają Jakóbczyk-Karpierz i Kowalczyk (2012). Uwzględniając odległości od obszarów zasilania i podane wyżej wyniki, sugeruje to wartości współczynnika filtracji 10⁻⁵ m/s, podczas gdy na modelach mamy wartości o rząd lub dwa wyższe. Wyniki badań Zalewu Kamieńskiego (Pomorze Zachodnie) z kolei wskazały w systemie lokalnego przepływu na 725 lat, a w regionalnych przepływach – 9–28 tys. lat (Krawiec i in., 2012). Czy fakty te znajdują odzwier-

iedlenie w kilkuletnich prognozach? Z drugiej strony eksperymenty lizymetryczne i modelowanie wykazały średnie czasy przepływu do głębokości 1,0–1,5 m rzędu 131–201 dni (Żurek, Czop, 2010), co oznacza $k = 1,32 \times 10^{-7}$ m/s. Fakty te wymagają szerszej dyskusji i wyjaśnienia, wykraczając poza zakres tego artykułu.

Ograniczenia programu MODFLOW, głównie wynikające ze skokowych wartości rozkładu parametrów wodonośności, redukuje program FEFLOW. Tak np. Sitek (2017) wykazał,

Tabela 2

Zagadnienia podejmowane w publikacjach podczas konferencji MPWP

Problems under consideration published during conferences MPWP

Problem	Wrocław 2004	Poznań 2006	Warszawa 2008	Gdańsk 2010	Sosnowiec 2012	Toruń 2014	Zakopane 2016	Razem
Zasoby	11	10	6	10	8	9	6	60
Geochemia	1	5	7	5	6	6	4	34
Górnictwo	2	1	3	3	2	2	0	13
Metodyka	6	7	11	5	8	7	11	55
Procesy	2	1	8	2	5	4	6	28
Razem	22	24	35	25	29	28	27	190

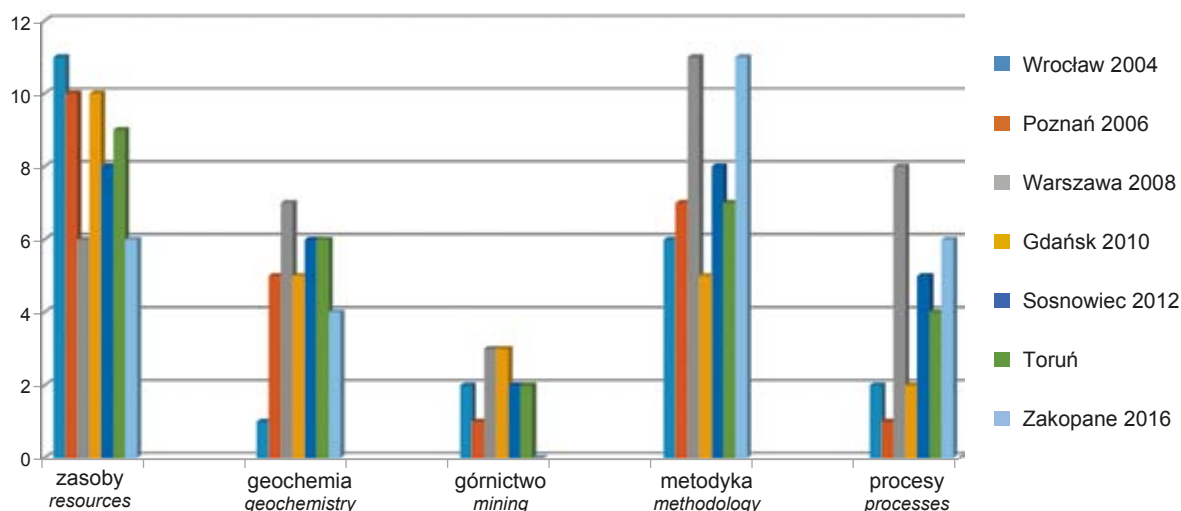


Fig. 1. Kategorie zagadnień podejmowane w publikacjach podczas konferencji MPWP

Categories of problems under consideration published during conferences MPWP

że w ośrodkach o podwójnej lub potrójnej porowatości – krasowo-szczelinowo-porowej – wyznaczenie stref uprzywilejowanych za pomocą REV (*representative elementary volume*) może być jednak bardzo kłopotliwe lub wręcz niemożliwe. Wówczas przydatnym rozwiązaniem do wyznaczenia uprzywilejowanych dróg przepływu może być użycie oferowanej przez FEFLOW funkcji elementów dyskretnych (*discrete feature*). Autor ten jednocześnie wskazuje na przydatne dodatkowe oprogramowanie (wtyczka IfmMIKE11), za pomocą którego istnieje możliwość symulacji przepływu w ciekach powierzchniowych, w powiązaniu z programami MIKE 11 i MIKE HYDRO River. Program FEFLOW jest coraz częściej stosowany np. do określania drenażu subglacialnego (Piechota i in., 2012).

Wyniki modelowania znajdują szerokie zastosowanie praktyczne np. w określaniu zasięgu stref ochronnych ujęć zwykłych wód podziemnych, co opisują m.in. dla regionu krakowskiego Duda i in. (2013). W publikacjach znajduje się również wiele przykładów z odwodnienia kopalń i złóż, np.: Zdechlik i in. (2008), Szczepiński (2012), Staško i in. (2012). W tej ostatniej autorzy przyjęli, że należy dążyć do jak najprostszyc konstrukcji (np. Voss, 2011a). Niemniej jednak, żeby oddać skomplikowane warunki hydrogeologiczne i określić wpływ głębokiego odwodnienia kopalń na najpłytsze wody, zdecydowali się wydzielić aż 11 warstw wodonośnych. Oczywiście jest, że im więcej szacowania rozkładu parametrów, tym bardziej zawodny może być taki model. Autorzy modelu obszarów KGHM (Staško i in., 2012) zgadzają się z sugestiami Vossa (2011b), żeby dążyć do maksymalnej czytelności. Z punktu widzenia stosowanych wyników modelowania, ważną rolę odgrywają również: obliczenia osiadania terenu w sąsiedztwie dużych ujęć i na terenach drenaży górniczych, modelowanie podczas odwadniania wykopów stacji metra, wykopów budowlanych czy wpływu składowisk odpadów na jakość wód podziemnych. Publikowane są też wyniki badań nad systemami meliora-

cyjnymi i wpływu zbiorników retencyjnych na wody podziemne.

Podczas analizy wyników modelowania numerycznego należy wspomnieć o przeglądzie słów kluczowych w publikacjach z tego zakresu. Z zestawienia 221 słów kluczowych z *Biuletynów PIG* z lat 2008, 2010 i 2012 wynika, że najczęściej modelujemy „wody podziemne” (9 słów kluczowych) i stosujemy „modelowanie przepływu i transportu” (8) przez „modelowanie numeryczne” (7) i synonimiczne „matematyczne” (5) z wykorzystaniem „GIS” (4) głównie w „GZWP” (4) za pomocą „metody różnic skończonych” (4) i realizujemy „modelowanie hydrogeologiczne” (4) i „modele przepływu wód podziemnych” (4) oraz „numeryczne modele filtracji” (4). Trzykrotnie są używane takie słowa kluczowe jak: badania modelowe, chemizm wód, MODFLOW, FEFLOW, ingresja wód, model koncepcyjny, model matematyczny, niejednorodność, odwodnienie, współczynnik filtracji, przepływ wód podziemnych, systemy krążenia wód podziemnych, ujęcia infiltracyjne i warunki hydrogeologiczne. Cieszy fakt, że w modelowaniu przywiązuje się coraz większą uwagę do wiarygodności wyników, identyfikacji parametrów, migracji zanieczyszczeń, koncepcji systemów, odnawialności wód podziemnych czy oddziaływania kopalń. Martwi natomiast to, że liczba cytowań tych prac nie jest wysoka, podobnie jak liczba odsłon na stronach internetowych i pobrań artykułów.

MODELOWANIE TRANSPORTU MAS

Coraz liczniej metoda modelowania matematycznego znajduje zastosowanie w badaniach procesów geochemicznych. Przegląd stanu badań z wykorzystaniem modelowania geochemicznego na rok 2006 znajdziemy m.in. w pracy Dobrzyńskiego (2006). Autor podaje jeden z przykładów relacji pomiędzy współczesnymi słodkimi wodami a starszymi

wodami mineralnymi o wysokiej zawartości siarczanów. Wyniki modelowania wykazały dopływ wód starszych rzędu 65% w studniach zaopatrzenia Unisławia Śląskiego.

Szersze zastosowanie modelowania geochemicznego i jego ograniczenia prezentuje Nawalany (2008), który stwierdza, że modelowanie multiskalowe pociąga za sobą problem skali rozpatrywanych zjawisk, a więc w konsekwencji parametrów ośrodka. Jednocześnie przenosząc to zagadnienie na płaszczyznę procesów geochemicznych autor dochodzi do wniosku, że dla pewnych zespołów parametrów charakteryzujących reakcje chemiczne rozwiązania „układów nieliniowych i sprzężonych równań mogą być niejednoznaczne lub nawet nie istnieć”.

W analizowanym okresie wiele uwagi modelowaniu migracji związków poświęca np. Żurek (2008) czy Zabłocki (2014). Jednocześnie publikowano wyniki dotyczące procesów hydrogeochemicznych i formowania się składu chemicznego wód podziemnych czy stężenia glinu, żelaza i siarczanów w wodach podziemnych oraz chlorków jako jonu wskaźnikowego (Kania i in., 2012). Zagadnienia formowania się składu chemicznego wód podziemnych w szerszej skali regionalnej podejmowali m.in. dla Karpat Czop i in. (2014), a dla aglomeracji łódzkiej – Wiktorowicz (2014).

PROCESY HYDROGEOLOGICZNE

Jednym z głównych problemów podczas symulacji modelowych jest wielkość zasilania, wyrażonego jako suma rocznych opadów, i trudna do określenia odpowiadająca mu ewapotranspiracja lub zasilanie efektywne. Zagadnienie to było szeroko komentowane w trakcie spotkań MPWP, szczególnie podczas konferencji w Zakopanem, gdzie padło m.in. stwierdzenie, że „strefa aeracji to kosmos”. Autorzy w publikacjach podkreślali wyższą jakość i dokładność wyników wielkości zasilania otrzymanych metodą modelowania w relacji do metody wskaźnika infiltracji. Ciekawe wyniki infiltracji efektywnej z wykorzystaniem metody przekształcenia stałoobjętościowego dla wschodniej części Pojezierza Pomorskiego podaje Śmietański (2012). Rozważania na podstawie zlewni wybranych rzek zachodniej Polski opisują m.in. Marszałek i Wąsik (2004), niewątpliwie słuszne, o ile pojemność i parametry warstw wodonośnych są dobrze rozpoznane. Krótki przegląd wybranych wyników znajdzie czytelnik m.in. w pracy Staśko (2017). Osobnym problemem jest zasilanie w dolinach rzecznych o drenującym charakterze. Jeżeli głębokość do zwierciadła w strefach drenażu jest niska, rzędu 1–2 m, i wektor strumienia przepływu jest skierowany ku górze, a parowanie wysokie (np. Gruszczyński, Małecki, 2010), trudno uzasadnić wielkości wskaźnika infiltracji rzędu 30–40% (np. Macioszczyk i in., 1994 *vide* Krogulec, 2004). Problem zmiennego zasilania na ujęciu Zduny poruszają m.in. Dąbrowski i in. (2006), wyjaśniając zwiększone zasilanie „poprzez magazynowanie się wód w obrębie leja w wyniku dopływu dynamicznego przekraczającego pobór wody na ujęciu”. Zaznaczyć należy, że programy obliczeniowe, w tym MODFLOW,

liczą zasoby dynamiczne, a więc rozważania o zasobach statycznych/zmagazynowanych w warstwie to całkiem inny problem. Do szczegółowej analizy i obliczeń zasilania z infiltracji można zastosować m.in. programy WetSpa (np. Kajewski, 2004), SWAT lub HYPE (np. Bar-Michalczyk i in., 2016). Wymagają one jednak znacznej ilości danych o ukształtowaniu terenu, mapy pokrycia terenu, map glebowych i parametrów gleb oraz wielu danych meteorologicznych.

UWAGI KOŃCOWE I SUGESTIE

Zagadnieniami wymagającymi większej uwagi, jak zauważyli to wcześniej Sadurski i Krawiec (2014), są m.in. modele głębokich struktur i systemów wód o wolnej wymianie (quasi-stagnujących) czy współdziałania wód zwykłych i leczniczych.

Pojawiają się pierwsze jaskółki dotyczące problemów modeli symulacyjnych zachowania się płynów i ośrodka skalnego w trakcie procesu szczelinowania oraz eksploatacji gazu łupkowego i ropy naftowej. Te ostatnie, podobnie jak zagadnienia hydrogeologii górniczej, prezentowane są szerzej w ramach konferencji „Hydrogeologia w praktyce – praktyka w hydrogeologii”.

Jednym z pomijanych i niedocenianych zagadnień w modelowaniu jest strumień cieplny. Ciepło przenoszone wraz z ruchem wód podziemnych może być znacznikiem przepływu wód podziemnych, w tym jego prędkości. Badania temperatury wód podziemnych są łatwe do wykonania i relatywnie tanie, a ponieważ właściwości termiczne skał, takie jak przewodnictwo cieplne i ciepło właściwe, zmieniają się znacznie wolniej niż właściwości hydrauliczne warstw, pomiary temperatur mogą pozwolić na lepsze zrozumienie systemu przepływu wód podziemnych. W światowej literaturze mechanizmy i procesy zmian temperatur opisali m.in. Domenico i Palciauskas (1973), Anderson (2005), Saar (2011), An i in. (2015). Rozkłady temperatur w zbiorniku są wykorzystywane do oceny przepuszczalności i ich zmian. W krajowej literaturze problem był podejmowany głównie podczas badania zmienności pola temperatur wód podziemnych ujęć infiltracyjnych (np. Pleczyński, 1985; Młyńczak, Malina, 1988; Malina, Szczepański, 1993; Przybyłek, Kasztelan, 2017). Istnieje pilna potrzeba szczegółowego poznania rozkładu temperatur wód podziemnych w systemach wodonośnych i ich zastosowania do weryfikacji i uszczegółowienia modeli przepływu wód podziemnych.

Czy wyniki modelowania są publikowane tylko w materiałach MPWP? Oczywiście, że nie, znajdziemy je również w *Przeglądzie Geologicznym* i w materiałach ze spotkań w ramach „Współczesnych problemów hydrogeologii” oraz wielu innych. Trzeba zaznaczyć, że wyniki hydrogeologicznych badań modelowania z naszego kraju coraz częściej pojawiają się w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym, np. w *Hydrogeology Journal*. W ostatnich latach z zakresu modelowania należy odnotować trzy prace zespołów autorskich, gdzie dominują krajowi specjaliści. Zinte-

growany model wzajemnych relacji wód powierzchniowych i podziemnych w warunkach nieustalonych z wykorzystaniem szerokiej gamy oprogramowań, w tym MODFLOW NWT i pakietów SFR7, UZF1 i LAK7, prezentują El-Zehairy i in. (2018). Obiektem rozważań jest sztuczny zbiornik Turawa i jego otoczenie, a kalibrację przepływu i zmian zasięgu wpływu opracowano dla okresu 5 lat, uwzględniając zmienne dzienne stany wód w zbiorniku i rozkład ciśnień. Przy czym sztuczne zbiorniki reagują odmiennie od warstw wodonośnych na opad, zasilanie i ewapotranspirację. Z kolei Jaworska-Szulc (2009) zaprezentowała w ciekawym artykule obliczenia zasobowe wód podziemnych w skali regionalnej wykonane za pomocą modelownia dla złożonego systemu wodonośnego Gdańska o powierzchni 2800 km². Konstrukcja modelu wykorzystuje wyniki 1700 wierceń w formacjach plejstocenu, paleogenu i neogenu oraz kredy. Krogulec i Zabłocki (2015) opisali wyniki ilościowe i jakościowe analizy relacji pomiędzy wodami podziemnymi i środowiskowe charakteryzujące obszary ekosystemów w Kampinowskim Parku Narodowym. Analiza statystyczna do oceny długoterminowych i sezonowych zmian warunków wodnych i gruntowych z zastosowaniem GIS wykazała istotne relacje statystyczne w różnego rodzaju siedliskach roślinnych w okresie 1999–2013 z uwzględnieniem sekwencji mokrych i suchych lat.

Niewątpliwie modelowanie numeryczne jest najlepszym narzędziem do opisu procesów hydrogeologicznych, obliczeń zasobowych i prognoz. Niemniej jednak, jak donosi wielu badaczy, niektóre modele są „chore” – Voss (2011a), lub „nie są tak dobre, jak je malują” – np. Dąbrowski, Przybyłek (2012); Przybyłek, Hermanowski (2016). Jak wynika z przeglądu, po 30 latach eksploatacji ok. 35% modeli ujęć wód podziemnych wykazało słabą lub złą ocenę prognoz zasobowych. W przypadku ocen jakościowych wady wykazało aż 45%. Przyczyny są wielorakie i złożone. W pełni należy zgodzić się z takimi jak:

- wadliwa lub niepełna schematyzacja;
- uproszczone wyznaczenie granic warstw i ich parametrów, a szczególnie warstwy pierwszej wód gruntowych (tzw. *input*);
- określenie warunków brzegowych i początkowych i ich zróżnicowania w modelach wielowarstwowych (nadużywanie warunku brzegowego III rodzaju);
- niewyraźne określenie związków wód powierzchniowych i podziemnych i ich zmienności (cieki drenujące i infiltrujące);
- nieodpowiednia do problemu liczba danych z monitoringu i pomiarów terenowych;
- brak określenia/pomijanie roli poziomów podścielających (warstw podłoża);
- brak szczegółowego bilansu wodnego dla źródeł i ubytków;
- brak wizualizacji wyników map na podkładzie szczegółowej mapy topograficznej i in. (Przybyłek, Hermanowski, 2016).

Model numeryczny ze względu na szeroki zakres prac i wymóg wiarygodności wymaga czasu, szerokiego zakresu

danych, prób i błędów, stąd musi mieć swoją wartość, czyli musi odpowiadać kosztom tworzenia, a niekoniecznie oczekiwaniom zleceniodawcy. Cieszy fakt, że w modelowaniu numerycznym coraz większą uwagę przywiązuje się do krytycznej oceny i wiarygodności modelu. Cytując Malinowskiego (1987) w modelowaniu, jak również w badaniach, należy stosować „pewną liczbę prawideł zdrowego rozsądku i dobrze znanych zasad naukowych”.

Podziękowania. Autor wyraża gorące podziękowania Recenzentom w osobach profesorów J. Przybyłka i M. Marciniaka za cenne sugestie i uwagi, które pozwoliły na udoskonalenie końcowej wersji artykułu.

Praca powstała w ramach programu badań statutowych 1017/S/ING/2018 Uniwersytetu Wrocławskiego.

LITERATURA

- AN R., JIANG X.-W., WANG J.-Z., WAN L., WANG X.-S., LI H., 2015 – A theoretical analysis of basin-scale groundwater temperature distribution. *Hydrogeol. J.*, **23**: 397–404.
- ANDERSON M.P., 2005 – Heat as a groundwater tracer. *Ground Water*, **43**, 6: 951–968.
- BAR-MICHALCZYK D., MICHALCZYK T., ŻUREK A., WITCZAK S., 2016 – Możliwości wykorzystania modelu HYPE do oceny wielkości zasilania wód podziemnych w obszarach bilansowych opartych o zlewnie rzek. *W: Praktyczne metody modelownia przepływu wód podziemnych* (red. S. Witczak, A. Żurek): 213–223. Wydaw. AGH, Kraków.
- BIENIEWSKI J., 1968 – Opracowanie prognoz hydrogeologicznych procesów poboru wód podziemnych za pomocą analogów elektrycznych. *Węgiel Brunatny*, **4**.
- CZEKAJ J., WITKOWSKI A.J., 2012 – Model budowy czwartorzędowego piętra wodonośnego w rejonie zbiornika Goczałkowice. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **451**: 27–34.
- CZOP M., DEMBSKA P., RAJCHEL L., 2014 – Modelowanie warunków formowania się składu chemicznego wód podziemnych w obrębie Karpat i brzeżnej części zapadliska przedkarpackiego. *W: Modele matematyczne w hydrogeologii* (red. A. Krawiec, I. Jamorska): 161–169. Wydaw. Nauk. UMK, Toruń.
- DĄBROWSKI S., PRZYBYŁEK J., 2012 – Ocena prognoz zasobów eksploatacyjnych poprzez porównanie szacunków zasobowych z wynikami długotrwałej eksploatacji ujęć wód podziemnych (studium metodyczne). Bogucki Wydaw. Nauk., Poznań.
- DĄBROWSKI S., RYNARZEWSKI W., PAWLAK A., HERCZKA A., JANISZEWSKA B., 2006 – Identyfikacja modelowa zmienności zasilania ujęcia wody podziemnej Zduny dla miasta Krotoszyna w czasie jego 50-letniej eksploatacji. *Geologos*, **10**: 19–33.
- DĄBROWSKI S., KAPUŚCIŃSKI J., NOWICKI K., PRZYBYŁEK J., SZCZEPAŃSKI A. (red.), 2011 – *Metodyka modelowania matematycznego w badaniach i obliczeniach hydrogeologicznych*. Poradnik metodyczny. Bogucki Wydaw. Nauk., Poznań.
- DOBRYŃSKI D., 2006 – Modelowanie geochemiczne narzędziem poznania geochemii systemów wód podziemnych. Przykłady zastosowań, aktualny stan w Polsce. *Prz. Geol.*, **54**, 11: 976–981.

- DOMENICO P.A., PALCIAUSKAS V.V., 1973 – Theoretical analysis of forced convective heat transfer in regional groundwater flow. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **84**: 3803–3814.
- DUDA R., WINID B., ZDECHLIK R., STĘPIEŃ M., 2013 – Metodyka wyboru optymalnej metody wyznaczania zasięgu stref ochronnych ujęć zwykłych wód podziemnych z uwzględnieniem warunków hydrogeologicznych obszaru RZGW w Krakowie. AGH, Kraków.
- EL-ZEHAIRY A.A., LUBCZYŃSKI M.W., GURWIN J., 2018 – Interactions of artificial lakes with groundwater applying an integrated MODFLOW solution. *Hydrogeol. J.*, **26**: 109–132.
- FELKEL B., KASZTELAN D., 2006 – Przegląd wykorzystania metod modelowania numerycznego do badań hydrogeologicznych w Polsce. *Geologos*, **10**: 57–63.
- FLISOWSKI J., WIECZYSTY A., 1979 – Analogowe dyskretne modelowanie ujęć wody podziemnej. Wydaw. Geol., Warszawa.
- GRODZKA M., PAZIO-URBANOWICZ K., 2012 – Oprogramowanie do interpolacji i wizualizacji przestrzennej budowy systemu wodonośnego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **451**: 35–44.
- GRUSZCZYSKI T., MAŁECKI J., 2006 – Numeryczny model filtracji nieustalanej dla fragmentu doliny Wisły w rejonie ujścia rzeki Świder. *Geologos*, **10**: 65–73.
- GRUSZCZYŃSKI T., MAŁECKI J., 2010 – Identyfikacja systemu krążenia wód w artezyjskim poziomie wodonośnym na obszarze zlewni Krynki (Wysoczyzna Białostocka) na podstawie regionalnego modelu pola filtracji. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **442**: 49–61.
- GURWIN J., KRAWIEC A., 2012 – Identyfikacja systemu krążenia wód podziemnych na wyspie Wolin. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **451**: 53–61.
- JAKÓBCZYK-KARPIERZ S., KOWALCZYK A., 2012 – Możliwości i ograniczenia zastosowania SF₆ do oceny czasu przebywania wód w ośrodkach węglanowych na przykładzie GZWP Gliwice. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **451**: 91–99.
- JAWORSKA-SZULC B., 2009 – Groundwater flow modelling of multi-aquifer systems for regional resources evaluation: the Gdansk hydrogeological system, Poland. *Hydrogeol. J.*, **17**: 1521–1542.
- KAJEWSKI I., 2004 – Ocena elementów bilansu wodnego zlewni przy zastosowaniu modelu WetSpass. *Acta Univ. Wratisl.*, **2729**: 69–80.
- KANIA J., HAŁADUS A., SZCZEPAŃSKI A., ZDECHLIK R., WOJTAL G., 2012 – Model migracji jonu wskaźnikowego w poziomie wodonośnym czwartorzędu w widłach Dunajca i Białej. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **451**: 137–144.
- KNEZ J., 2006 – Weryfikacja i walidacja modelu na podstawie znaczników środowiskowych sześćiofluorku siarki SF₆ i trytu. *Geologos*, **10**: 141–152.
- KRAWIEC A., SADURSKI A., BURZYŃSKI K., 2012 – Systemy krążenia wód podziemnych w rejonie Zalewu Kamieńskiego, Pomorze Zachodnie. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **451**: 153–160.
- KROGULEC E., 2004 – Zasilanie wód podziemnych w dolinie rzecznej – wyniki badań modelowych. *Acta Univ. Wratisl.*, **2729**, *Hydrogeol.*: 121–128.
- KROGULEC E., ZABŁOCKI S., 2015 – Relationship between the environmental and hydrogeological elements characterizing groundwater-dependent ecosystems in central Poland. *Hydrogeol. J.*, **23**: 1587–1602.
- MALINA G., SZCZEPAŃSKI A., 1993 – Badania zmienności pola temperatur w ocenie krążenia wód podziemnych w warunkach naturalnych i zmienionych eksploatacją. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*: 387–397. Oficyna Wydaw. Sudety, Wrocław.
- MALINOWSKI B., 1987 – Argonauci zachodniego Pacyfiku. Wydaw. Nauk. PWN.
- MARSZAŁEK H., WĄSIK M., 2004 – Ocena zasilania wód podziemnych w wybranych zlewniach rzek Polski Zachodniej. *Acta Univ. Wratisl.*, **2729**, *Hydrogeol.*: 175–184.
- MATUSIAK M., PRZYBYŁEK J., 2017 – Wykorzystanie niestacjonarnego modelu przepływu do oceny rzeczywistej wielkości eksploatacji wód podziemnych z piętra jurajsko-kredowego na obszarze intensywnych nawodnień rolniczych w rejonie Kalisza. *Prz. Geol.*, **65**, 11/2: 1218–1224.
- MŁYŃCZAK A., MALINA G., 1988 – Rozkład temperatur wód gruntowych pierwszego poziomu wodonośnego o swobodnym zwierciadle wody na przykładzie ujęcia infiltracyjnego Reda III. *Tech. Poszuk. Geol., Geosynoptyka i Geotermia*, **5/6**: 53–59.
- NAWALANY M., 2008 – Modelowanie transportu substancji podlegających procesom fizykochemicznym i reakcji chemicznych w strumieniu wód podziemnych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **431**: 169–179.
- OLICHWER T., WCISŁO M., 2014 – Kształtowanie się zasobów wód podziemnych w odmiennych ośrodkach hydrogeologicznych Sudetów na podstawie badań modelowych. *W: Modele matematyczne w hydrogeologii* (red. A. Krawiec, I. Jamorska): 97–105. Wydaw. Nauk. UMK, Toruń.
- PIECHOTA A.M., SITEK S., IGNATIUK D., PIOTROWSKI J.A., 2012 – Rekonstrukcja drenażu subglacjalnego lodowca Wernskiolda (SW Spitsbergen) na podstawie modelowania numerycznego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **451**: 191–202.
- POLAŃSKA K., PIEKAREK-JANKOWSKA H., 2006 – Analiza kontaktu wód podziemnych i powierzchniowych w modelu obiegu wód w strefie brzegowej Zatoki Gdańskiej. *Geologos*, **10**: 205–214.
- PRZYBYŁEK J., HERMANOWSKI P., 2016 – Metodyczne i interpretacyjne wady modeli numerycznych – czyli nie taki model dobry, jak go malują. *W: Praktyczne metody modelowania przepływu wód podziemnych* (red. S. Witczak, A. Żurek): 263–270. Wydaw. AGH, Kraków.
- PRZYBYŁEK J., KASZTELAN D., 2017 – Badania zmienności i zależności temperatury wód podziemnych od wód rzecznych na ujęciach infiltracyjnych. *Prz. Geol.*, **65**, 11/2: 1356–1362.
- PLECZYŃSKI J., 1985 – Temperatura jako wskaźnik badania związków wód powierzchniowych i podziemnych. *W: Aktualne problemy hydrogeologii*: 513–520. Wydaw. AGH, Kraków.
- SAAR M.O., 2011 – Geothermal heat as a tracer of large-scale groundwater flow and as a means to determine permeability fields. *Hydrogeol. J.*, **19**: 31–52.
- SADURSKI A., KRAWIEC A., 2014 – Wprowadzenie. Modele matematyczne w hydrogeologii: 9–10. Wydaw. Nauk. UMK, Toruń.
- SITEK S., 2017 – Modelowanie wód podziemnych na terenach górniczych z wykorzystaniem oprogramowania FEFLOW. *Prz. Geol.*, **65**, 11/3: 1451–1459.
- SITEK S., ORZECZOWSKI R., 2016 – Zastosowanie HydroGeoAnalyst w zarządzaniu danymi hydrogeologicznymi na przykładzie zbiornika GZWP nr 330 Gliwice. *W: Praktyczne metody modelowania przepływu wód podziemnych* (red. S. Witczak, A. Żurek). Wydaw. AGH, Kraków: 187–195.
- STAŚKO S., 2017 – Zasilanie wód podziemnych na obszarze Polski – przegląd metod badań i wybranych wyników. *Hydrogeol.*, **1**: 68–77.
- STAŚKO S., GURWIN J., WCISŁO M., MODELSKA M., KRYZA H., KRYZA J., OLICHWER T., BUCZYŃSKI S., TARKA R., WĄSIK M., BECKER R., 2012 – Model koncepcyjny

- systemu hydrogeologicznego obszaru oddziaływania Lubiąsko Głogowskiego Obszaru Miedzionośnego (LGOM). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **451**: 203–211.
- SZKLARCZYK T., WITCZAK S., NAŁĘCKI P., 2004 – Model hydrogeologiczny subniecki kędzierzyńsko-głubczyckiej (GZWP 332) jako przykład odwzorowania złożonego systemu krążenia wód podziemnych. *Acta Univ. Wratisl.*, **2729**: 253–269.
- SZYMANKO J., 1980 – Koncepcje systemu wodonośnego i metod jego modelowania. Wydaw. Geol., Warszawa.
- SZYMANKO J., KREZMAR A., POLISZOT W., NOWICKI K., DĄBROWSKI S., PRZYBYŁEK J., 1980 – Budowa modeli matematycznych w hydrogeologii na przykładzie biblioteki systemowej HYDRYLIB. Matematyczne modelowanie ujęć wody podziemnej. Studia z zakresu inżynierii, 19. Warszawa–Kraków.
- SZCZEPAŃSKI A., 1974 – Prognozowanie wydajności i warunków eksploatacji wód podziemnych metodą analogii hydraulicznych. *Pr. Geol.*, **81**.
- SZCZEPIŃSKI J., 2012 – Wykorzystanie modułu strumienia w ocenie wzajemnego oddziaływania wód podziemnych i powierzchniowych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **451**: 203–210.
- ŚMIETAŃSKI L., 2012 – Zastosowanie przekształcenia stałoobjętościowego do oceny odnawialności zasobów wód podziemnych wschodniej części Pojezierza Pomorskiego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **451**: 227–234.
- WIKTOROWICZ B., 2014 – Formowanie się składu chemicznego wód termalnych niecki łódzkiej w świetle badań modelowani hydrogeochemicznego. *W: Modele matematyczne w hydrogeologii* (red. A. Krawiec, I. Jamorska): 169–175. Wydaw. Nauk.UMK, Toruń.
- ZABŁOCKI S., 2014 – Prognozowanie zmian zagrożenia azotanami wód podziemnych poziomów użytkowych na obszarach użytkowanych rolniczo. *W: Modele matematyczne w hydrogeologii* (red. A. Krawiec, I. Jamorska): 151–161. Wydaw. Nauk. UMK, Toruń.
- ZDECHLIK R., HAŁADUS A., BUKOWSKI P., 2008 – Porównanie metod prognoz zatapiania kopalń węgla kamiennego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **431**: 287–296.
- ŻUREK A., 2008 – Możliwości wykorzystania w warunkach polskich wybranych modeli bilansowych z projektu EUROHARP do oceny poziomu wymycia azotanów. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **431**: 305–318.
- ŻUREK A., CZOP M., 2010 – Modelowanie warunków przepływu i przekształceń składu chemicznego wód opadowych w trakcie procesu infiltracji na przykładzie doświadczenia lizymetrycznego. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **442**: 181–188.
- VOSS C.I., 2011a – Editor's Message: Groundwater modeling fantasies – part 1, adrift in the details. *Hydrogeol. J.*, **19**: 1281–1284.
- VOSS C.I., 2011b – Editor's Message: Groundwater modeling fantasies – part 2, down to earth. *Hydrogeol. J.*, **19**: 1455–1458.

SUMMARY

Groundwater modelling has been launched in the late years 60–70, and of the last century as a development of library programs modelling HYDRYLIB in 1974–1992 under the direction of J. Szymanko. This phase of the modelling history is described as the Poznań period preceded the next called Warsaw stage concentrated on large regional hydrogeological systems study. From the year 2004 regular domestic conferences has been started under the theme of Modelling of groundwater flow (MPWP). It has been happening with first workshops at the University of Wrocław. During the seven meetings of specialists (Tab. 1) nearly 200 articles has been published on both resources and the changes of the chemical composition

of groundwater. Described the results of the modelling issues includes five groups of topics (Tab. 2 and Fig. 1). These are the groundwater resources evaluation and water balances specially in Major Groundwater Basin (MGB), this second group study of geochemical, and third – mining hydrogeology, fourth – modelling methodology and the fifth group is a hydrogeological processes. If in the early years modelling has been focused on the groundwater resources calculation recent paper concentrates on methodology of modelling and hydrogeological processes. Published results of the groundwater modelling could be find in *Bulletin of Polish Geological Institute (Biuletyn PIG)*, *Geologos* and *Acta Universitatis Wratislaviensis*.