

Aktualny stan i kierunki badań hydrogeologicznych

Andrzej Kowalczyk¹, Aneta Drabek²

Current state and hydrogeological research directions. Prz. Geol., 63: 852–859.

Abstract. This article explores the current state of research in hydrogeology and the future challenges of fundamental and applied hydrogeology. A bibliometric analysis was conducted in the first part of the paper in order to evaluate groundwater research. It was based on papers published in *Hydrogeology Journal* and *Journal of Hydrology* in the period 2010–2014. These two journals were chosen arbitrary as most representatives for groundwater research for many reasons. The first journal published the largest number of articles and the second one has the highest percentage of publications related to groundwater research. Another reason was the field of research presented in these two journals: regional hydrogeology and methods. The bibliometric analysis summarizes output and research hot-spots in groundwater studies. A keywords analysis showed that regional hydrogeology, methods and research techniques, isotopes and tracers and hydrogeochemistry were the main research areas in the study period. Then the citation data were used from these two journals and from the period 2001–2015 to assess the main areas of research. This analysis showed that methods of studies, recharge, ground water/surfaced water interaction and hydrogeochemistry were the main research areas in the studied period.

The second part of this paper presents the main challenges for hydrogeology and it is based on many papers published in the period of last ten years. One of the greatest challenges in hydrogeology is fundamental science on regional scale. The demand is in determining universal theory on dominant processes on the regional scale, mainly with respect to groundwater recharge, groundwater/surface water interaction and transport processes. Finally the regional scale research imply interdisciplinary research.

Keywords: hydrogeologic research, fundamental hydrogeology, regional hydrogeology

Dostępna on-line wielodyscyplinowa baza publikacji naukowych Science Citation Index Expanded (SCIE) (część bazy Web of Science™ Core Collection), tworzona i wykorzystywana przez wydawnictwo Thomson Reuters, umożliwia identyfikację najczęściej cytowanych prac w danej dyscyplinie. W związku z tym jest stosowana jako narzędzie do śledzenia i rozpoznawania problemów badawczych, które skupiają największą uwagę środowiska naukowego. Szybko wzrastająca liczba publikacji naukowych i łatwy dostęp do wspomnianej bazy, a także do innych wartościowych źródeł informacji, umożliwiają i ułatwiają weryfikację istotnych obecnie problemów badawczych oraz skłaniają do zastanowienia się nad kierunkami badań w przyszłości. Obfitość publikacji i ich dostępność skłania badaczy do oceny obecnej kondycji i przyszłości nauki, także hydrogeologii i hydrologii (Schwartz & Ibaraki, 2001; Schwartz i in., 2005; Wang i in., 2009; Niu i in., 2014).

Celem niniejszej pracy jest identyfikacja najintensywniej eksplorowanych obszarów badań hydrogeologicznych oraz refleksja nad przyszłością hydrogeologii jako nauki wykorzystującej głównie badania podstawowe. Na podstawie bazy SCIE wyodrębniono aktualne i najczęściej zgłębiane obszary badań hydrogeologicznych. Mogą one wskazać kierunki rozwoju tej dziedziny, także w Polsce. Dokonano również przeglądu najważniejszych publikacji podejmujących problem przyszłości hydrogeologii, jako dyscypliny naukowej opartej na mocnych podstawach teoretycznych.

W pierwszej części pracy przedstawiono wyniki analizy prac opublikowanych w dwóch czasopismach – *Journal of Hydrology* oraz *Hydrogeology Journal*. Są to czasopisma o znaczeniu i zasięgu światowym, mające wysoką pozycję w rankingu czasopism prezentujących problematykę wód podziemnych (tab. 1). W pierwszym z nich w latach 1992–2012 opublikowano najwięcej prac (2136) dotyczących

wód podziemnych. Drugie zaś zajmuje szóste miejsce pod względem liczby artykułów (1088), jednak ich udział procentowy jest największy (88,03%) (Niu i in., 2014). W niniejszym opracowaniu przeanalizowano publikacje ze wspomnianych czasopism z lat 2010–2014, a także dokonano na ich podstawie analizy cytowań artykułów z lat 2001–2015. O wyborze tych czasopism zdecydowało to, że ukazują się w nich liczne prace prezentujące problemy hydrogeologii regionalnej w połączeniu z problemami metodycznymi. Jest to istotne, ponieważ obecnie coraz wyraźniej akcentuje się w literaturze potrzebę rozwoju badań dotyczących hydrogeologii regionalnej (Galloway, 2010; Bartel, 2014; Currel, 2014).

ANALIZA PUBLIKACJI Z JOURNAL OF HYDROLOGY I Z HYDROGEOLOGY JOURNAL

Szczegółową analizę wykonano dla artykułów z lat 2010–2014 – 513 artykułów z *Journal of Hydrology* i 631 z *Hydrogeology Journal*. Wytypowano prace, które w tytule zawierały słowa *groundwater* lub *aquifer*, a następnie na podstawie tytułów, słów kluczowych i ewentualnie abstraktów identyfikowano problemy w nich prezentowane. W tabeli 2 zestawiono 21 terminów, które określają wyodrębnione problemy badawcze. Następnie zliczono prace poświęcone tym problemom. Artykuły o charakterze jednoznacznie metodycznym, często nieodnoszące się do konkretnej jednostki hydrogeologicznej lub tylko pośrednio powiązane z hydrogeologią oraz te, których przyporządkowanie do wyróżnionych grup nie było oczywiste, przypisano do 22 grupy. Posługiwano się terminami w języku angielskim, ponieważ pochodzą one z prac opublikowanych w tym języku. Należy zaznaczyć, że przyporządkowanie publikacji do określonej kategorii było niekiedy subiektywne, szczególnie w przypadku kategorii hydrogeologia

¹ Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec; andrzej.kowalczyk@us.edu.pl.

² Biblioteka Uniwersytetu Śląskiego, Uniwersytet Śląski, ul. Bankowa 12, 40-007 Katowice; aneta.drabek@us.edu.pl.

Tab. 1. 10 najbardziej aktywnych czasopism wg liczby opublikowanych w latach 1992–2012 artykułów dotyczących wód podziemnych

Lp. No.	Tytuł czasopisma Journal	Liczba artykułów Number of articles (Niu i in., 2014)	Współczynnik wpływu Impact factor (2013)	Index Hirscha ¹ (15.02.2015)
1	Journal of Hydrology	2 136	2,693 (5)	145
2	Water Resources Research	1 868	3,709 (2)	213
3	Environmental Earth Sciences	1 766	1,572	23
4	Environmental Science & Technology	1 673	5,481 (1)	282
5	Groundwater	1 272	1,953	78
6	Hydrogeology Journal	1 088	1,712	53
7	Journal of Contaminant Hydrology	896	2,702 (3)	72
8	Hydrological Processes	893	2,696 (4)	104
9	Applied Geochemistry	825	2,021	87
10	Journal of Environmental Quality	777	2,345	139

¹ Na podstawie danych z bazy Web of Science™ Core Collection.

¹ Based on Web of Science™ Core Collection.

regionalna (*regional hydrogeology*) i innych kategorii, które obejmowały zagadnienia szczegółowe albo metodyczne, ale o skali regionalnej, jak np.: określenie zasilania wód podziemnych z wykorzystaniem znaczników środowiskowych, modelowania numerycznego i wskaźników hydrochemicznych.

Analizie poddano także liczbę cytowań prac z lat 2001–2015 opublikowanych w tych dwóch czasopismach. Zbiory wyjściowe liczyły odpowiednio 1525 prac z Hydrogeology Journal i 1237 z Journal of Hydrology. Do analizy wybrano z tych czasopism po 50 prac o największej liczbie cytowań, a następnie określano poruszaną w nich problematykę badawczą i przypisywano je do odpowiedniej kategorii (tab. 2). Przy ustalaniu liczby artykułów w poszczególnych kategoriach oraz sumarycznej liczby ich cytowań zidentyfikowano problemy badawcze, które cieszyły się największym zainteresowaniem naukowców (tab. 3).

W Hydrogeology Journal najwyższy wskaźnik cytowań wynosi 460 i maleje do 46, a w Journal of Hydrology wynosi 251 i maleje do 49. Wśród 100 prac najczęściej cytowanych z obu czasopism najliczniejszą grupę stanowią te dotyczące metod badań hydrogeologicznych (22 artykuły), a kolejne miejsca zajmują prace dotyczące hydrogeochemii (13 artykułów), relacji wód podziemnych z wodami powierzchniowymi (12 artykułów), zasilania wód podziemnych (10 artykułów), hydrogeologii regionalnej (10 artykułów), wód podziemnych na wybrzeżach morskich (9 artykułów), wpływu zmian klimatu na wody podziemne (8 prac) oraz modelowania (7 artykułów). Według sumarycznej liczby cytowań (tab. 3) listę otwierają artykuły

Tab. 2. Najczęściej używane słowa kluczowe i liczba artykułów zaliczonych do obszarów reprezentowanych przez te słowa kluczowe. Na podstawie artykułów z Hydrogeology Journal (HJ) i Journal of Hydrology (JH) z lat 2010–2014

Table 2. The most frequently used keywords for period 2010–2014 based on publications from Hydrogeology Journal (HJ) and Journal of Hydrology (JH)

Lp. No.	Słowa kluczowe Keywords	Liczba artykułów Number of publications			
		HJ	JH	HJ + JH	ranking
1	Aquifers	6	0	6	21
2	Arsenic	1	26	27	11
3	Geostatistics / stochastic methods	15	9	24	12
4	Climate change	15	7	22	13
5	GIS	10	3	13	17
6	Groundwater level fluctuation	11	5	16	15
7	Groundwater quality and contamination	20	15	35	10
8	Groundwater management	27	34	61	9
9	Groundwater/surface water interaction	22	56	78	5
10	Hydrogeochemistry	52	34	86	4
11	Isotope / stable isotopes / tracers	62	27	89	3
12	Monitoring	4	2	6	21
13	Numerical modeling	54	19	73	7
14	Recharge	45	31	76	6
15	Regional hydrogeology	135	79	214	2
16	Remote sensing	9	1	10	18
17	Sea water intrusions, coastal aquifers	39	31	70	8
18	Uncertainties	1	8	9	19
19	Urban hydrogeology	7	10	17	14
20	Vulnerability / hazards	10	5	15	16
21	Nitrates	0	7	7	20
Razem / Totality		545	409	954	
22	Inne niemieszczące się w kategoriach Other not fall within the categories	86	104	190	1
Razem / Totality		631	513	1 144	

dotyczące metod badań hydrogeologicznych (2101 cytowań), a w dalszej kolejności prace dotyczące zasilania wód podziemnych (1609 cytowań), związków wód podziemnych z wodami powierzchniowymi (1215 cytowań),

Tab. 3. Obszary badań wg listy artykułów najczęściej cytowanych z Hydrogeology Journal (50 artykułów) i Journal of Hydrology (50 artykułów) z lat 2001–2015**Table 3.** Field of research based on citations data from Hydrogeology Journal (50 articles) and Journal of Hydrology (50 articles) for 2001–2015

Lp. No.	Obszary badań Areas of research	Hydrogeology Journal	Journal of Hydrology	Suma HJ+JH	Ranking Rank
		liczba art. liczba cytowań	liczba art. liczba cytowań	suma liczby art. suma liczby cytowań	liczby art. liczby cytowań
1	metody badań	17 1 125	5 26	22 1 215	1 1
2	hydrogeologia regionalna	2 198	8 564	10 762	5 5
3	izotopy/znaczniki środowiskowe	1 51	2 110	3 161	10 10
4	hydrogeochemia	5 314	8 582	13 896	2 4
5	wody podziemne/wody powierzchniowe	3 604	9 611	12 1 215	3 3
6	zasilanie	10 1 609	0 0	10 1 609	5 2
7	modelowanie numeryczne	2 132	5 352	7 484	7 7
8	wody podz. na wybrzeżach morskich	1 46	8 680	9 726	6 6
9	zanieczyszczenia i jakość wód podziemnych	2 100	2 161	4 261	8 9
10	wpływ zmian klimatu na wody podziemne	2 108	2 177	4 285	8 8
11	arsen w wodach podziemnych	1 98	0 0	1 98	11 11

hydrogeochemii (896 cytowań) i hydrogeologii regionalnej (762 cytowania). Ranking obszarów badawczych w tabelach 2–4 nie ma znaczenia wartościującego, jest jedynie wskaźnikiem pomocniczym do wytypowania najważniejszych obszarów badawczych. Z analizy zestawień zawartych w tych tabelach wynika, że zidentyfikowane obszary badań reprezentują główne aktualne i najbardziej aktywne obszary badań hydrogeologicznych. W większości są to badania o zasięgu regionalnym. Niektóre z nich niejednokrotnie są połączone w jednej pracy, w szczególności w badaniach regionalnych, tworząc badania komplementarne. Należy podkreślić, że zidentyfikowane obszary badań odpowiadają wynikom przedstawionym w pracy Niu i in. (2014).

PRZYSZŁOŚĆ BADAŃ HYDROGEOLOGICZNYCH

Gdyby przyjąć założenie, że obecnie najintensywniej eksplorowane obszary badań hydrogeologicznych nie ulegną zmianie, to można przypuszczać, że w najbliższej przyszłości prace te będą miały przede wszystkim charakter kompleksowych badań regionalnych pod względem metodycznym. Potwierdzają to opracowania dotyczące przyszłości hydrogeologii, które wskazują nie tylko na kompleksowość badań regionalnych, ale także na ich cha-

rakter interdyscyplinarny. Prezentowane poniżej rozważania oparto na kilkunastu pracach zajmujących się stanem i przyszłością hydrogeologii (Schwartz & Ibaraki, 2001; Miller & Gray, 2002; Younger & Robins, 2002; Voss, 2005; Fryar, 2007; Tarakovsky & Winter, 2008; Musolf, 2009; Refsgaard i in., 2010; Galloway, 2010; Bobba, 2012; Langevin & Panday, 2012; Gleeson & Cardiff, 2013; Currell, 2014; Barthel, 2014). Ze względu na ramy niniejszego artykułu nie jest możliwa analiza wszystkich wymienionych prac, dlatego autorzy ograniczą się jedynie do sformułowania najważniejszych wniosków.

Schwartz i Ibaraki (2001) w publikacji pod prowokacyjnym tytułem „Hydrogeological Research: Beginning of the End or End of the Beginning?” zauważają na podstawie liczby cytowań, że wpływ opublikowanych artykułów na badania naukowe w hydrogeologii jest zaskakująco niewielki, ponieważ w większości są to prace naśladowcze lub odtwórcze. Autorzy ci twierdzą, że liczba ważnych problemów, którymi zajmuje się hydrogeologia znacznie zmniejszyła się od lat 70. ub. wieku, kiedy to hydrogeologia jako nauka przeżywała rozkwit. Obecnie prowadzi się mniej badań podstawowych, natomiast przeważają problemy niszowe, drugorzędne, często o bardzo marginalnym znaczeniu i wpływie na naukę, wzbudzające zainteresowanie nielicznych badaczy. W efekcie swoich rozważań, korzystając z modelu konceptualnego o stadiach rozwoju nauki

Tab. 4. Obszary badań hydrogeologicznych wg liczby artykułów z lat 2010–2015 (z tab. 2) oraz liczby cytowań z lat 2001–2015 (z tab. 3) w *Hydrogeology Journal* i *Journal of Hydrology***Table 4.** Areas of research based on number of articles and on citations data from *Hydrogeology Journal* (50 articles) and *Journal of Hydrology* (50 articles) for 2001–2015 (from Tab. 3)

Lp. No.	Obszary badań <i>Areas of research</i>	Miejsce w rankingu <i>Rank</i>		
		wg liczby artykułów na podstawie słów kluczowych (tab. 2)	wg sumy liczby artykułów na liście cytowań HJ+JH (tab. 3)	wg sumarycznej liczby cytowań HJ+JH (tab. 3)
1	metody badań	1	1	1
2	hydrogeologia regionalna	2	5	5
3	izotopy/ znaczniki środowiskowe	3	10	11
4	hydrogeochemia	4	2	4
5	wody podziemne/ wody powierzchniowe	5	3	3
6	zasilanie	6	5	2
7	modelowanie numeryczne	7	7	7
8	wody podz. na wybrzeżach morskich	8	6	6
9	gospodarowanie wodami podz.	9	–	–
10	zanieczyszczenia i jakość wód podz.	10	8	9
11	arsen w wodach podz.	11	11	12
12	geostatystyka/ metody stochastyczne	12	–	–
13	wpływ zmian klimatu na wody podziemne	13	8	8

(Galloway, 2010), skłaniają się do stwierdzenia, że hydrogeologia jako nauka jest w fazie dojrzałej na granicy z okresem starzenia się. Stan badań hydrogeologicznych określają jako przeciętny, mierny, nie mający istotnego znaczenia w rozumieniu badań podstawowych. Konsekwencją takiego stanu rzeczy są lub mogą być ograniczenie funduszy na finansowanie badań i przejście badaczy do innych obszarów nauki. Autorzy ci nie ogłaszają końca hydrogeologii, ale twierdzą, że konieczna będzie zmiana jej paradygmatu.

Wniosek Schwartza i Ibarakiego (2001) o schyłku hydrogeologii jako nauki spotkał się z krytyką i sprzeciwem innych autorów (Miller & Gray, 2002; Tartakovsky & Winter, 2008). Miller i Gray (2002) w pracy zatytułowanej „Hydrogeological Research: Just Getting Started” wskazują na wiele przyczyn słabości stanu badań hydrogeologicznych oraz na istotne problemy, które należy zgłębić i uznać za podstawowe problemy badawcze dla hydrogeologii. Zwracają uwagę przede wszystkim na to, że hydrogeologia opiera się na metodach empirycznych, opisowych, a nie ma oparcia w badaniach teoretycznych o charakterze podstawowym, uniwersalnym, które wymagają lepszego przygotowania teoretycznego badacza, a także większego zrozumienia i wsparcia przez dysponentów funduszy długotrwałych i kosztownych badań o tym charakterze.

W dyskusji nad przyszłością hydrogeologii istotne znaczenie miało opublikowanie 30 artykułów w specjalnym wydaniu *Journal of Hydrogeology* (Voos, 2005). Nie ma tu miejsca na ich omawianie, ale należy zwrócić uwagę na to, że wszyscy autorzy wskazują na ogromny potencjał roz-

woju hydrogeologii oraz że ich prace stały się podstawą do dyskusji o przyszłości hydrogeologii, jaka rozwinęła się w następnych latach.

Poniżej przedstawiono syntetyczne wnioski, jakie zdaniem autorów są istotne w ocenie aktualnego stanu i przyszłości hydrogeologii, w tym także hydrogeologii w Polsce.

1. Nie sposób rozważać o przyszłości hydrogeologii oddzielić od dyskusji o przyszłości hydrologii. Celowe jest zatem przypomnienie dominującego obecnie w hydrologii poglądu, przedstawionego m.in. w pracy Wagenera i in. (2010) zatytułowanej “The future of hydrology: An evolving science for a changing world”. Autorzy ci twierdzą m.in., że konieczna jest zmiana założeń hydrologii, polegająca na tym, że badania będą miały zarówno charakter syntetyczny, to znaczy, że będą obejmowały system jako całość w sposób holistyczny, a równocześnie, że będą one szczegółowe, analityczne, umożliwiające zrozumienie funkcjonowania poszczególnych komponentów systemu, a ponadto, że naczelną zasadą opisu systemu (wodonośnego) powinno być podejście zintegrowane, wielodyscyplinarne lub interdyscyplinarne. Zbliżony do tego pogląd przewija się w pracach, dotyczących przyszłości hydrogeologii, w których autorzy stwierdzają, że badania wód podziemnych wymagają podejścia bardziej całościowego w odniesieniu do obiektu badań, czyli obejmujących wszystkie komponenty środowiska, interdyscyplinarnego włączenia badań z innych obszarów nauki (Schwartz & Ibaraki, 2001; Tartakovsky & Winter, 2008; Galloway, 2010; Gleeson & Cardiff, 2013; Currell, 2014; Barthel, 2014). W rzeczy-

wistości hydrogeologia korzysta z postępu w innych dyscyplinach nauk, takich jak: biologia, chemia, fizyka, matematyka i in. Taki kompleksowy opis całych, złożonych i skomplikowanych systemów jest obecnie wielkim wyzwaniem dla nauki. Strategię, polegającą na koncentrowaniu badań na syntetycznym ujęciu całych ekosystemów, realizuje amerykańska służba geologiczna (US Geological Survey, 2007).

2. Hydrogeologia jest nauką opisową (opartą na obserwacji i doświadczeniu) i jest daleka od typowej nauki ilościowej, mimo że wykorzystuje narzędzia ilościowe (Voss, 2005; Galloway, 2010). Wyrażany jest coraz dobitniej pogląd o tym, że powinna ona bardziej stawać się dyscypliną ilościową, opartą na rozpoznaniu procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych, a także na uniwersalnym ich opisie, który rozwijałby naukowe podstawy i umacniałby hydrogeologię jako naukę w jej aspekcie podstawowym, a także aplikacyjnym. Wymaga to większego włączenia do badań hydrogeologicznych osiągnięć i narzędzi fizyki, chemii, matematyki, informatyki, statystyki i rachunku prawdopodobieństwa oraz biologii i biogeochemii i in. (Renard, 2007; Tartakovsky & Winter, 2008; Musolf, 2009; Refsgaard i in., 2010; Bobba, 2012; Gleeson & Cardiff, 2013; Barthel, 2014).

3. Większość z licznych publikacji przedstawia wyniki regionalnych badań hydrogeologicznych, w których zastosowano „standardowe” metody, nierzadko przeniesione z badań w skali lokalnej, bez stosownej oceny wiarygodności i niepewności ich wyników. Są one stosowane dla nowego obiektu badań lub w nowym kontekście problemów badawczych, ale trudno jest powiedzieć, żeby przyczyniały się do nowych teorii naukowych czy dostarczały nowych uniwersalnych rozwiązań lub nowych metod, które można zastosować w badaniach regionalnych (Barthel, 2014).

4. W ślad za postulowaną potrzebą badań interdyscyplinarnych dotyczących wód podziemnych są akcentowane potrzeby rozwoju regionalnych badań hydrogeologicznych, a niektórzy autorzy piszą wręcz o potrzebie powrotu do regionalnych badań (Gleeson & Cardiff, 2013; Barthel, 2014; Currell, 2014). Skalę regionalną przyjmuje się w zależności od lokalnych warunków geograficznych, geologiczno-strukturalnych i hydrogeologicznych. Te postulaty opierają się na licznych przesłankach, które wymieniono poniżej.

A) Badania hydrogeologiczne w skali regionalnej mają podstawowe znaczenie dla wszechstronnego gospodarowania wodami podziemnymi i powierzchniowymi, ponieważ tylko w skali regionalnej można powiązać oddalone od siebie obszary zasilania i drenażu wód, oddalone źródła zanieczyszczeń od obszarów zanieczyszczonych, a także uwzględnić czynniki ekologiczne, społeczne i ekonomiczne. Powiązanie tych elementów często wymaga objęcia badaniami obszarów wielokrotnie większych niż byłoby to konieczne do rozwiązania konkretnego, wąskiego problemu hydrogeologicznego (Refsgaard i in., 2010; Holman i in., 2012; Barthel, 2014). Z tych powodów obiektem, który jest najodpowiedniejszym do takich badań jest zlewnia rzeki, co zaleca np. Ramowa Dyrektywa Wodna z 2000 r.

B) Badania w skali regionalnej stają się coraz bardziej wykonalne, łatwiejsze do zrealizowania ze względu na dostępność nowoczesnego sprzętu informatycznego, oprogramowania i programów do modelowania oraz w wyniku prowadzonych przez dziesięciolecia badań hydrogeologicz-

nych, które dostarczyły wielu danych geologicznych, parametrów hydrogeologicznych i informacji o funkcjonowaniu systemów wodonośnych zgromadzonych w dobrze zorganizowanych bazach danych (Barthel, 2014). Dzięki temu możliwa i uzasadniona jest ponowna identyfikacja i rozpoznanie funkcjonowania systemów wodonośnych dotychczas słabo poznanych, przy uwzględnieniu ich wielkiej złożoności i skomplikowanych powiązań z otoczeniem.

C) Ważnym argumentem na rzecz badań regionalnych jest konieczność uwzględniania wpływu zmian klimatu na wody podziemne. Jest to problem globalny, obserwowany i badany na modelach w skali kontynentalnej, dlatego skala regionalna jest konieczna jako pośrednia do przeniesienia tych wpływów na problemy lokalne (Barthel, 2014), głównie w aspekcie gospodarowania środowiskiem, a w szczególności wodami.

NAJWAŻNIEJSZE PROBLEMY BADAWCZE ORAZ ZAGADNIENIA METODYCZNE HYDROGEOLOGII REGIONALNEJ

Oprócz wymienionych problemów można wyliczyć jeszcze wiele innych, które również powinny stanowić przedmiot badań hydrogeologii regionalnej. Prezentowany poniżej ich wybór opiera się na literaturze oraz na przedstawionej w niniejszej pracy własnej analizie prac opublikowanych. Nie włączono wszystkich problemów istotnych dla hydrogeologii światowej, gdyż niektóre mają zdecydowanie podrzędne znaczenie dla Polski, jak np. problem suszy, trwałego deficytu wody czy arsenu geogenicznego w wodach podziemnych. Najważniejsze problemy badawcze polskiej hydrogeologii wymieniono poniżej.

1. Związek pomiędzy ilością i jakością zasobów wód podziemnych, który wymaga badań interdyscyplinarnych, a jego poznanie ma podstawowe znaczenie dla gospodarowania wodami podziemnymi w skali regionalnej (Currell, 2014).

2. Związek wód podziemnych z wodami powierzchniowymi, w szczególności procesy fizyczne, chemiczne i biologiczne, zachodzące w strefie bezpośredniego oddziaływania tych wód (Bobba, 2012). Na ogół badania odnoszą się do fragmentów rzek, a nie do całej ich długości i wszystkich cieków w badanej zlewni.

3. Zasilanie wód podziemnych – problem znacznie lepiej poznany w skali lokalnej, często punktowo, lecz trudność pojawia się z przeniesieniem wyników na skalę regionalną (Scanlon i in., 2002; Kowalczyk & Witkowski, 2005; Barthel, 2014).

4. Wpływ urbanizacji na wody podziemne – wpływ intensywnego poboru wody i przeeksplotowania zasobów oraz zanieczyszczeń z terenów miejskich przekracza skalę lokalną, często przenosi się na duże systemy wodonośne (Kowalczyk, 2003; Currell, 2014).

5. Wpływ poszukiwania i eksploatacji niekonwencjonalnych paliw na wody podziemne – potencjalne zagrożenie wód głębokich poziomów wodonośnych oraz wód płytkich użytkowych poziomów wodonośnych; z czym wiąże się także problem ewentualnego przeeksplotowania użytkowych poziomów wodonośnych (Vidic i in., 2013; Currell, 2014).

Wśród problemów metodycznych nieodłącznie wiążących się z badaniami w skali regionalnej występują niezwykle istotne problemy metodyczne, pomijane lub roz-

wiązywane w stopniu niewystarczającym (Barthel, 2014). Pierwszym jest przeniesienie wyników badań ze skali lokalnej albo laboratoryjnej na skalę regionalną, czyli przeskalowanie (ang. *upscaling*), rozumiane jako metoda przeskalowania właściwości lub parametrów rozpoznanych dla małego obiektu, np. próbki skały lub wody, na obiekt wielokrotnie większy. Drugim jest uogólnienie wyników badań punktowych (ang. *regionalization*), np. danych z otworów przez interpolację, albo raczej przez homogenizację danych (Tartakovsky & Winter, 2008). Trzecim, może najważniejszym, zagadnieniem metodycznym o znaczeniu uniwersalnym jest ocena niepewności (ang. *uncertainty*). Ogólnie wyróżnia się dwa rodzaje niepewności – pierwszą, która odnosi się do parametrów lub właściwości i drugą – do modelu konceptualnego systemu wodonośnego (Galloway, 2010). Brakuje zarówno podstaw teoretycznych, jak i praktyki dokonywania takiej oceny. Niepewność parametryczna wynika z dwóch powodów. Pierwszym jest niepełne, punktowe rozpoznanie parametrów wodonośca, czyli brak rozpoznania w każdym jego punkcie. Ponadto nie jest możliwe poznanie większości tych parametrów bez ingerencji i zniszczenia badanego ośrodka. Drugim problemem jest niejednorodność systemu wodonośnego (ang. *heterogeneity*), która np. w wodonościach porowych jest związana z facjami i stratyfikacją osadów czy warstwowaniem. Konieczne jest zatem włączenie niejednorodności wodonośca do badań symulacyjnych procesów przepływu i transportu w każdej skali, w tym z wykorzystaniem metod geostatystycznych i fraktali (Galloway, 2010). W ukazujących się publikacjach coraz częściej zwraca się uwagę na ten problem, a także na potrzebę jego uwzględniania zarówno w badaniach podstawowych, jak i aplikacyjnych (Miller & Gray, 2002; Naetinge i in., 2005; Renard, 2007; Galloway, 2010). Na uwagę zasługuje praca wydana pod redakcją Michalaka i in. (2011), w której podejmuje się problemy metodyczne oceny niepewności w badaniach modelowych przepływu wód podziemnych i transportu zanieczyszczeń. Brak analizy niepewności, zarówno w odniesieniu do parametrów systemu, jak i modelu konceptualnego, a także nie uwzględnianie niejednorodności systemu są traktowane jako główna przyczyna małej wiarygodności prognoz hydrogeologicznych (Bredehoeft, 2005; Tartakovsky & Winter, 2008).

MODELOWANIE WÓD PODZIEMNYCH

Przyszłość badań hydrogeologicznych, w szczególności badań regionalnych, wiąże się niewątpliwie z modelowaniem wód podziemnych i z możliwościami jego pełniejszego wykorzystania. Jest ono traktowane jako jedno z głównych narzędzi wspomagających zrozumienie procesów hydrogeologicznych i gospodarowanie zasobami środowiska geologicznego (Voss, 2011b). Przyszłością będzie powiązanie modeli numerycznych, opisujących wody atmosferyczne, powierzchniowe i podziemne, w zintegrowany system modelowy, który będzie obejmował procesy w szerokim zakresie przestrzeni i czasu (Refsgaard i in., 2010; Langevin & Panday, 2012). Już obecnie obserwuje się trend integrowania modelowania, polegający na tym, że symulacje przepływu wód podziemnych są łączone z symulacjami innych komponentów cyklu hydrologicznego, np. GSFLOW (Hassa i in., 2014), z symulacjami transportu zanieczyszczeń i jakości wody (Binning & Bauer-

-Gottwien, 2007), symulacjami procesów biogeochemicznych, a także z optymalizacją gospodarowania wodami. Nieodłącznymi elementami procesu modelowania stają się także trójwymiarowe modelowanie geologiczne (3D) i wizualizacja wyników (Langevin & Panday, 2012) oraz optymalizacja gospodarowania wodami. W krajach Unii Europejskiej ten trend jest motywowany Ramową Dyrektywą Wodną Komisji Europejskiej (2000).

Bredehoeft (2005) twierdzi, że „użycie modeli (matematycznych, przyp. aut), w celu stworzenia modeli konceptualnych, jest jak najbardziej właściwe: [...]. Finalnie może to być najważniejsze wykorzystanie modeli (matematycznych, przyp. aut.), ważniejsze niż prognozy” (wykonywane na tych modelach, przyp. aut.). Ten pogląd, zawarty także w pracach innych autorów (Tartakovsky & Winter, 2008; Voss, 2011), opiera się m.in. na zastrzeżeniach wyrażonych w dużym skrócie i uproszczeniu powyżej, że w większości zrealizowanych modeli systemów wód podziemnych brakuje uwzględnienia niejednorodności wodonośca, a także rzetelnej oceny niepewności parametrycznej modelu i niepewności modelu konceptualnego. Z tych względów model nie powinien być produktem, ale narzędziem do zrozumienia systemu wodonośnego i procesów w nim zachodzących, a zatem powinien stanowić wsparcie dla doświadczonego i kompetentnego hydrogeologa w relacjach z badaczami z dyscyplin pokrewnych, także z decydentami odpowiedzialnymi za gospodarowanie zasobami wodnymi i zarządzanie środowiskiem (Voss, 2011b).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

W pracy podjęto próbę odpowiedzi na dwa pytania – jakie są aktualne najważniejsze obszary badań hydrogeologicznych i w jakim kierunku będą lub powinny zmierzać badania hydrogeologiczne, gwarantujące rozwój hydrogeologii jako dyscypliny naukowej, czyli mającej mocne oparcie w badaniach podstawowych, z dużym potencjałem aplikacyjnym. Hydrogeologia jest bowiem nauką stosowaną, ale jej pozycja, podobnie jak i innych nauk stosowanych, zależy i będzie zależeć od tego, jak mocne ma oparcie w badaniach podstawowych.

Żeby odpowiedzieć na pierwsze pytanie podjęto próbę identyfikacji najbardziej istotnych, aktualnych obszarów badań hydrogeologicznych na podstawie analizy artykułów publikowanych w dwóch czasopismach – *Hydrogeology Journal* i *Journal of Hydrology*. Ustalona listę problemów badawczych sporządzono na podstawie liczby artykułów badawczych oraz liczby cytowań artykułów na temat danej problematyki.

Zidentyfikowane w wyniku tej analizy problemy badawcze, które są najintensywniej obecnie eksplorowane, należą do następujących obszarów badawczych: metody badań hydrogeologicznych, hydrogeologia regionalna, badania znacznikowe/izotopowe, hydrogeochemia, związek wód podziemnych z wodami powierzchniowymi, zasilenie wód podziemnych, modelowanie numeryczne, wody podziemne na wybrzeżach morskich, gospodarowanie wodami podziemnymi, zanieczyszczenia wód podziemnych, arsen, geostatystyka i metody stochastyczne oraz wpływ zmian klimatu na wody podziemne.

Wykonana analiza publikacji jest opracowaniem wstępnym, ponieważ w sposób arbitralny opiera się na artykułach tylko z dwóch czasopism i ze stosunkowo krótkiego okresu.

Pogłębiona analiza wymagałaby uwzględnienia prac z większej liczby czasopism i powinna opierać się na analizie ich treści, przynajmniej prezentowanej w abstraktach i słowach kluczowych, jak również obejmować dłuższy okres. Mimo tych zastrzeżeń wyniki dokonanej analizy, reprezentowane przez zidentyfikowane obszary lub problemy badawcze, dobrze odpowiadają wynikom rozbudowanej pod względem metodycznym pracy Niu i in. (2014).

Próba odpowiedzi na drugie pytanie opiera się na analizie wiodących opublikowanych prac poświęconych przyszłości hydrogeologii jako nauki. Niniejsza praca jest zatem przeglądem reprezentowanych poglądów i argumentów, przy czym ze względu na ograniczone ramy, przegląd ten jest bardzo pobieżny i jest bardziej przewodnikiem po tych pracach niż wyczerpującą prezentacją tych poglądów.

Główne wnioski jakie wynikają z tego przeglądu prac przedstawiono poniżej.

1. Kluczem do dalszego rozwoju hydrogeologii jest zrozumienie, że powinna być nauką ilościową. Aby tak się stało, konieczne jest pełniejsze wdrażanie metod ilościowych.

2. Powszechnie w analizowanych pracach jest przekonanie, że istotnym kierunkiem rozwoju hydrogeologii jako nauki jest hydrogeologia regionalna, w której brakuje postępu w podstawach teoretycznych, na wzór takich jakie stworzyli m.in. Freeze i Witherspoon (1966), Toth (1970), Meinzer (w: Fryar, 2007) i in. (ograniczono się jedynie do niektórych badaczy z okresu po drugiej wojnie światowej).

3. Interdyscyplinarne podejście w badaniach obejmujących wszystkie komponenty cyklu hydrologicznego i procesy w nim zachodzące, w tym wody podziemne, jest możliwe przede wszystkim w skali regionalnej. Wyzwaniem pozostają przeskalowanie rozpoznania hydrogeologicznego z małej skali na system wodonośny w skali regionalnej i regionalizacja danych punktowych.

4. Regionalne badania hydrogeologiczne powinny uzyskać wyższą rangę, podobnie jak to odbywa się obecnie w hydrologii. Z prac zrelacjonowanych w niniejszym artykule wynika, że zmiana paradygmatu hydrogeologii powinna polegać na tym, że włączy się ją w szersze spektrum nauk o środowisku, jako naukę interdyscyplinarną. Dziedzina ta również wymaga wzmocnienia badań w skali regionalnej.

Są także przyczyny, które nie sprzyjają ambitnym badaniom naukowym z hydrogeologii o charakterze podstawowym w skali regionalnej. Niektóre z nich wymieniono poniżej.

A) Badania regionalne na ogół są realizowane dla zaspokojenia określonych celów polityki gospodarczej, albo wręcz wypełnienia obowiązków wynikających z dyrektywy Unii Europejskiej. Są to więc badania głównie aplikacyjne. Konieczność działań o charakterze dostosowawczym nie sprzyja realizacji badań naukowych, których celem byłoby poszukiwanie rozwiązań o charakterze uniwersalnym, ważnych dla hydrogeologii regionalnej.

B) Występuje duża presja i zapotrzebowanie na rozwiązywanie problemów lokalnych. Często są to problemy związane z zanieczyszczeniami środowiska, wymagające szybkiego rozpoznania i rozwiązania. Są atrakcyjne pod względem naukowym i często finansowym, a także umożliwiają szybkie publikowanie wyników. Inaczej jest w przypadku badań regionalnych, które wymagają podejścia interdyscyplinarnego i trwają znacznie dłużej oraz angażują

znacznie większy potencjał badawczy i finansowy, a efekt naukowy, poznawczy najczęściej nie przynosi nowej oryginalnej myśli, metody lub teorii o charakterze uniwersalnym. Często są to badania odtwórcze, naśladowcze i aplikacyjne.

C) Brak odpowiednich funduszy i niezrozumienie wśród ich dysponentów potrzeb prowadzenia i finansowania badań naukowych z zakresu hydrogeologii o podstawowym charakterze, mających na celu walory poznawcze, w skali regionalnej.

Można także przypuszczać, że w związku z powyższymi przytoczonymi argumentami samo środowisko naukowe nie jest tak bardzo zainteresowane realizacją badań naukowych w skali regionalnej.

LITERATURA

- BARTHEL R. 2014 – A call for more fundamental science in regional hydrogeology. *Hydrogeol. J.*, 22 (3): 507–510.
- BINNIG P. & BAUER GOTTFRIED P. 2007 – Groundwater modelling: A historical perspective for future developments. [W:] Proceedings from Seminar on Groundwater Modelling, ATV Komite for Groundvand, Schaffergarden, Gentofte, Denmark – http://www.atv-jord-grundvand.dk/Afholdte_moeder.
- BOBBA A. G. 2012 – Ground Water-Surface Water Interface (GWSWI) Modeling: Recent Advances and Future Challenges. *Water Resources Management*, 26 (14): 4105–4131.
- BREDEHOEFT J. 2005 – The conceptualization model problem. *Hydrogeol. J.*, 13 (1): 37–46.
- CURRELL M. 2014 – Mega-scale groundwater quality challenges and the need for an inter-disciplinary approach. *Hydrogeol. J.*, 22 (4): 745–748.
- FREEZE R. & WITHERSPOON P. 1966 – Theoretical analysis of regional ground water flow. I Analytical and numerical solutions to mathematical model. *Water Resources Research*, 2: 641–656.
- FRYAR A. 2007 – The Future of Hydrogeology, Then and Now: A Look Back at O.E. Meinzer's Perspectives, 1934 to 1947. *Ground Water*, 45 (2): 246–249.
- GALLOWAY D.L. 2010 – The complex future of hydrogeology. *Hydrogeol. J.*, 18 (4): 807–810.
- GLEESON T. & CARDIFF M. 2013 – The return of groundwater quantity: a mega-scale and interdisciplinary “future of hydrogeology”? *Hydrogeol. J.*, 21 (6): 1169–1171.
- HASSAN S.M.T., LUBCZYNSKI M.W., NISWONGER R.G. & SU Z. 2014 – Surface-groundwater interactions in hard rocks in Sardon Catchment of western Spain: An integrated modeling approach. *J. Hydrol.*, 517: 390–410.
- HOLMAN I.P., ALLEN D.M., CUTHBERT M.O. & GODERNIAUX P. 2012 – Towards best practice for assessing the impacts of climate change on groundwater. *Hydrogeol. J.*, 20 (1): 1–4.
- KOWALCZYK A. 2003 – Formowanie się zasobów wód podziemnych w utworach węglanowych triasu śląsko-krakowskiego w warunkach antropopresji. Wyd. UŚL., Katowice, s. 196.
- KOWALCZYK A. & WITKOWSKI A.J. 2008 – Groundwater recharge of carbonate aquifers of the Silesian-Cracow Triassic (Southern Poland) under human impact. *Environmental Geology*. Springer-Verlag, 55: 235–246.
- LANGVIN C.D. & PANDAY S. 2012 – Future of Groundwater Modeling. *Ground Water*, 50 (3): 334–339.
- MICHALAK J., NAWALANY M., SADURSKI A. (red.) 2011 – Schematyzacja warunków hydrogeologicznych na potrzeby numerycznego modelowania przepływu w JCWPD. Państw. Inst. Geol., Warszawa, s. 176.
- MILLER C.T., GRAY W.G. 2002 – Hydrogeological Research: Just Getting Started. *Ground Water*, 40 (3): 224–231.
- MUSOLFF A. 2009 – Micropollutants: challenges in hydrogeology. *Hydrogeol. J.*, 17 (4): 763–766.
- NIU B., LOÁICIGA H.A., WANG Z., ZHAN F.B. & HONG S. 2014 – Twenty years of global groundwater research: A Science Citation Index

- Expanded-based bibliometric survey (1993–2012). *J. Hydrol.*, 519 (27): 966–975.
- NOETINGER P., ARTUS V. & ZARGAR G. 2005 – The future of stochastic and upscaling methods in hydrogeology. *Hydrogeol. J.*, 13 (1): 184–201.
- RAMOWA Dyrektywa Wodna, Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej.
- REFSGAARD J. C., HOJBERG A. L., MOLLER I., HANSEN M. & SONDERGAARD V. 2010 – Groundwater Modeling in Integrated Water Resources Management_Vision for 2020. *Ground Water*, 48 (5): 633–648.
- RENARD PH. 2007 – Stochastic Hydrogeology: What Professionals Really Need? *Ground Water*, 45 (5): 531–541.
- SCANLON, B.R., HEALY R.W. & COOK P.G. 2002 – Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeol. J.*, 10 (1): 18–39.
- SCHWARTZ F.W., FANG Y.C. & PRTHASARATHY S. 2005 – Patterns of evolutions of research strands in the hydrologic sciences. *Hydrogeol. J.*, 13 (1): 25–36.
- SCHWARTZ F.W. & IBARAKI M. 2001 – Hydrogeological Research: Beginning of trend or End of the Beginning? *Ground Water*, 39 (4): 492–498.
- TARTAKOVSKY D.M. & WINTER C.L. 2008 – Uncertain Future of Hydrogeology. *J. Hydrol. Engineering ASCE*, 37: 37–39.
- TOTH J. 1970 – A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. *J. Hydrol.*, 10 (2): 164–176.
- US GEOLOGICAL SURVEY 2007 – Facing tomorrow's challenges: US Geological Survey science in the decade 2007–2017. *US Geol. Surv. Circ.* 1309 – <http://pubs.usgs.gov/circ/2007/1309/> (cited 1 April 2009).
- VIDIC R.D., BRANTLEY S.L., VANDENBOSCHE J.M., YOXTIMER D. & ABAD J.D. 2013 – Impact of Shale Gas Development on Regional Water Quality. *Science*, 340 (6134).
- VOSS C.I. (red.) 2005 – The Future of Hydrogeology. *Hydrogeol. J.*, 13 (1): 1–349.
- VOSS C.I. 2011a – Editor's message: Groundwater modeling fantasies, part 1, down to earth. *Hydrogeol. J.*, 19 (7): 1281–1284.
- VOSS C.I. 2011b – Editor's message: Groundwater modeling fantasies, part 2, adrift in the details. *Hydrogeol. J.*, 19 (8): 1455–1458.
- WAGENER T., SIVAPALAN M., TROCH P., MCGLYNN B.L., HARMAN C.J., GUPTA H.V., KUMAR P., RAO S.C., BASU N.B. & WILSON J. 2010 – The future of hydrology: An evolving science for a changing world. *Water Resources Research*, 46: 5.
- WANG M.H., YU T.C. & HO Y.S. 2009 – A bibliometric analysis of the performance of water research. *Scientometrics*, 84: 813–820.
- YOUNGER P.L. & ROBINS N.S. 2002 – Challenges in the characterization and prediction of the hydrogeology and geochemistry of mined ground. [W:] Younger P.L., Robins N.S. (red.), *Mine Water Hydrogeology and Geochemistry*. *Geol. Soc. London, Sp. Publ.*, 198: 1–16.