
Katedra Hydrologii i Gospodarki Wodnej, Wydział Nauk Geograficznych
Uniwersytet Łódzki, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź
e-mail: tomalski@uni.lodz.pl

PRZEMYSŁAW TOMALSKI

Sezonowa zmienność zasobów wód podziemnych o zwierciadle swobodnym w zlewni Pilicy

Seasonal variability of unconfined groundwater resources in the Pilica catchment

Słowa kluczowe: zmienność sezonowa, wody podziemne, zlewnia Pilicy
Key words: seasonal variability, groundwater, Pilica catchment

WSTĘP

W opracowaniach dotyczących środkowej Polski znaleźć można twierdzenia, że zasoby wód podziemnych w zlewni Pilicy cechują się odmiennym rytmem wahań niż w pozostałej części regionu (Jeż 1986; Tomalski 2007, 2011). Odnosi się to zarówno do zmienności krótko- jak i długookresowej. Najczęściej jako przyczynę tych różnic wskazuje się charakter zbiorników wód podziemnych, ponieważ wodonoścem, szczególnie w górnej i środkowej części zlewni, są tu głównie skały krasowiejące lub piaski czwartorzędowe pozostające w związkach hydraulicznych z wodami głębszych poziomów (Paczyński, Sadurski 2007).

Opis sezonowych wahań zwierciadła wód podziemnych w całej bądź w części zlewni Pilicy znaleźć możemy w wielu pracach regionalnych (np.: Paszczyk 1973; Jeż 1986; Tomaszewski 1990; Tomalski 2011) oraz o zasięgu krajowym (Chełmicki 1991). Cytowane powyżej prace odnoszą się do płytko położonych wód podziemnych definiowanych jako wody freatyczne płytkie (Wieczysty 1982) czy też wody gruntowe tworzące pierwszy od powierzchni względnie ciągły horyzont wodonośny (Pazdro 1983; Tomaszewski 1990; Chełmicki 1991). Stosowano w nich różne metody w celu opisanie zmienności sezonowej.

Celem pracy jest zatem zidentyfikowanie sezonowego rytmu zmian wypełnienia poziomów wodonośnych płytkich wód podziemnych o swobodnym zwier-

ciadle w zlewni Pilicy i porównanie wyników z analogicznymi charakterystykami obliczonymi dla innych poziomów wodonośnych w środkowej Polsce, używając jednolitej terminologii. Uzyskane wyniki odniesione zostaną do wcześniejszych opracowań Autora (Tomalski 2011).

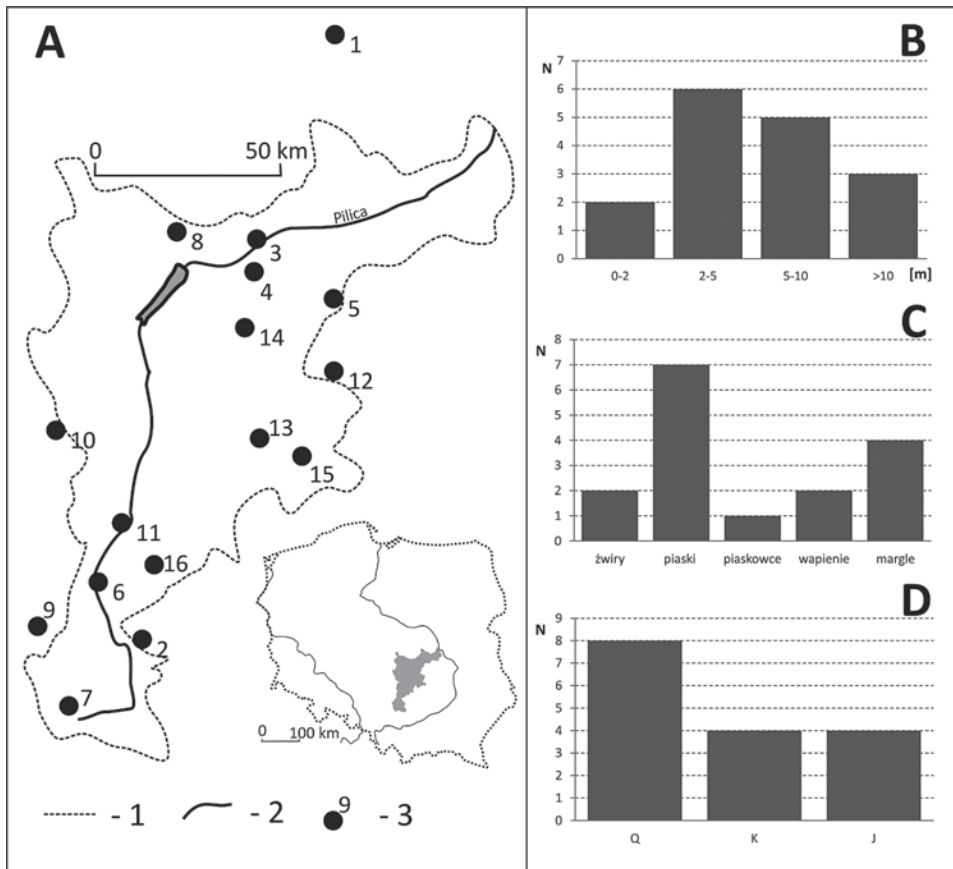
METODYKA I OBSZAR BADAŃ

Do badań wytypowano otwory badawcze zlokalizowane w zlewni Pilicy i jej bezpośrednim sąsiedztwie, pochodzące z sieci pomiarowej Państwowego Instytutu Geologicznego – PIB z wielolecia 2003–2014 („Roczniki Hydrogeologiczne Państwowej Służby Hydrologicznej 2003–2014”). Aby zapewnić porównywalność do badań wybrano tylko wody podziemne o podobnym charakterze do wcześniej analizowanych (patrz Wstęp). W „Rocznikach Hydrogeologicznych...” znajdują się dane dotyczące otworów badawczych reprezentujących wody freatyczne płytkie, są to wody o zwierciadle swobodnym. Co prawda, oprócz wód gruntowych mogą tu sporadycznie trafiać się również wody wgłębne o zwierciadle swobodnym, ale uwaga ta jest również aktualna dla zbioru poziomów wodonośnych analizowanych w przytaczanych powyżej opracowaniach (Tomalski 2011).

Ostatecznie do badań zakwalifikowano 16 otworów badawczych. Do analizowanej próby wybrane zostały wszystkie poziomy wodonośne posiadające przynajmniej 10-letnią serię nieprzerwanych pomiarów głębokości do wody (Ryc. 1A). Pełne zestawienie charakterystyk otworów pomiarowych zawiera Tab. 1. Mimo ich relatywnie małej liczby, reprezentują one wszystkie warunki występowania wód podziemnych w zlewni Pilicy. Głębokości średniego położenia zwierciadła wody podziemnej wahają się od poniżej 1 metra do ponad 20 m (Ryc. 1B). Warstwy wodonośne stanowią zarówno czwartorzędowe piaski i żwiry, jak i starsze skały wieku jurajskiego i kredowego (wapienie, margle, piaski i piaskowce; Ryc. 1 C i D).

Przed przystąpieniem do dalszych analiz sprawdzono jednorodność wszystkich szeregów czasowych dwoma testami statystycznymi. Z grupy testów parametrycznych wykorzystano test F-Snedecora służący do weryfikacji hipotezy zerowej H_0 o równości wariancji w dwóch próbach niezależnych, pochodzących z populacji o liczebnościach N i M . Hipoteza alternatywna H_1 zakłada brak takiej równości (szereg jest wówczas niejednorodny). Statystyka testowa F-Snedecora dana jest wzorem:

$$T_{\text{FSw}} = \frac{O_s N^2}{O_s M^2} \quad (1)$$



Rys. 1. Badane poziomy wodonośne w zlewni Pilicy

A – lokalizacja otworów pomiarowych: 1 – dział wodny zlewni Pilicy; 2 – rzeki; 3 – posterunki pomiarowe (numeracja zgodna z Tab. 1); B – struktura poziomów wodonośnych w świetle głębokości średniej do zwierciadła wody podziemnej; C – struktura poziomów wodonośnych w świetle rodzaju skał wodonośnych; D – struktura poziomów wodonośnych w świetle wieku skał wodonośnych, Q – czwartorzęd, K – kreda, J – jura; N – liczebność poziomów wodonośnych – otworów badawczych; Źródło: opracowanie własne na podstawie MPHP50 i „Rocznika Hydrogeologicznego...”

Fig. 1. Analyzed aquifers in the Pilica catchment.

A – location of research piezometers: 1 – Pilica catchment watershed; 2 – rivers; 3 – piezometers (numbers comply with Tab. 1); B – structure of analyzed aquifers according to mean depth to groundwater table; C – structure of analyzed aquifers according to the type of aquifer; D – structure of analyzed aquifers according to the age of aquifer, Q – Quaternary, K – Cretaceous, J – Jurassic, N – number of aquifers – research piezometers;

Source: own work on the basis of MPHP50 and „Rocznik Hydrogeologiczny...”

Tabela 1. Zestawienie podstawowych informacji o poziomach wodonośnych w zlewni Pilicy
Table 1. Basic information about aquifers in the Pilica catchment

Lp No.	Nr w bazie PIG No in PIG data base	Nazwa Name	Hśr [m]	Wodonośiec Type of Aquifer	Wiek wodonośca Age of Aquifer
1	I/211/5	Brwinów	0,56	piaski	czwartorzęd
2	II/296/1	Goleniowy	6,69	margle	kreda górna
3	II/319/1	Lubocz	4,72	wapienie	jura górna
4	I/336/7	Białowieża	2,20	piaski	czwartorzęd
5	II/392/1	Goździków	6,28	piaskowce	jura dolna
6	I/470/5	Podlesie	6,78	margle	kreda górna
7	I/476/2	Morusy	21,48	wapienie i margle	jura środkowa i górna
8	I/704/3	Lubochenek	1,19	piaski	czwartorzęd
9	II/924/1	Złoty Potok	6,56	piaski	jura górna
10	II/1348/1	Jadwinówka	2,51	żwiry	czwartorzęd
11	II/1370/1	Maluszyn	20,17	margle	kreda
12	II/1371/1	Rusinów	3,23	piaski i żwiry	czwartorzęd
13	II/1372/1	Sielpia Wielka	5,21	piaski	czwartorzęd
14	II/1373/1	Opoczno	2,39	piaski	czwartorzęd
15	II/1374/1	Krasna	2,07	piaski	czwartorzęd
16	II/1383/1	Czarnca	10,59	margle	kreda górna

Objaśnienia: Hśr – przeciętna głębokość do zwierciadła wody podziemnej

Źródło: opracowanie własne na podstawie „Rocznika Hydrogeologicznego...”

Explanations: Hśr – mean depth to groundwater table

Source: own study on the basis of „Rocznik Hydrogeologiczny...”

gdzie:

T_{FSw} – statystyka F-Snedecora (równości wariancji),

$Os N^2$ – wariancja próby o liczebności N ,

$OS M^2$ – wariancja próby o liczebności M .

Jeżeli H_0 jest słuszna, to statystyka posiada rozkład *F-Snedecora* o $N - 1$ i $M - 1$ stopniach swobody. Wartości krytyczne zestawione zostały w tablicach tego rozkładu. Jeżeli $T_{FSw} > T_{FSw(kr)}$ należy odrzucić hipotezę zerową i przyjąć alternatywną.

Z grupy testów nieparametrycznych użyto testu serii sprawdzającego hipotezę zerową o pochodzeniu dwóch próbek z tej samej populacji generalnej. Jego zaletą jest możliwość stosowania przy relatywnie małych liczebnie próbach. Hipoteza zerowa H_0 zakłada, że dobór próbek jest losowy, a H_1 , że losowy nie jest (istnieje tendencja w szeregu czasowym). Procedura testowania polega na ozna-

czeniu kolejnych elementów szeregu odpowiednim znakiem (na przykład „+” dla wartości wyższych od mediany, „-” dla wartości od niej niższych). Tak utworzony ciąg znaków składa się z odcinków elementarnych (serii) o tym samym znaku. Statystyką T_S służącą do weryfikacji hipotezy zerowej jest liczba serii występujących w szeregu czasowym. Wielkość $T_{S(kr)}$ odczytywana jest z tablic statystycznych tego rozkładu (Zieliński, Zieliński 1990). Jeżeli jest $T_S < T_{S(kr)}$ dla danego poziomu istotności, H_0 należy odrzucić i przyjąć, że w badanym ciągu występuje istotny trend.

Oba testy zalecane są przez J. Pruchnickiego (1987) do oceny jednorodności szeregów czasowych zmiennych hydroklimatycznych. Wszystkie analizowane ciągi okazały się jednorodne statystycznie.

Szeregi czasowe średnich miesięcznych głębokości do wody (H_{sr}) we wszystkich otworach pomiarowych zostały przeliczone na rzędne zwierciadła wody podziemnej (R_{sr}). W ten sposób wartości największe odpowiadają będą najwyższemu położeniu zwierciadła wody podziemnej. Następnie dla wszystkich poziomów wodonośnych obliczono charakterystyki zmienności sezonowej zaproponowane przez Ch. G. Markhama (1970): *indeks sezonowości (IS)* i *wskaźnik pory koncentracji (WPK)*. Obie miary powstają przy założeniu, że wielkość analizowanej zmiennej w miesiącu i reprezentowana jest przez wektor (r_{si}) o długości proporcjonalnej do wartości tej zmiennej i kącie nachylenia (α_{si}), uzależnionym od położenia środka danego miesiąca względem początku roku hydrologicznego:

$$\alpha_{si} = \frac{360 \cdot L_s}{365} \quad (2)$$

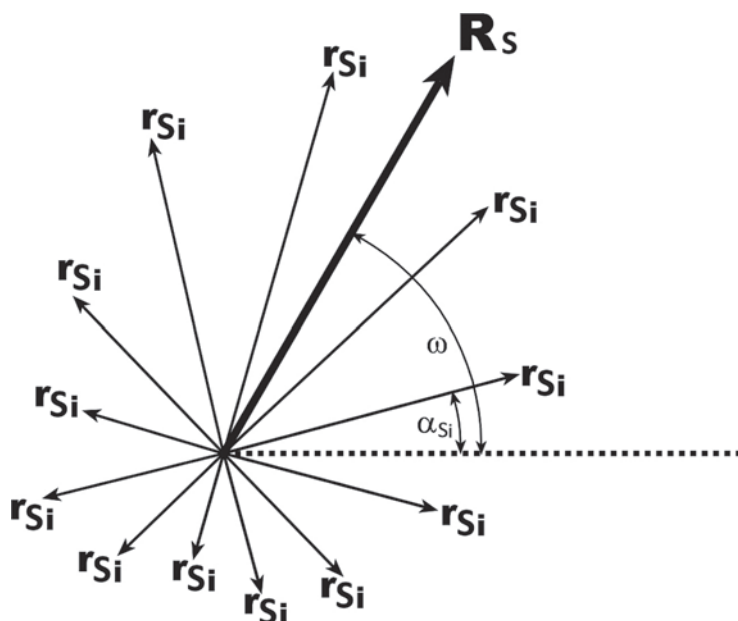
gdzie:

α_{si} – kąt nachylenia wektora r_{si} dla wartości miesięcznych,

L_s – liczba dni między początkiem roku hydrologicznego a środkiem danego miesiąca.

W wyniku zastosowania tej procedury powstaje 12 wektorów, dla których można wyznaczyć wektor wypadkowy R_s o module $|R_s|$ i kierunku ω (Ryc. 2). Dzieliąc długość wektora wypadkowego $|R|$ przez sumę długości wektorów cząstkowych $|r_{si}|$, uzyskujemy natomiast indeks sezonowości – IS :

$$IS = \frac{|R_s|}{\sum_{i=1}^{12} |r_{si}|} \cdot 100\% \quad (3)$$



Rys. 2. Idea konstrukcji wskaźników sezonowości Markhama

R_s – długość wektora wypadkowego z wektorów r_{Si} , r_{Si} – wektor odpowiadający średniej wartości cechy w i -tym miesiącu roku hydrologicznego, α_{Si} – kąt nachylenia wektora r_{Si} dla wartości średnich miesięcznych, ω – kąt nachylenia wektora wypadkowego R_s

Źródło: Tomaszewski 2001, zmienione

Fig. 2. Construction of Markham seasonality coefficients.

R_s – length of a resultant vector of vectors r_{Si} , r_{Si} – vector corresponding to the mean value of a feature in i month of hydrological year, α_{Si} – pitch of vector r_{Si} for mean monthly values, ω – pitch of resultant vector R_s

Source: Tomaszewski 2001, changed

gdzie:

IS – indeks sezonowości,

R_s – długość wektora wypadkowego z wektorów r_{Si} ,

r_{Si} – wektor odpowiadający średniej wartości cechy w i -tym miesiącu roku hydrologicznego.

Indeks sezonowości przyjmuje wartości z przedziału: 0 – 100%, a wraz z jego wzrostem rośnie stopień sezonowości badanej cechy. Warto zwrócić uwagę na fakt, że wartość 0 pojawić się może w dwóch przypadkach: kiedy występuje idealnie równomierne rozłożenie badanej cechy we wszystkich miesiącach (długość wszystkich 12 wektorów jest taka sama) lub wówczas, gdy zjawisko koncentruje się (występuje wyłącznie) w dwu przeciwstawnych miesiącach (przesuniętych względem siebie o pół roku, np. styczeń i lipiec).

Drugą miarą zaproponowaną przez Markhama jest wskaźnik pory koncentracji *WPK*. Został on zdefiniowany jako kąt nachylenia wektora wypadkowego $R(\omega)$ i obliczany jest według wzoru:

$$WPK = \arctg \left(\frac{\sum_{i=1}^{365} |r_{Si}| \cos \alpha_{Si}}{\sum_{i=1}^{365} |r_{Si}| \sin \alpha_{Si}} \right) \quad (4)$$

gdzie:

WPK – wskaźnik pory koncentracji,

r_{Si} – wektor odpowiadający średniej wartości cechy w *i*-tym miesiącu roku hydrologicznego.

α_{Si} – kąt nachylenia wektora r_{Si} dla wartości średnich miesięcznych,

Miara ta wyrażana jest w dobach względem początku roku hydrologicznego i wskazuje na miesiąc koncentracji zjawiska. Nie należy jej jednak utożsamiać z miesiącem, w którym pojawiają się najwyższe wartości badanej zmiennej, bowiem na jej wielkość mają wpływ wszystkie miesiące roku.

ZMIENNOŚĆ SEZONOWA PŁYTKICH WÓD PODZIEMNYCH W ZLEWNI PILICY

Poziomy wodonośne w zlewni Pilicy cechują się zróżnicowanym indeksem sezonowości wahającym się od nieco ponad 1% dla przeciętnie głębokiego poziomu w piaskach górnourajskich (Złoty Potok) do niemal 30% (Tab. 2) w przeciętnie głębokim poziomie w górnourajskich wapieniach (Lubocz). Wartość minimalna jest podobna do uzyskanej dla próby obejmującej zbiorniki wód podziemnych w środkowej Polsce, jednak wartość maksymalna oraz przeciętna (tu 16%) są już dwa razy większe (Tomalski 2011). Oznacza to, że poziomy wodonośne w zlewni Pilicy charakteryzują się wyraźniej zaznaczonym rocznym rytmem wahań rzędnej zwierciadła wody podziemnej niż te w całej środkowej Polsce. Inne są również rozkłady empiryczne tych prób. Poziomy „środkowopolskie” cechują się silną prawostronną skośnością, co oznacza, że dominują zbiorniki o bardzo słabo zaznaczonej sezonowości. W przypadku poziomów wodonośnych w zlewni Pilicy rozkład empiryczny jest niemal symetryczny i silnie platykurtyczny, co oznacza, że poziomy o niskiej, przeciętnej i wysokiej sezonowości są niemal równie liczne (Ryc. 3A).

Tabela 2. Charakterystyki zmienności sezonowej rzędnych zwierciadła wody podziemnej w zlewni Pilicy

Table 2. Characteristics of seasonal variability of groundwater table in the Pilica catchment

Lp No	Nazwa Name	IS	WPK dzień roku hydrologicznego day of hydrological year	WPK miesiąc month
1	Brwinów	22,2	121	III
2	Goleniowy	14,3	113	II
3	Lubocz	27,9	157	IV
4	Białowieża	16,3	250	VII
5	Goździków	12,1	260	VII
6	Podlesie	27,6	104	II
7	Morusy	15,2	198	V
8	Lubochenek	9,4	99	II
9	Złoty Potok	<u>1,1</u>	249	VII
10	Jadwinówka	11,2	250	VII
11	Maluszyn	9,5	97	II
12	Rusinów	25,3	102	II
13	Sielpia Wielka	6,2	218	VI
14	Opoczno	14,9	150	III
15	Krasna	21,6	109	II
16	Czarncza	22,8	272	VII

Objaśnienia: IS – indeks sezonowości, WPK – wskaźnik pory koncentracji; wytłuszczono i podkreślono wartość minimalną, wytłuszczono i podano na szarym tle wartość maksymalną

Źródło: opracowanie własne

Explanations: IS – seasonality index, WPK – time of concentration coefficient; bold and underlined for minimal value; bold and gray background for maximum value

Source: own study

Aby pokazać podobieństwo bądź różnice w przebiegu sezonowej zmienności wypełnienia poziomów wodonośnych średnie miesięczne stany wody podziemnej przeliczone zostały na wartości standaryzowane, a następnie zestawione na jednym wykresie. Standaryzacja zmiennych polega tu na obliczeniu, o ile odchylenie standardowych wartość i -tej zmiennej różni się od średniej. Wartość standaryzowaną (ZSH) obliczamy według wzoru:

$$ZSH = \frac{x_i - \bar{Hsr}}{OsHsr} \quad (5)$$

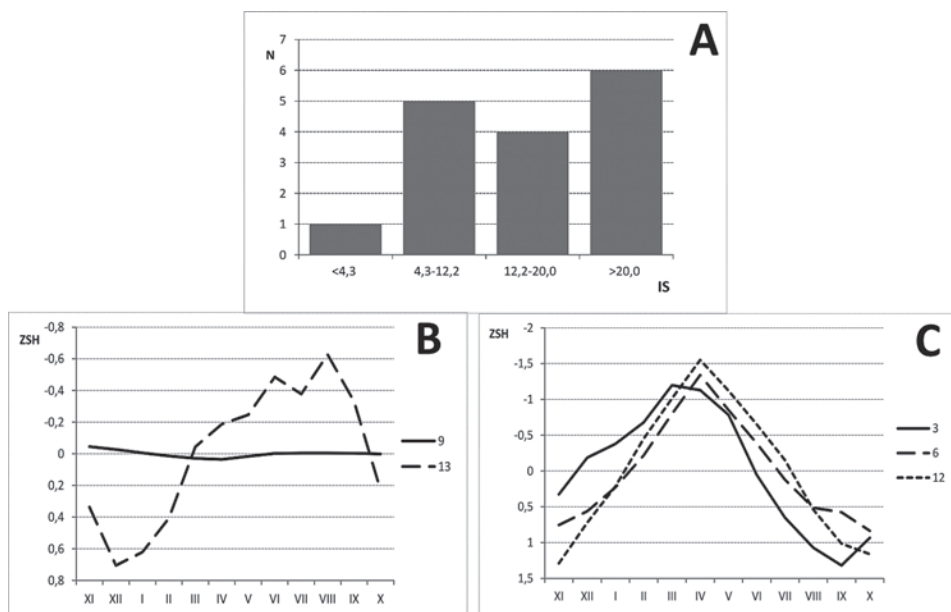
gdzie:

ZSH – zmienna standaryzowana średnich stanów wody,

$OsHsr$ – odchylenie standardowe średnich miesięcznych stanów wody,

x_i – wartość i -tej zmiennej Hsr ,

\bar{Hsr} – średnia arytmetyczna średnich miesięcznych stanów wody.



Rys. 3. Indeks sezonowości zwierciadła wody podziemnej w poziomach wodonośnych o swobodnym zwierciadle w zlewni Pilicy

A – liczebność poziomów wodonośnych w przedziałach klasowych o rozpiętości jednego odchylenia standardowego, N – liczebność, IS – indeks sezonowości; B – Średni roczny rytm zmienności stanów wody w poziomach wodonośnych charakteryzujących się IS mniejszym od przeciętnego o ponad jedno odchylenie standardowe, ZSH – zmienna standaryzowana stanów wody, 9, 13 – numery otworów pomiarowych zgodne z tab. 1; C – Średni roczny rytm zmienności stanów wody w poziomach wodonośnych charakteryzujących się IS większym od przeciętnego o ponad jedno odchylenie standardowe

Fig. 3. Seasonal index of groundwater table in unconfined aquifers of the Pilica catchment

A – number of aquifers in compartments with spread of one standard deviation, N – number of aquifers, IS – seasonality index; B – mean yearly changes of groundwater table in aquifers with IS over one standard deviation lower than average, ZSH – standard variable of groundwater level, 9, 13 – numbers of piezometers comply with Tab.1; C – mean yearly changes of groundwater table in aquifers with IS over one standard deviation higher than average

Poziomy wodonośne, dla których uzyskane indeksy sezonowości były wysokie (wartości większe od średniej o ponad jedno odchylenie standardowe) cechują się bardzo zbliżonymi przebiegami zmienności rzędnej zwierciadła wody podziemnej w ciągu roku (Ryc. 3C). Stanowią one niemal „podręcznikowy” przykład sezonowego rozłożenia zasobów wód podziemnych nazwanego przez W. Chełmickiego (1991) reżimem kontynentalnym wód podziemnych o jednej kulminacji zwierciadła. Stany maksymalne osiągnęte są po wiosennych roztopach (tutaj kwiecień) i dosyć szybko zaczynają maleć w wyniku intensywnego drenażu

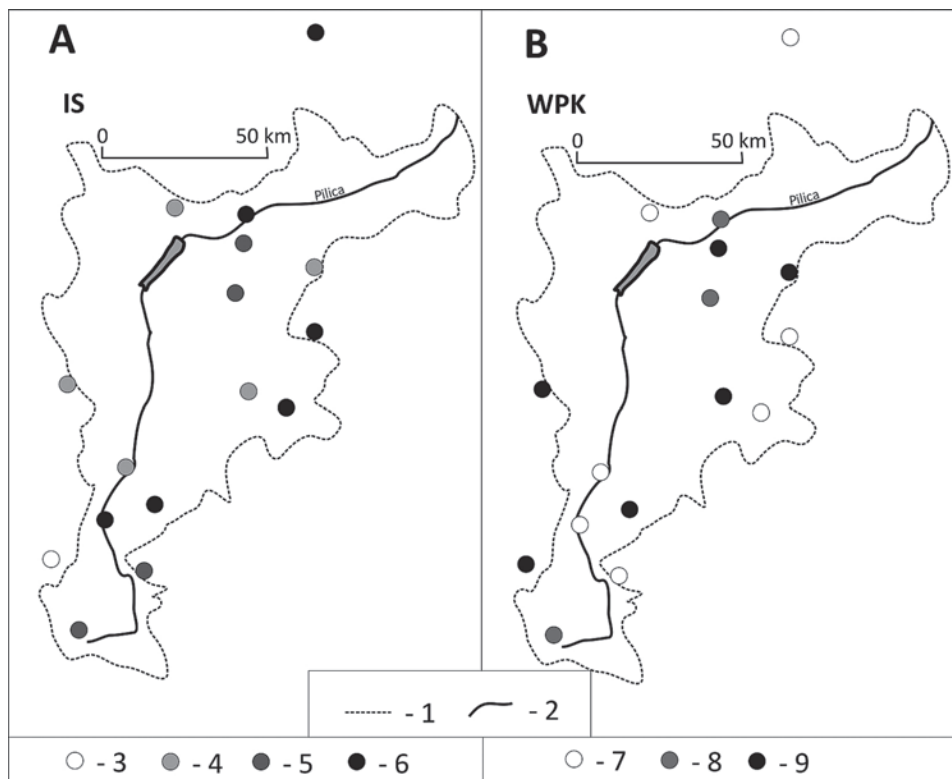
oraz ewapotranspiracji, aż do minimów z przełomu roku hydrologicznego, od kiedy zaczyna się ich ponowny wzrost. Ten typ zmienności występuje w centralnej, północnej i częściowo wschodniej Polsce, a więc również na większości obszaru zlewni Pilicy. Zidentyfikowany został zarówno w piaskach czwartorzędowych, jak i w starszych skałach (kredowych marglach i jurajskich wapieniach). Potwierdza to, że na jego kształtowanie mają wpływ regionalne różnice w przebiegu zasilania poziomów wodonośnych, a nie parametry hydrogeologiczne wodonośców.

Poziomy wodonośne cechujące się niskimi wartościami IS (mniejsze od średniej o ponad jedno odchylenie standardowe) wykazują bardzo różne przebiegi zmienności ich wypełnienia (Ryc. 3B). Różnice dotyczą nie tylko terminów występowania ekstremów (listopad i sierpień dla maksimów oraz kwiecień i grudzień dla minimów), ale również amplitudy wahań. W obu przypadkach wodonoścem są tu piaski czwartorzędowe, ale poziomy posiadają kontakty hydrauliczne z głębiej położonymi zbiornikami i zapewne to rytm ich wahań determinuje zmienność wypełnienia płytkich warstw wodonośnych.

Z analizy porównawczej wynika, że sezonowość wód podziemnych w zlewni Pilicy jest podobna do innych charakterystyk hydroklimatycznych, których IS wahają się w granicach: 12–33% dla opadu (Kozuchowski, Wibig 1988), około 20% dla odpływu całkowitego (Jokiel, Bartnik 2001) czy 10–20% dla odpływu podziemnego (Tomaszewski 2001). Warto zwrócić uwagę, że jest to obok odpływu podziemnego wartość najniższa, co oznacza, że stanowi jeden z najbardziej równomiernie rozłożonych w roku składników bilansu wodnego stabilizujący warunki wilgotnościowe (retencja wód podziemnych).

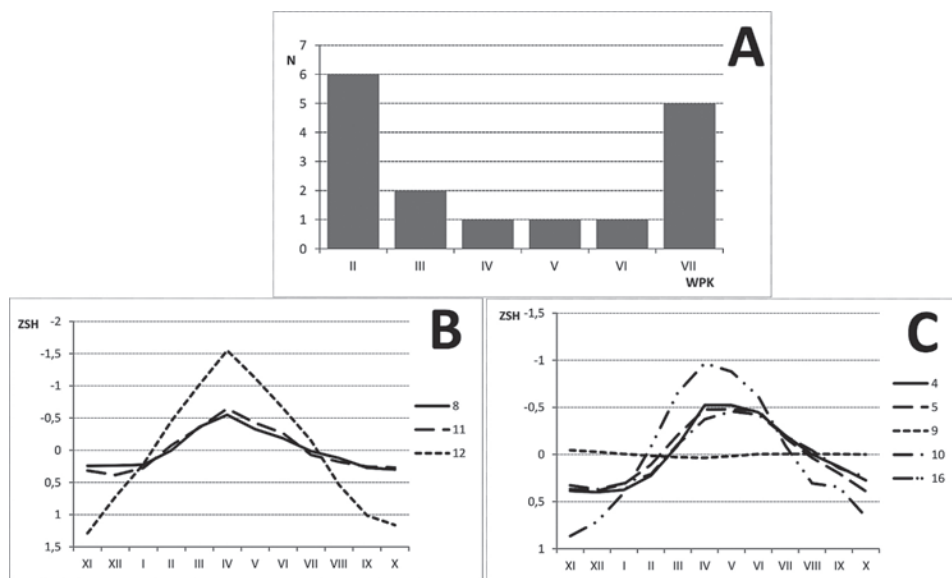
W rozmieszczeniu przestrzennym indeksu sezonowości nie da się zauważyć żadnych prawidłowości. Zbiorniki wód podziemnych cechujące się nawet skrajnie różnym poziomem tej charakterystyki położone są obok siebie. Oznacza to, że na IS największy wpływ mają warunki hydrogeologiczne danego poziomu wodonośnego (Ryc. 4A). Takie same wnioski uzyskano podczas badania poziomów wodonośnych w całej środkowej Polsce (Tomalski 2011). Obszar południowo-zachodni (obejmujący również zlewnię Pilicy) został tam wyróżniony ze względu na duże zróżnicowanie indeksu sezonowości niewystępujące w innych częściach regionu.

Poziomy wodonośne w zlewni Pilicy cechują się zróżnicowanymi wielkościami wskaźnika pory koncentracji WPK (Tab. 2). Najwcześniej wypełnienie zbiornika wód podziemnych koncentruje się w 97. dniu roku hydrologicznego (luty) w głęboko położonym kredowym poziomie wodonośnym w marglach (Maluszyn). Podobne parametry hydrogeologiczne cechują poziom wodonośny, w którym koncentracja następuje najpóźniej (por. Tab. 1; Czarnca). Pory koncen-



Ryc. 4. Rozmieszczenie przestrzenne wartości indeksu sezonowości (IS) oraz wskaźnika pory koncentracji (WPK) w poziomach wodonośnych w zlewni Pilicy, A – indeks sezonowości; B – wskaźnik pory koncentracji; 1 – dział wodny zlewni Pilicy, 2 – rzeki, 3 – IS mniejszy o $-1,5$ odchylenia standardowego od wartości przeciętnej, 4 – IS z przedziału $-0,5$ – $1,5$ odchylenia standardowego od wartości przeciętnej, 5 – IS z przedziału $-0,5$ – $0,5$ odchylenia standardowego od wartości przeciętnej, 6 – IS z większy o $0,5$ odchylenia standardowego od wartości przeciętnej, 7 – WPK z przedziału $-0,5$ – $1,5$ odchylenia standardowego od wartości przeciętnej, 8 – WPK z przedziału $-0,5$ – $0,5$ odchylenia standardowego od wartości przeciętnej, 9 – WPK większy o $0,5$ odchylenia standardowego od wartości przeciętnej

Fig. 4. Spatial location of seasonality index (IS) and time of concentration coefficient (WPK) in aquifers of Pilica catchment. A – seasonality index; B – time of concentration coefficient; 1 – Pilica catchment watershed, rivers, 3 – IS lower over -1.5 of standard deviation than average value, 4 – IS from range -0.5 – -1.5 standard deviation from average value, 5 – IS from range -0.5 – 0.5 standard deviation of average value, 6 – IS higher over 0.5 of standard deviation from average value, 7 – WPK from range -0.5 – -1.5 standard deviation from average value, 8 – WPK from range -0.5 – 0.5 standard deviation from average value, 9 – WPK higher over 0.5 of standard deviation from average value



Rys. 5. Wskaźnik pory koncentracji poziomów wodonośnych o swobodnym zwierciadle w zlewni Pilicy, A – liczebność poziomów wodonośnych w przedziałach klasowych o rozpiętości jednego odchylenia standardowego, N – liczebność, WPK – wskaźnik pory koncentracji; B – średni roczny rytm zmienności stanów wody w poziomach wodonośnych charakteryzujących się WPK mniejszym od przeciętnego o ponad jedno odchylenie standardowe, ZSH – zmienna standaryzowana stanów wody, 9, 13 – numery otworów pomiarowych zgodne z Tab. 1; C – średni roczny rytm zmienności stanów wody w poziomach wodonośnych charakteryzujących się WPK większym od przeciętnego o ponad jedno odchylenie standardowe

Fig. 5. Time of concentration coefficient of groundwater table in unconfined aquifers of Pilica catchment, A – number of aquifers in compartments with spread of one standard deviation, N – number of aquifers, WPK – time of concentration coefficient, B – mean yearly changes of groundwater table in aquifers with WPK over one standard deviation lower than average, ZSH – standard variable of groundwater level, 9, 13 – numbers of piezometers comply with Tab. 1; C – mean yearly changes of groundwater table in aquifers with WPK over one standard deviation higher than average

tracji wczesnowiosenne i wczesnoletnie są niemal równie liczne (Ryc. 5A), co różni zlewnię Pilicy od pozostałego obszaru środkowej Polski, gdzie wyraźnie dominują poziomy wodonośne z relatywnie wczesną porą koncentracji (Tomalski 2011). Wynika to z położenia zlewni częściowo na obszarze występowania reżimu kontynentalnego wód podziemnych z wtórną kulminacją letnią (Chełmicki 1991). Występuje on w południowo-wschodniej Polsce, a stan wody podziemnej nie obniża się tu gwałtownie po wiosennych roztopach, tylko często zostaje „podtrzymany” przez dwa do czterech miesięcy na podobnym poziomie jak maksimum – wynik intensywnych opadów pory ciepłej. W niektórych przypadkach wyraźnie zaznacza się również podniesienie się rzędnych zwierciadła w sierpniu.

Prawidłowość tę zauważyli i opisali również inni autorzy (Dynowska, Pietrygowa 1979), badający obszar południowo-wschodniej Polski. Widoczna jest ona również bardzo dobrze w grupie poziomów wodonośnych w zlewni Pilicy, cechujących się wysokim WPK (większym od średniej o jedno odchylenie standardowe; Ryc. 5C).

Zbiorniki wód podziemnych cechujące się bardzo wczesną porą koncentracji (mniejszą od wielkości średniej o jedno odchylenie standardowe) wykazują przebieg sezonowej zmienności wypełnienia typowy dla obszaru o reżimie kontynentalnym z jedną kulminacją (Ryc. 5B). Granica między obszarami o różnym reżimie wód podziemnych przebiega przez zlewnię Pilicy, w związku z tym możliwe jest tu, nawet bliskie, współwystępowanie poziomów wodonośnych reprezentujących oba typy zmienności.

Podobnie jak w całej środkowej Polsce poziomów wodonośnych o porze koncentracji przypadającej między wczesną wiosną a latem jest niewiele. W przypadku zlewni Pilicy termin majowy występuje tylko raz. Przebieg zmienności sezonowego wypełnienia poziomu wodonośnego jest tu nietypowy jak na płytkie wody podziemne, ale „współkształtny” do zanotowanych w podobnych poziomach z grupy zbiorników „środkowopolskich” (Tomalski 2011). Maksymalne stany wody notowane są tu w czerwcu, a minima w lutym. Zauważmy, że są to dosyć głębokie poziomy, a tempo ich zasilania zależy od budowy geologicznej warstw nadległych. W przypadku występowania skał trudnoprzepuszczalnych migracja wody może trwać długo. Przesunięcie występowania ekstremalnych stanów wód podziemnych może wynosić w takich przypadkach od 3 do nawet 6 miesięcy (Chełmicki 1991).

Porównując wskaźnik pory koncentracji wód podziemnych z innymi charakterystykami hydroklimatycznymi, możemy stwierdzić pewne prawidłowości. Pory koncentracji wód w poziomach wodonośnych o reżimie kontynentalnym z jedną kulminacją korelują z porami koncentracji odpływu całkowitego (marzec; Jokiel, Bartnik 2001) czy podziemnego (luty; Tomaszewski 2001). W przypadku wód o reżimie kontynentalnym z wtórną letnią kulminacją WPK koreluje z analogiczną charakterystyką obliczoną dla opadów (lipiec; Kożuchowski, Wibig 1988). Być może ma to związek z typami równowagi, w jakiej znajduje się zwierciadło wód podziemnych w tych poziomach (Więckowska 1960). W przypadku wczesnej koncentracji byłaby to równowaga drenowania (zbieżne WPK), a w przypadku późnej koncentracji równowaga infiltracyjna bądź przesączania. Wniosek taki należy jednak traktować ostrożnie.

W rozmieszczeniu przestrzennym wskaźnika pory koncentracji nie da się zauważyć żadnych prawidłowości. Zbiorniki wód podziemnych cechujące się nawet

skrajnie różnym poziomem tej charakterystyki położone są obok siebie. Oznacza to, że na WPK największy wpływ mają warunki hydrogeologiczne danego poziomu wodonośnego, mimo wyraźnej zależności tej charakterystyki od warunków klimatycznych (Ryc. 4B).

Ostatnim etapem było poszukiwanie zależności między charakterystykami zwierciadła wody podziemnej a parametrami hydrogeologicznymi zbiorników. Procedura ta jest dobrze znana i nie będzie tu opisywana. Szczegółowy opis znaleźć można w publikacjach metodycznych (Greń 1970, Pruchnicki 1987). Obliczone związki regresyjne (w przypadku zmiennych ilościowych) czy zestawienia w tablicach kontyngencyjnych (w przypadku gdy jedna zmienna jest jakościowa, np.: rodzaj wodonośca) oraz ich testowanie statystyczne nie wskazały na istnienie takich zależności. Wyróżnia to poziomy wodonośne w zlewni Pilicy z grupy zbiorników w środkowej Polsce. W tej większej grupie indeks sezonowości oraz pora koncentracji rzędnych zwierciadła wody podziemnej zależne były od średniej głębokości występowania wody. Im głębiej położony zbiornik, tym IS był mniejszy, a pora koncentracji – późniejsza (Tomalski 2011).

WNIOSKI

Przeprowadzone badanie potwierdziło, że wahania zwierciadła wód podziemnych w zlewni Pilicy cechują się nieco innym charakterem niż na pozostałym obszarze środkowej Polski. W porównaniu z nim indeksy sezonowości w zlewni Pilicy są bardziej zróżnicowane. Więcej poziomów wodonośnych posiada również wyraźnie zaznaczony roczny rytm wahań zwierciadła wody podziemnej. W przypadku WPK relatywnie częściej występują zbiorniki wód podziemnych z koncentracją rzędnych zwierciadła przypadającymi na wczesne lato. Wynika to z położenia tego obszaru na granicy dwóch dziedzin reżimu kontynentalnego. Można również ostrożnie zauważyć, że określone wielkości WPK mogą być powiązane z typem równowagi zwierciadła wody podziemnej. Jest to niestety jedyna prawidłowość, jaką udało się uchwycić między wskaźnikami sezonowości a charakterystykami poziomów wodonośnych. Duża zmienność warunków hydrogeologicznych i powiązania hydrauliczne między zbiornikami o różnym charakterze sprawiają, że współzależności wykryte dla obszaru całej środkowej Polski nie mają tu zastosowania.

LITERATURA

- Chelmicki W., 1991. *Reżim płytkich wód podziemnych w Polsce*. Rozpr. Hab. UJ, nr 218, Wyd. UJ, Kraków, ss. 136.
- Dynowska I., Pietrygowa Z., 1979. *Wahania stanów wód gruntowych w dorzeczu górnej Wisły*, Folia Geogr. Ser. Geogr.-Phys., XII, 103–120.
- Greń J., 1970. *Modele i zadania statystyki matematycznej*, PWN, Warszawa, ss. 324.
- Jez G., 1986. *Próba oceny wieloletniej zmienności zwierciadła wód podziemnych w regionie łódzkim*. Mat. Konf. Ogólnopolskiej Konferencji Hydrograficznej, UAM Poznań 15–17 IX 1986, 131–136.
- Jokiel P., Bartnik A., 2001. *Zmiany w sezonowym rozkładzie odpływu w środkowej Polsce w wieloletniu 1951–1998*. Wiad. IMGW, XXIV, 2, 3–17.
- Kożuchowski K., Wibig J., 1988. *Kontynentalizm pluwialny w Polsce*. Acta Geogr. Lodz., 55, Wyd. Ossolineum, ss. 102.
- Markham C. G., 1970. *Seasonality of Precipitation in The United States*, Annals of the Association of American Geographers, vol. 60, 3, 593–597.
- MPHP50. *Mapa Podziału Hydrograficznego Polski w skali 1:50 000*, KZWG, <http://mapa.kzgw.gov.pl>.
- Paczyński B., Sadurski A., 2007. *Hydrogeologia regionalna Polski. Tom I. Wody Słodkie*, PIG, Warszawa, ss. 542.
- Paszczyk J. 1973. Analiza wahań zwierciadła wód podziemnych w obszarze wschodnim Polski, Przegl. Geogr., t. XLV, z. 3, 599–610
- Pazdro Z., 1983. *Hydrogeologia ogólna*, Wyd. Geolog., Warszawa, ss. 575.
- Pruchnicki J., 1987. *Metody opracowań klimatologicznych*, Wyd. PWN, Warszawa, ss. 203.
- Rocznik Hydrogeologiczny Państwowej Służby Hydrogeologicznej Rok Hydrologiczny 2003,... 2014, PIG-PIB, Warszawa.
- Tomalski P., 2007. *Ekstremalne stany wód podziemnych w środkowej Polsce w wieloletniu 1951–2000*, [w:] P. Jokiel (red.) *Zjawiska ekstremalne i zdarzenia nadzwyczajne w środkowej Polsce*, Wyd. UŁ, Łódź, 131–150.
- Tomalski P., 2011. *Dynamika zasobów płytkich wód podziemnych w województwie łódzkim i na obszarach sąsiednich*, Wyd. ŁTN, Łódź, ss. 109.
- Tomaszewski E., 2001. *Sezonowe zmiany odpływu podziemnego w Polsce w latach 1971–1990*, Acta Geogr. Lodz. nr 79, ss. 149.
- Tomaszewski J. T., 1990. *Charakter wahań zwierciadła górnego poziomu wód podziemnych. Na przykładach z południowo-zachodniej i środkowej Polski*, Studia Geogr. XLIX, Wyd. Uniw. Wrocław, Wrocław, ss. 227.
- Wieczysty A., 1982. *Hydrogeologia inżynierska*, PWN, Warszawa, 1070 s.
- Więckowska H., 1960. *Strefowość geograficzna pierwszego horyzontu wód podziemnych*. Przegl. Geogr., XXXII, 1–2, 35–61.
- Zieliński R., Zieliński W., 1990. *Tablice statystyczne*, PWN, Warszawa, ss. 456.

SUMMARY

The paper attempts to identify seasonal variability of groundwater table in the Pilica catchment. Procedure created by Ch. G. Markham was used. It allows to compare results with analogical characteristics of other aquifers from central Poland. Sixteen piezometers were used for the research. They represent shallow aquifers located in the Pilica catchment and its surrounding and they are part of a measurement network of PIG-PIB (years from 2003 till 2014 were used). All of the aquifers

with 10 years data series were chosen for the analyzed group. They represent the whole spectrum of occurrence of groundwaters in the Pilica catchment.

Before the analysis homogeneity of time series was checked by two statistical tests: parametric F-Snedecor test (examines null hypothesis about variance equality) and non-parametric series test (examines null hypothesis about origin of two samples from the same general population). All of numeric strings were statistically homogeneous.

Time series of mean monthly depth to groundwater table in all piezometers were changed into groundwater ordinates. In that way, maximum values are compared with the maximum level of groundwater table. Next, for all the aquifers the Markham characteristics of seasonal variability were calculated. First of them is seasonality index (IS) and it ranges from 0 to 100%. The second characteristic is time of concentration (WPK). During the interpretation of WPK values it is important to remember that this characteristic shows only time of concentration (it must not be associated with terms of maximum level of the examined phenomenon).

Aquifers in the Pilica catchment are characterized by differential seasonality index ranging from 1 to 30%. It means that rhythm of groundwater table changes is not seasonal in part of aquifers. Despite that, the seasonal variability of groundwater level is stronger in the Pilica catchment than in other aquifers in central Poland (IS is on average almost double). Time of concentration coefficients are differential too. They occur from February to July in the Pilica catchment, while in the whole central Poland they are concentrated in two terms (late winter and summer). Unlike other parts of central Poland, changes of groundwater resources are characterized by poor correlation with hydrogeological parameters of aquifers or mean depth to the groundwater level in piezometers in the Pilica catchment.