

Zmienność wieloletnia i sezonowa występowania minimalnych stanów wód podziemnych na wybranym obszarze nizinym

Agnieszka Kowalczyk¹, Izabela Stępińska-Drygala¹, Piotr Wesolowski¹

Seasonal and long-term variability of monthly minimum groundwater levels in selected lowland area. *Prz. Geol.*, 63: 860–866.

Abstract. The study undertakes investigations of the seasonal and long-term variability of monthly minimum groundwater levels of unconfined aquifer within selected lowland areas of Wkra and Skrwa Prawa catchments. Data were collected at four locations, monitored within the national groundwater monitoring network run by the Polish Geological Institute – NRI and cover a period of 39 years (1976–2014). Analysis performed within the study includes descriptive statistics, autocorrelation coefficients for delays from 1 to 450 months and the indicator of minimum groundwater level; results are presented using contour graphs. Data demonstrate very strong autocorrelation and internal inertia. A specific long-term irregular periodicity of monthly minimum levels' fluctuations dominating over seasonal changes has been revealed. The study also shows, that seasonal variability of monthly minimum levels within the catchments corresponds to the continental type of groundwater fluctuations. The highest monthly minimum levels occur in spring (predominantly in April), and the lowest – in autumn (October and November). The analysis indicates no obvious overall change in the structure of seasonal monthly minimum groundwater levels within the investigated period. However, in one location within the Skrwa Prawa drainage basin, the period with the highest monthly minimum levels was brought forward from April to earlier months.

Keywords: minimum groundwater levels, seasonal and long-term variability of groundwater levels, autocorrelation of groundwater levels, the Wkra drainage basin, the Skrwa Prawa drainage basin

Wody podziemne są bardzo ważnym elementem obiegu wody w przyrodzie, który przez swą specyfikę może odegrać istotną rolę w adaptacji ludzkości do zmian klimatycznych. Dlatego jest szczególnie ważne poznanie naturalnej zmienności sezonowej i wieloletniej występowania minimalnych stanów wód podziemnych, które często wiążą się z okresami niedoborów wody i mogą powodować poważne zakłócenia w gospodarce wodnej w dorzeczeniach. W warunkach naturalnych niskie stany wód podziemnych o zwierciadle swobodnym są następstwem względnie długotrwałego ograniczonego zasilania infiltracyjnego warstwy wodonośnej przez strefę aeracji. Taka sytuacja najczęściej jest poprzedzona długim okresem niskich opadów atmosferycznych lub ich brakiem. Jak pokazują m.in. badania Mosiejenko, Stiepanowa i Tsykina nad stopniem przepuszczalności gleb w okresie zimowym (Soczyńska, 1990) oraz terminy występowania najniższych stanów wód na terenie Polski ograniczenie infiltracji na skutek zamrażania gruntów ma na ogół mniejsze znaczenie.

W polskiej literaturze hydrologicznej i hydrogeologicznej istnieją prace dotyczące ogólnej dynamiki wahań zwierciadła wody podziemnej, szczególnie pierwszego poziomu wodonośnego (Więckowska, 1960; Bobrowska, 1970, Paszczyk, 1973; Dynowska & Pietrygowa, 1978; Tomaszewski, 1990; Chelmicki, 1991, 1993; Buczyński i in., 2005; Tomalski, 2010). Bardzo rzadko spotyka się opracowania analizujące bardziej szczegółowo zmienność stanów minimalnych tych wód. Stany ekstremalnie niskie ze względu na swoje znaczenie dla gospodarki wodnej (w tym skutki społeczne i ekonomiczne, które wywołują) i aspekty ekologiczne, takie jak np. ochrona ekosystemów lądowych zależnych od wód podziemnych, zasługują na pogłębioną analizę.

Celem pracy jest rozpoznanie sezonowej i wieloletniej zmienności występowania najniższych miesięcznych stanów wód podziemnych poziomu wodonośnego o zwierciadle

dle swobodnym na obszarze nizinym – w zlewniach Wkry oraz Skrwy Prawej.



Ryc. 1. Lokalizacja punktów obserwacyjnych objętych analizą
Fig. 1. Location of analysed groundwater observation boreholes

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 02-975 Warszawa; agnieszka.kowalczyk@pgi.gov.pl, izabela.stepinska.drygala@pgi.gov.pl, piotr.wesolowski@pgi.gov.pl.

Tab. 1. Dane o punktach objętych analizą
Table 1. Information about the analysed monitoring points

Nr punktu Point numer	Charakter zw. wody Type of aquifer	Wysztalcenie warstwy wodonośnej Kind of sediments	Stratygrafia warstwy wodonośnej Stratigraphy	Mezoregion (Kondracki, 2009) Mesoregion (Kondracki, 2009)	Forma geomorfologiczna* Geomorphological form*	Odległość od najbliższej rzeki Distance to the nearest river
II/79/1	swobodny unconfined	piaski i żwiry z otoczkami sands and gravels with pebbles	czwartorzęd Quaternary	Wysoczyzna Płońska Płońska Plateau	dolina rzeki Sierpienicy Sierpienica River Valley	ok. 80 m approx 80 m
II/80/1		piaski i żwiry sands and gravels		Wzniesienia Mławskie Mławskie Elevations	wysoczyzna morenowa morainic plateau	ok. 1700 m approx 1700 m
II/91/1		piaski sands		Wysoczyzna Płońska Płońska Plateau	dolina Szkotówki Szkotówka River Valley	ok. 50 m approx 50 m
II/98/1		piaski i żwiry sands and gravels		Wysoczyzna Płońska Płońska Plateau	dolina rzeki Płonki Płonka River Valley	ok. 200 m approx 200 m

* Podano na podstawie Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, arkusze: Nidzica, Płońsk, Ciechanów i Sierpc (Baraniecka, 1990; Kotarbiński, 1999; Morawski, 2002; Lichwa & Welniak, 2008) oraz Mapy Hydrogeologicznej Polski Pierwszy poziom wodonośny – występowanie i hydrodynamika, arkusze: Ciechanów i Płońsk (Dobkowska, 2005; Pijewski, 2011).

Based on: the Detailed Geological Map of Poland 1 : 50 000, Nidzica, Płońsk, Ciechanów, Sierpc sheets (Baraniecka, 1990; Kotarbiński, 1999; Morawski, 2002; Lichwa & Welniak, 2008) and the Hydrogeological Map of Poland: First Aquifer – Extent and Hydrodynamics, Ciechanów, Płońsk sheets (Dobkowska, 2005; Pijewski, 2011).

DANE WEJŚCIOWE I METODY

Przy wyborze obiektów do badań, autorzy brali pod uwagę występowanie na danym obszarze możliwie dużej liczby punktów monitoringowych wód podziemnych, o długich (ponad 30-letnich) ciągach obserwacji poziomu wodonośnego o zwierciadle swobodnym.

Zlewnie Wkry oraz Skrzy Prawej zajmują wysoczyzny staroglacjalne przecinane gęstą siecią rzek. Poziom wodonośny o zwierciadle swobodnym tworzą tu aluwialne utwory piaszczyste dolin rzecznych oraz fragmentarycznie piaski wodnolodowcowe, piaski moren czołowych i kemów. Do analizy wykorzystano pomiarów stanów zwierciadła wody podziemnej z czterech punktów obserwacyjnych należących do sieci obserwacyjno-badawczej PIG-PIB o numerach: II/79/1, II/80/1, II/91/1, II/98/1 (ryc. 1, tab. 1). Są to punkty monitoringowe o najdłuższym okresie obserwacji na rozważanym obszarze. Reprezentują pierwszy poziom wodonośny o zwierciadle swobodnym o miąższości powyżej 10 m. Analizą objęto 39-letnie ciągi pomiarów w latach hydrologicznych 1976–2014.

Z cotygodniowych pomiarów w punktach monitoringowych wyznaczono stany minimalne miesięczne w poszczególnych latach hydrologicznych. Z tych wartości utworzono szeregi czasowe minimalnych stanów miesięcznych, które poddano dalszej analizie. W pierwszej kolejności obliczono statystyki opisowe. Strukturę szeregów czasowych przeanalizowano za pomocą funkcji autokorelacji (AFC), wyliczając współczynniki autokorelacji i ich błędy standardowe dla kolejnych opóźnień (przesunięć ciągów względem siebie) w zakresie od 1 do 450 miesięcy. Istotność statystyczną występujących autokorelacji zbadano testem Boxa-Ljunga. Następnie dla każdego analizowanego punktu monitoringowego mi-

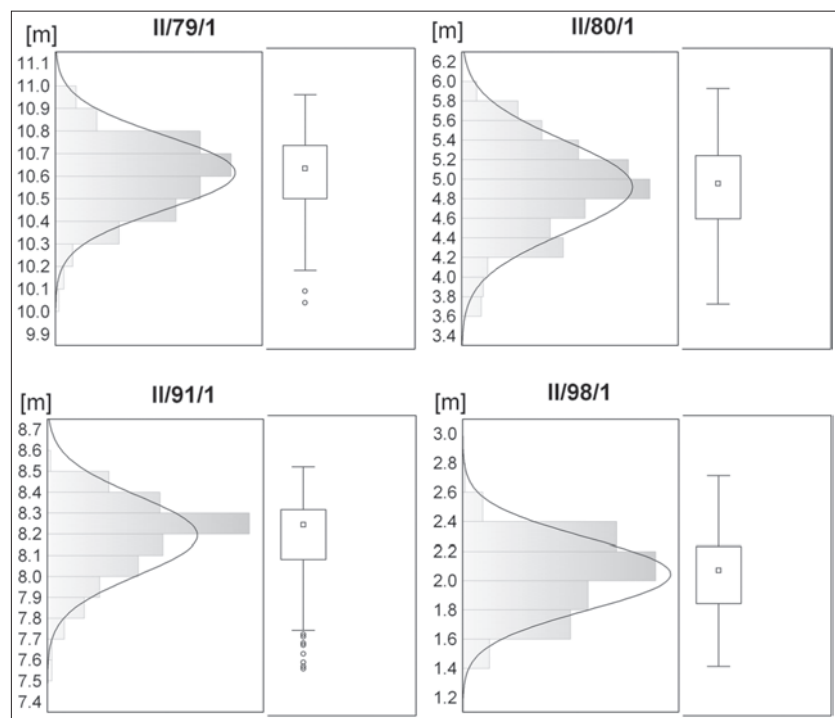
nimalne miesięczne wartości stanu zwierciadła wód podziemnych zapisano w postaci macierzy:

$$\mathbf{A} = [a_{i,j}]_{12 \times 39}$$

gdzie:

$a_{(i,j)}$ – minimalny stan zwierciadła wody w miesiącu (i) roku (j),

i (1, 2, ..., 12) – miesiąc (zakres odpowiada dwunastu miesiącom roku hydrologicznego),



Ryc. 2. Rozkład wartości minimalnych miesięcznych stanów zwierciadła wody w poszczególnych punktach. Na wykresie ramka-wąsy kwadratem zaznaczono medianę, rozpiętością prostokąta – dolny (Q_1) i górny (Q_3) kwartył, a rozpiętością odcinka – przedział wartości nieodstających $<Q_1 - 3Q; Q_3 + 3Q>$, gdzie $Q = (Q_3 - Q_1) / 2$. Rysunek wygenerowano w programie STATISTICA 10

Fig. 2. Distribution of the monthly minimum groundwater levels. In the box-and-whiskers graph: the median value is indicated by a square, a first (Q_1) and third (Q_3) quartiles are indicated by span of a rectangular, the outliers are located outside the length of the line. The chart has been generated using STATISTICA 10

Tab. 2. Statystyki opisowe
Tab. 2. Descriptive statistics

Nr punktu Point number	N ważnych Valid n	Średnia Average [m]	Mediana Median [m]	Moda Mode [m]	Liczność mody Frequency of Mode	Min. [m]	Max. [m]	Amplituda Amplitude [m]	Wariancja Variance [m ²]	Odchylenie standard. Standard deviation [m]	Wsp. zmienności Coefficient variability [%]	Skośność Skewness [-]
II/79/1	430	10,61	10,63	10,70	42	10,05	10,95	0,90	0,03	0,16	1,55	-0,34
II/80/1	464	4,91	4,95	5,05	15	3,75	5,90	2,15	0,22	0,47	9,54	-0,25
II/91/1	455	8,19	8,24	8,30	50	7,57	8,51	0,94	0,03	0,19	2,28	-0,78
II/98/1	467	2,04	2,07	2,10	24	1,43	2,70	1,27	0,06	0,24	11,87	-0,20

j (1, 2, ..., 39) – rok (zakres odpowiada 39 latom analizowanego okresu).

Na podstawie tych macierzy sporządzono diagramy, które służyły do porównania wieloletniej i sezonowej zmienności minimalnych miesięcznych stanów wód podziemnych pomiędzy punktami. Dla każdego miesiąca w wieloleciu wyliczono względny wskaźnik minimum v , zdefiniowany zgodnie ze wzorem:

$$v_{i,j} = MGm_{i,j} / MGA$$

gdzie:

$v_{i,j}$ – względny wskaźnik minimum,

$MGm_{i,j}$ – stan minimalny z miesiąca (i) w roku (j),
 MGA – stan minimalny roczny z wielolecia o prawdopodobieństwie przekroczenia 50%,

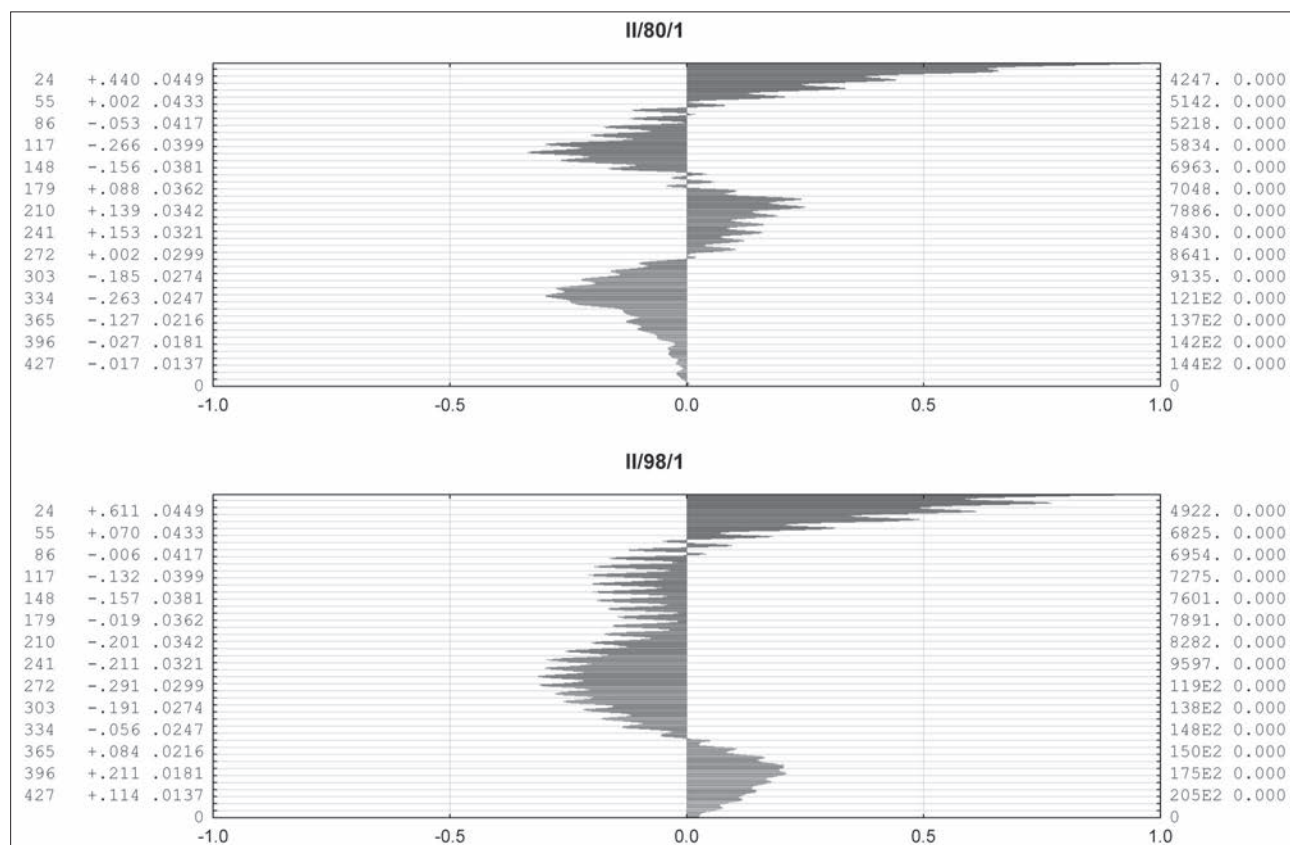
i (1, 2, ..., 12) – miesiąc,

j (1, 2, ..., 39) – rok.

Obliczenia wykonano za pomocą pakietu STATSTICA.

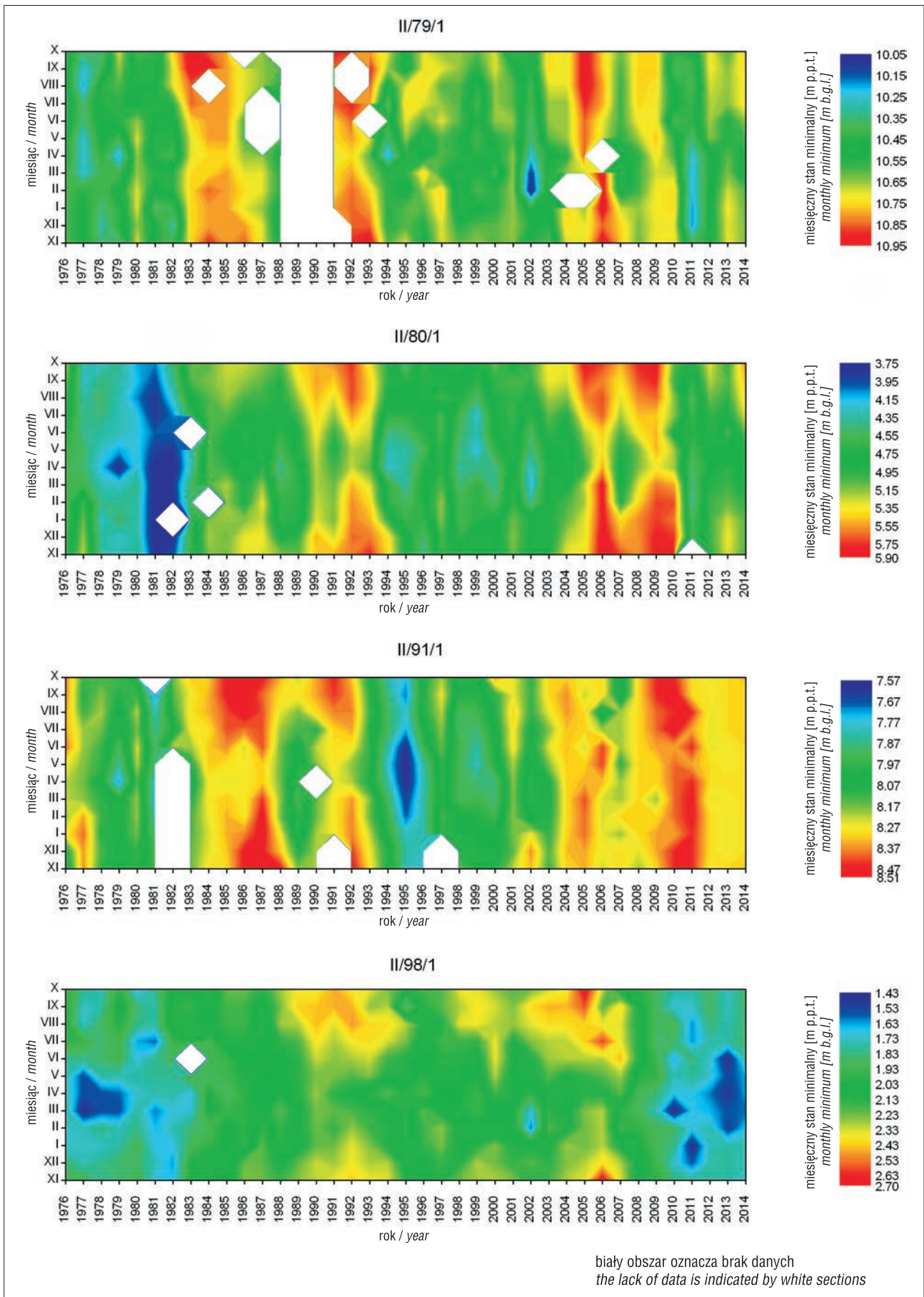
WYNIKI BADAŃ I ICH INTERPRETACJA

Podstawowe charakterystyki zmiennych umieszczono w tabeli 2. Natomiast na wykresach (ryc. 2) przedstawiono rozkłady wartości minimalnych miesięcznych stanów zwierciadła wody. Są one niezgodne z rozkładem normal-



Ryc. 3. Funkcja autokorelacji dla opóźnień w zakresie od 1 do 450 dla punktów nr II/80/1 i II/98/1. Wartości w pierwszej kolumnie po lewej stronie wykresu to opóźnienie; druga kolumna to wielkość współczynnika autokorelacji; trzecia to błąd standardowy (ocena białego szumu); kolumna pierwsza po prawej stronie wykresu to statystyka testu Q Boxa-Ljunga; druga kolumna to p-value. Rysunek wygenerowano w programie STATISTICA 10

Fig. 3. Autocorrelation function for delays in the range from 1 to 450 for points nr II/80/1 and II/98/1. The values of the first column on the left denote time lag, the second column shows autocorrelation coefficient, the third column indicates the standard error (rating of white noise). The first column on the right is the result of the statistic test Box-Ljung Q and the second column denotes p-value. The chart has been generated using STATISTICA 10

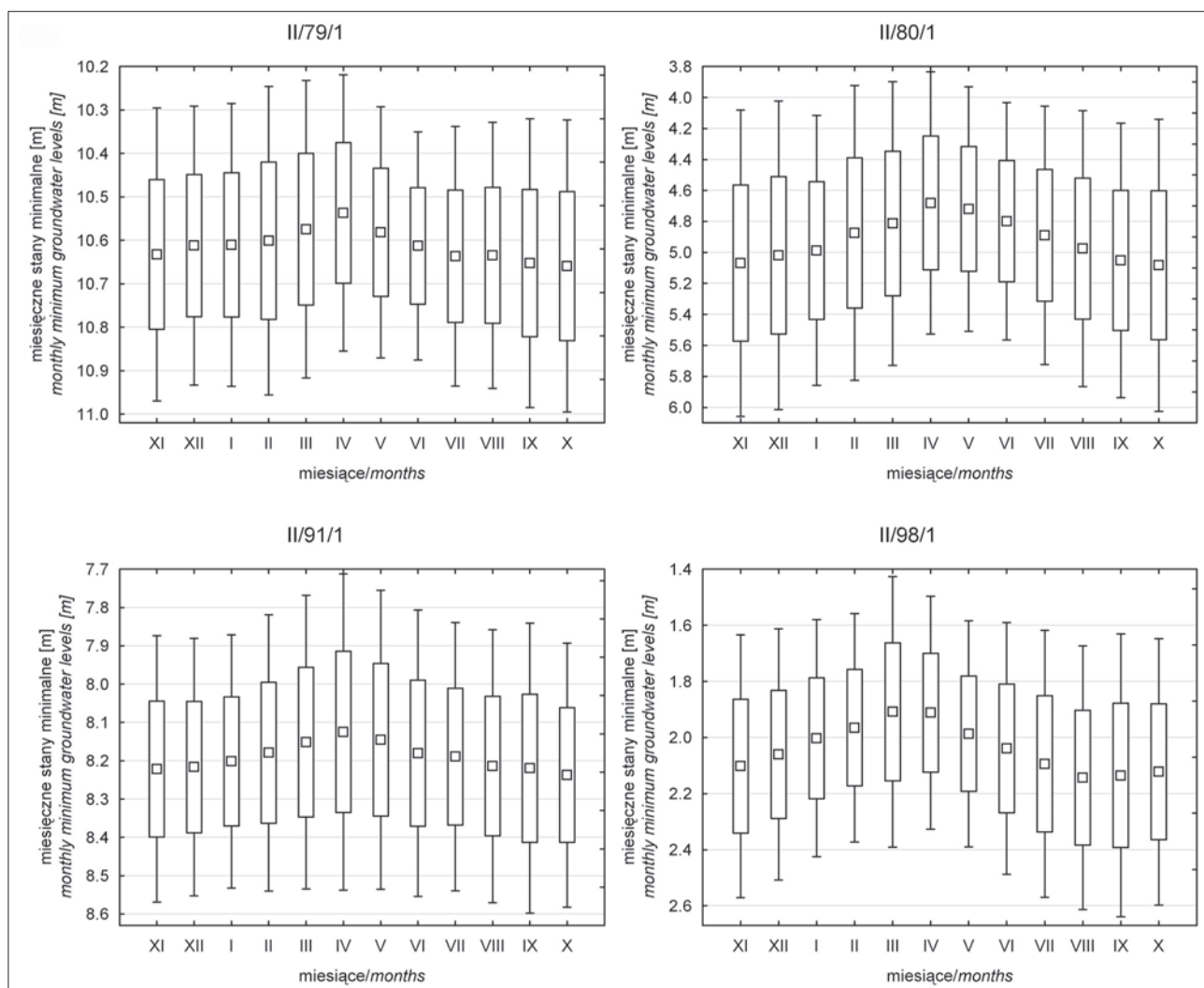


Ryc. 4. Zmienność sezonowa i wieloletnia wartości minimalnej miesięcznej stanu wód podziemnych
Fig. 4. Long-term and seasonal variability of monthly minimum groundwater levels

nym (przeprowadzono testy Shapiro-Wilka i Lilieforsa). Rozkłady wartości z wszystkich analizowanych punktów wykazują skośność lewostronną (tab. 2; ryc. 2). Żeby wykluczyć wpływ doboru konkretnej długości rozpatrywanego wielolecia, podzielono każdy z ciągów na dwa równe „podciągi” i wyliczono w nich skośność. Wartości nadal miały ujemny znak. Wnioskować stąd można o ogólnej tendencji (w analizowanym 39-letnim okresie) przewagi występowania stanów minimalnych miesięcznych niższych od średniej nad stanami minimalnymi miesięcznymi wyższymi od średniej w badanych punktach. Świadczy to o dominacji ilościowej pomiarów z przeważającą składową odpływu wody w stosunku do dni z przeważającą składową dopływu wody do analizowanych punktów. Konoplancew i Siemionow (1979) asymetrię rozkładu ciągów stanów wód podziemnych wyjaśniają rodzajem strefy przyrodniczej, w której są zlokalizowane punkty pomiarowe lub wpływem oddziaływania rzeki. Podają, że na terenie Rosji występują rozległe regiony, dla których jest charakterystyczny ten typ rozkładu. Spośród punktów monitoringowych badanych w pracy punkty znajdujące się najbliżej

rzeki mają największe bezwzględne wartości współczynnika skośności (tab. 1, tab. 2).

Na podstawie wyników funkcji autokorelacji (AFC) stwierdzono, że minimalne miesięczne stany wód podziemnych badanych punktów są silnie skorelowane wewnątrz i charakteryzują się wysokim poziomem inercji ciągów. Statystycznie istotne autokorelacje (p -value $< 0,05$ dla testu Boxa-Ljunga) występują przez cały analizowany okres w przypadku czterech rozważanych szeregów czasowych. Najślabszą autokorelację zanotowano w punkcie nr II/79/1. Punkty nr II/98/1 i I/80/1 zdają się najlepiej i najdłużej „pamiętać” braki lub „nadwyżki” wody w zasilaniu (najwyższe wartości współczynnika autokorelacji) (ryc. 3). Analizując korelogramy, stwierdzono, że – szczególnie w przypadku punktów zlokalizowanych na terenie zlewni Wkry – występuje specyficzna wieloletnia cykliczność stanów minimalnych, chociaż nie jest ona regularna pod względem okresu wahań. Ponadto dla punktów II/80/1 i II/98/1 na wykresach funkcji autokorelacji zaznacza się również bardzo wyraźnie roczna sezonowość szeregów (ryc. 3).



Ryc. 5. Struktura zbiorów miesięcznych stanów minimalnych w wieloleciu 1975–2014. Kwadratem zaznaczono średnią arytmetyczną, rozpiętością prostokąta \pm odchylenie standardowe, rozpiętością „wąsów” \pm 1,96 odchylenia standardowego. Rysunek wygenerowano w programie STATISTICA 10

Fig. 5. Structure of monthly set of minimum groundwater levels in period 1975–2014. The arithmetic mean is indicated by the square the stretch of the rectangle correspondsto \pm standard deviation, the “mustache” indicdicates standard deviation of \pm 1.96. The figure has been generated using STATISTICA 10

Śledząc dynamikę zmian miesięcznych minimalnych stanów wód podziemnych badanych punktów (ryc. 4), można zauważyć wyraźną tendencję do występowania lat z niskimi lub wysokimi minimalnymi stanami wód i skupiania się ich w dłuższe kilkuletnie okresy, co niewątpliwie jest związane z silną wewnętrzną inercją ciągów stwierdzoną wcześniej na korelogramach. Serie lat suchych występują częściej niż wilgotnych i są często w podwójnej sekwencji lub tworzą jedną długą serię z dwoma maksimumami.

Ogólnie można wyróżnić okresy suche przejawiające się ekstremalnie niskimi miesięcznymi stanami wód – są to lata: 1990–1993, 2005–2010, ponadto w przypadku punktów nr II/91/1 i II/79/1 – 1983–1986. Wymienione okresy rozpoczynały się zawsze w drugim półroczu roku hydrologicznego – jesienią, ewentualnie późnym latem lub wczesną zimą. Gdyby porównywać je z latami susz atmosferycznych (Farat i in., 1995, 2007), to można dostrzec, że były one najczęściej poprzedzone lub zbiegały się z latami susz atmosferycznych, obejmujących swym zasięgiem przeważającą część kraju (lata susz atmosferycznych to: 1982, 1983, 1989, 1992, 1994, 2002 i 2005–2006).

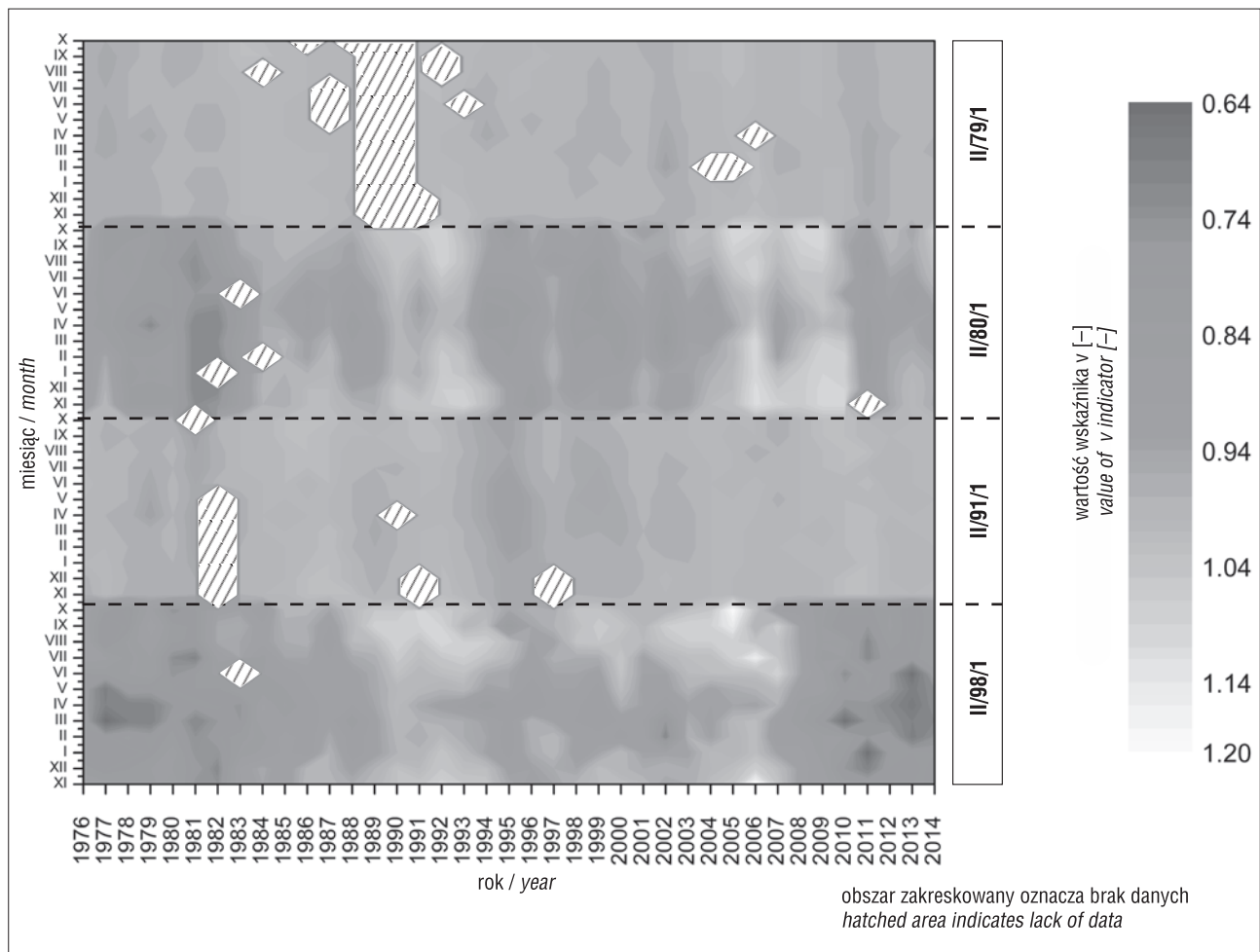
W przypadku punktu II/79/1 dostrzeżono od ok. 2000 r. przesuwanie się terminu pojawiania się najwyższych stanów minimalnych z kwietnia na wcześniejsze miesiące (ryc. 4).

Zmienność wieloletnia zdecydowanie przeważa nad zmiennością sezonową. Chociaż np. w przypadku punktu II/80/1 nawet w latach ekstremalnie suchych (1992, 2006–

2009) w miesiącach wiosennych widać znaczne podniesienie się stanów (ryc. 4).

Z analizy wieloletniej dyspersji stanów minimalnych w poszczególnych miesiącach (ryc. 5) wynika, że sezonowy układ danych odpowiada typowi kontynentalnemu wahania wód podziemnych (Koehne, 1948). Najwyższe stany minimalne miesięczne przypadają na wiosnę (kwiecień, w przypadku punktu II/98/1 – na marzec i kwiecień), a najniższe na jesień (październik i listopad, w przypadku punktu II/98/1 – również sierpień). Najmniejsza dyspersja zbiorów miesięcznych dotyczy dwóch następujących miesięcy po miesiącu najwyższych stanów minimalnych (maj, czerwiec punkty: II/79/1 i II/80/1, a kwietnia i maja – w przypadku punktu II/98/1).

Z analizy obliczonych wartości wskaźnika v wynika, że największe wahania minimum miesięcznego dotyczą punktów II/98/1 i II/80/1, w których zwierciadło wód zalega dość płytko (ryc. 6). Widać również, że 2006 r. był rokiem ekstremalnie niskich miesięcznych wartości stanów wód. Ogólnie w przypadku punktów II/98/1 i II/80/1 w drugim okresie rozpatrywanego wielolecia ekstremalnie niskie stany minimalne miesięczne charakteryzują się większymi względnymi wartościami niż w latach poprzednich. Natomiast punkty II/79/1 i II/91/1, znajdujące się bliżej rzek i posiadające zwierciadło wód na nieco większych głębokościach, mają stany minimalne miesięczne bardziej wyrównane.



Ryc. 6. Zmienność sezonowa i wieloletnia wskaźnika v w wieloleciu 1976–2014

Fig. 6. Long-term and seasonal variability of v indicator in years 1976–2014

WNIOSKI

We wszystkich rozpatrywanych ciągach minimalnych miesięcznych stanów wód podziemnych pierwszego swobodnego poziomu wodonośnego występuje wyraźna zmienność wieloletnia. Dominuje ona znacząco nad rytmem rocznym wahań. Ciągi wykazują bardzo silną autokorelację i inercję wewnętrzną. Zmienność wieloletnia przejawia się w specyficznej nieregularnej cykliczności charakterystycznej dla każdego z punktów pomiarowych. Polega ona na występowaniu na przemian serii lat suchych i mokrych. Okresy ekstremalnie niskich stanów wód występowały zarówno w latach ubiegłego, jak i teraźniejszego wieku analizowanego okresu. Jednak w obecnym wieku były najniższe (2006 r.). Przeprowadzone analizy nie wykazały wyraźnej ogólnej zmiany struktury sezonowej występowania minimalnych miesięcznych stanów w badanym wieloleciu. Chociaż należy zwrócić uwagę, że w przypadku punktu położonego w zlewni Skrzy Prawej (nr II/79/1) zaobserwowano przesunięcie terminu pojawiania się najwyższych stanów minimalnych z kwietnia na wcześniejsze miesiące. Może być to związane z zachodzącymi zmianami klimatycznymi i w pewien sposób nawiązywać do wyników badań innych autorów. Jokiel (2007) analizując zmiany w latach 1951–2000 w strukturze przepływów rzek w środkowej Polsce, zauważył tendencje do skracania "hydrologicznej zimy" oraz do redukcji wysokości i przesuwania się w kierunku zimy terminów „klasycznych” wiosennych wezbrań roztopowych.

LITERATURA

- BARANIECKA M.D. 1990 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Płońsk (447). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- BARANIECKA M.D. 1993 – Objąsnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Płońsk (447). Państw. Inst. Geol., Warszawa
- BOBROWSKA I. 1970 – Kryteria optymalizacji podstawowej sieci obserwacyjnej wód gruntowych w Polsce. Arch. Zakł. Hydrogeol. UW, Warszawa.
- BUCZYŃSKI S., STAŚKO S. & TARKA R. 2005 – Dynamika stanów wód podziemnych na Przedpolu Sudetów na przykładzie stacji w Zebrzydowie. Współczesne Problemy Hydrogeologii, Toruń, 12: 71–76.
- CHELMICKI W. 1991 – Reżim płytkich wód podziemnych w Polsce. UJ. Rozprawy habilitacyjne, 218, Kraków.
- CHELMICKI W. 1993 – The Annual Regime of Shallow Ground-Water Levels in Poland. Ground Water, 31 (3): 383–388.
- DOBKOWSKA A. 2005 – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000 Pierwszy Poziom wodonośny – występowanie i hydrodynamika, ark. Ciechanów (369). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DYNOWSKA I. & PIETRYGOWA Z. 1978 – Wieloletnie fluktuacje zwierciadła wód gruntowych w dorzeczu górnej Wisły. Czasopismo Geograficzne, 49 (2): 169–175.
- FARAT R., KASPROWICZ T. & PIJAWKA I. 2007 – Określenie charakteru współczesnej zmienności klimatu Polski w oparciu o maksymalnie długie, sięgające połowy XIX wieku, jednorodnie serie pomiarów instrumentalnych. Grant IMGW DS.-K2.7, Arch. IMGW, Poznań.
- FARAT R., KĘPIŃSKA-KASPRZAK M., KOWALCZAK P. & MAGER P. 1995 – Susza na obszarze Polski w latach 1951–1990. Materiały Badawcze, Seria Gospodarka Wodna i Ochrona Wód, 16: 59–72. IMGW, Warszawa.
- JOKIEL P. 2007 – Przepływy ekstremalne wybranych rzek środkowej Polski w latach 1951–2000. Acta Univ. Lodz. Folia Geogr. Physica, 8: 99–129.
- KOEHN W. 1948 – Grundwasserkund, Stuttgart.
- KONDRACKI J. 2009 – Geografia regionalna Polski. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- KONOPLACEW A. & SIEMIONOW S. 1979 – Prognozowanie i kartograficzne odwzorowanie reżimu wód gruntowych. Wyd. Geol., Warszawa.
- KOTARBIŃSKI J. 1999 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Sierpc (365) wraz z objaśnieniami. Państw. Inst. Geol., Warszawa
- LICHWA M. & WELNIAK A. 2008 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Ciechanów (369). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MORAWSKI W. 2001 – Objąsnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Nidzica (251). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MORAWSKI W. 2002 – Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1 : 50 000 ark. Nidzica (251). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PASZCZYK J. 1973 – Analiza wahań zwierciadła wód podziemnych w obszarze wschodnim Polski. Prz. Geograf., 45 (3): 599–611.
- PIJEWSKI G. 2011 – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1 : 50 000 Pierwszy poziom wodonośny – występowanie i hydrodynamika ark. Płońsk (447). Państw. Inst. Geol. – PIB, Warszawa.
- SOCZYŃSKA U. (red.) 1990 – Podstawy hydrologii dynamicznej. Wyd. UW, Warszawa.
- TOMALSKI P. 2010 – Sezonowość wahań płytkich wód podziemnych w środkowej Polsce w świetle miar Markhama. [W:] Ciupa T. & Suligowski R. (red.), Woda w badaniach geograficznych. Inst. Geogr. Univ. J. Kochanowskiego, Kielce: 193–202.
- TOMASZEWSKI J. 1990 – Charakter wahań zwierciadła górnego poziomu wód podziemnych. Wyd. UWroc., Wrocław.
- WELNIAK. A. 2008 – Objąsnienia do Szczegółowej mapy geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Ciechanów (369). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WIĘCKOWSKA H. 1960 – Strefowość geograficzna pierwszego horyzontu wód podziemnych. Prz. Geograf., 32 (1/2): 35–61.