

Maciej Lenartowicz, Karolina Zielińska

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych,

Zakład Hydrologii

e-mail: mlenarto@uw.edu.pl

**OCENA WPŁYWU ZMIAN CIŚNIENIA ATMOSFERYCZNEGO NA
WAHANIA ZWIERCIADŁA WÓD PODZIEMNYCH W MAŁEJ
ZLEWNI NIZINNEJ**

**Evaluation of changes in barometric pressure influence on groundwater
level fluctuations in small lowland basin**

Słowa kluczowe: ciśnienie atmosferyczne, zwierciadło wód podziemnych, współczynnik efektywności barometrycznej

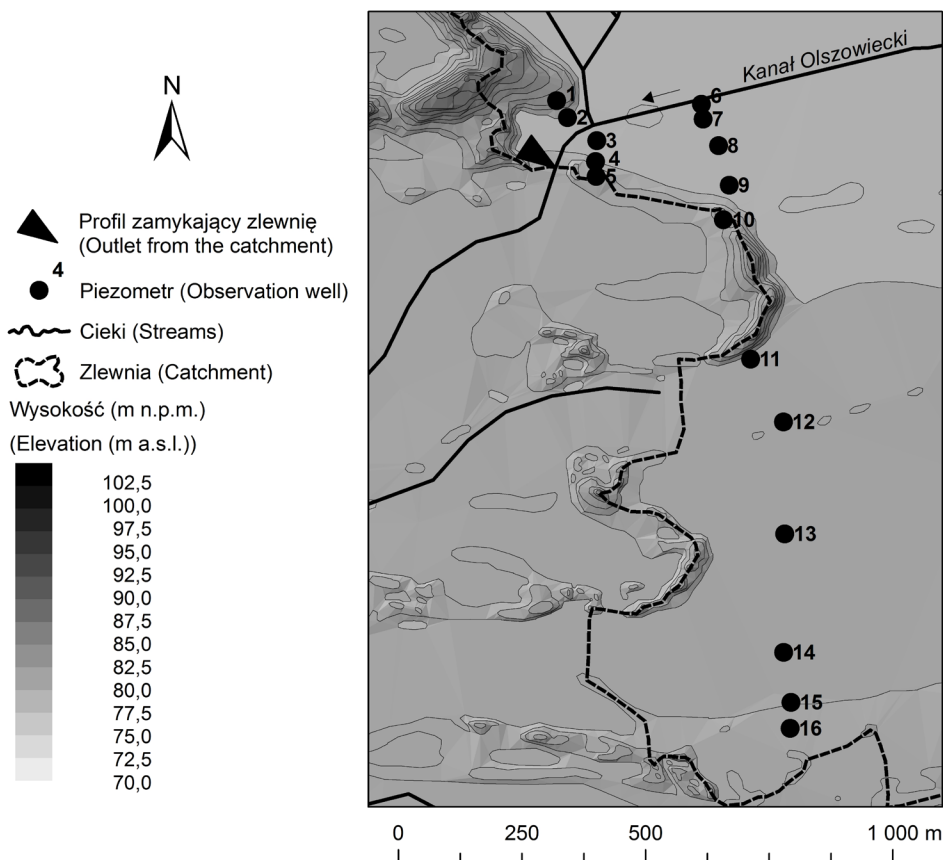
Key words: barometric pressure, groundwater table, barometric efficiency index

WSTĘP

Wielu badaczy zajmowało się wpływem zmian ciśnienia atmosferycznego na wahania stanów wód podziemnych. Jest to zagadnienie złożone, co wynika z faktu, że wpływ ten jest bardzo często zacierany przez np. ewapotranspirację, intensywne opady i infiltrację. Do często cytowanych prac z tego zakresu należą publikacje R. I. Acwortha i T. Braina (2008), G. J. Gonthiera (2007) czy P. W. Hare'a i R. E. Morse'a (1997). W Polsce trudno o nowsze publikacje tego typu. Wyjątek stanowią badania M. Kachnica (2007, 2009) prowadzone w Stacji Bazowej Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Koniczynie. Do oceny wpływu ciśnienia atmosferycznego na wahania zwierciadła wód podziemnych niezbędne są długie ciągi pomiarowe, pozyskiwane w możliwie najkrótszym kroku czasowym (np. godzinowym), które pozwalają na wyodrębnienie takich epizodów, w których relacja pomiędzy zmianami ciśnienia a wahaniami stanów wód podziemnych jest możliwie najmniej zakłócona. Niestety dostęp do takich danych jest ograniczony. Celem badań była weryfikacja hipotezy o istnieniu wpływu ciśnienia atmosferycznego na wahania swobodnego zwierciadła wód podziemnych. Podjęto próbę opisu tego zjawiska w stopniu, na jaki pozwoliła dokładność danych pomiarowych pozyskanych w kroku dobowym.

CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

Badania prowadzono w zlewni górnego biegu Kanału Olszowieckiego leżącej w zachodniej części Kampinoskiego Parku Narodowego. Jest to zlewnia badawcza w ramach programu Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego będąca częścią Stacji Bazowej „Kampinos” (Tylkowski 2014). Zgodnie z założeniami ZMŚP w zlewni prowadzi się obserwacje stanów wód podziemnych (Kostrzewski 1995). Od 1993 r. na stosunkowo niewielkim obszarze (około 2 km²) w pobliżu profilu zamykającego zlewnię badawczą istnieje sieć 16 piezometrów, reprezentujących różne warunki środowiskowe (ryc. 1). Podzielono je na trzy grupy w zależności od średniej głębokości do zwierciadła wody (tab. 1). Są one zlokalizowane na wysokości od 72 do 74,59 m n.p.m. i ujmują jeden horyzont wodonośny o zwierciadle swobodnym w piaskach średnio- i drobnoziarnistych,



Ryc. 1. Lokalizacja piezometrów kontrolujących stan wód podziemnych w Stacji Bazowej ZMŚP „Kampinos”

Fig. 1. Location of piezometers in the Base Station of Integrated Monitoring of the Natural Environment “Kampinos”

który na tym obszarze ma miąższość kilkudziesięciu metrów. Średnia rzędna zwierciadła wody podziemnej jest najwyższa w południowej części zlewni i wynosi 73,0 m n.p.m. a najniższa w dolinie Kanału Olszowieckiego i wynosi 72,2 m n.p.m. Dominuje północny kierunek odpływu wód podziemnych (do rzeki Łasica), który nie jest zgodny z układem lokalnej sieci hydrograficznej. Według badań M. Fica i A. Wierzbickiego (1994) utwory powierzchniowe w zlewni charakteryzuje wysoki współczynnik filtracji K_s od około $50 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ (torfy i mursze) do nawet ponad $600 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ (piaski). Mimo to zasilanie horyzontu wodonośnego wodami infiltracyjnymi szacuje się na około 50 mm rocznie, co wynika ze stosunkowo niskiej średniej rocznej sumy opadu atmosferycznego rzędu 500 mm oraz wysokiej średniej rocznej sumy parowania terenowego przekraczającej 400 mm.

PODSTAWY TEORETYCZNE

Wpływ ciśnienia atmosferycznego na wahania zwierciadła wód podziemnych potwierdza się głównie w artezyjskich warstwach wodonośnych. Reakcja ma charakter „lustrzany”, tzn. wzrost ciśnienia atmosferycznego powoduje obniżenie zwierciadła wody, i odwrotnie. Jednak stosunkowo mała ściślność wody sprawia, że wahania tego zwierciadła nie są zbyt duże (Pazdro, Kozerski 1990).

Stosunek wielkości zmiany stanu wody podziemnej (ΔH) do zmiany ciśnienia atmosferycznego (ΔP) w tym samym czasie został nazwany współczynnikiem efektywności barometrycznej (α) i jest wyrażany następującą zależnością (Acworth, Brain 2008, Gonthier 2007):

$$\alpha = \frac{\Delta H}{\Delta P} \quad \text{lub} \quad \alpha = \frac{\Delta H}{\Delta P} * 100\%$$

gdzie: ΔH – zmiana stanu wody w danym przedziale czasowym (m), ΔP – zmiana ciśnienia atmosferycznego w tym samym czasie (Pa lub $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$).

Jest to współczynnik bezwymiarowy, czasami wyrażany w procentach. Przyjmuje on wartości z przedziału od 0 (brak reakcji) do 1 (całkowita zależność). Maksymalnie α zbliża się do 0,8 a średnio mieści się w zakresie 0,2-0,75 (Hare, Morse 1997).

Współczynnik efektywności barometrycznej α może być także oszacowany na podstawie formuły (Gonthier 2007):

$$\alpha = \frac{\Delta H * \gamma}{\Delta P}$$

gdzie: γ – ciężar właściwy wody ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$).

Mając zbiór wielu przypadków reakcji zwierciadła wód podziemnych na zmiany ciśnienia atmosferycznego, współczynnik efektywności barometrycznej α można oszacować jedną z czterech metod (Davis, Rasmussen 1993, Gonthier 2007):

1. metodą średniej arytmetycznej – dla każdego przypadku określa się indywidualną wartość współczynnika efektywności barometrycznej a następnie z całego zbioru wylicza się średnią arytmetyczną;

Tabela 1. Charakterystyka piezometrów kontrolujących wody podziemne w Stacji Bazowej ZMŚP „Kampinos”
Table 1. Basic characteristics of piezometers in the IMNE Base Station “Kampinos”

Nr No.	Średnia głębokość do zwierciadła wody (cm p.p.t.) Mean depth of ground water level (cm b.t.l.)	WW (cm) HGL (cm)	NW (cm) LGL (cm)	Litologia	Roslinność	Położenie	Udział dni z wodą na powierzchni średnio w roku (%) The % of days with water on the surface, average in year
11	20,8	-27	114	torf (0,8 m) na piaskach	torfowisko niskie	obniżenie terenu	36
6	22,4	-41	104	torf (1,1 m) na piaskach	torfowisko niskie	dolina cieku	24
3	26,3	-42	99	torf (0,4 m) na piaskach	łąka wilgotna	dolina cieku	17
8	27,5	-34	108	torf (0,8 m) na piaskach	ols porzeczkowy	dolina cieku	19
7	33,1	-21	117	torf (0,9 m) na piaskach	łozowisko	dolina cieku	13
9	39,0	-16	127	torf (0,6 m) na piaskach	torfowisko niskie	dolina cieku	6
2	39,7	-28	114	piaski przewarstwione torfem	łąka wilgotna	dolina cieku	12
12	51,9	-7	152	torf (0,2 m) na piaskach	szuwały właściwe	kotlina	0
15	57,9	-1	154	torf (0,4 m) na piaskach	bór mieszany	kotlina	0
14	59,3	6	161	torf (0,3 m) na piaskach	łąka świeża	kotlina	-
13	63,9	-2	165	torf (0,2 m) na piaskach	łozowisko	kotlina	0
4	107,0	41	174	torf (0,4 m) na piaskach	łąka wilgotna	podnoże wydmy	-
16	147,1	83	252	piaski	bór sosnowy	strefa pod-stokowa	-
10	156,1	108	240	piaski przewarstwione torfem	bór sosnowy	obniżenie	-
5	228,0	160	298	piaski	bór sosnowy	międzywydymowe wydma	-
1	267,2	207	341	piaski	bór sosnowy	stok wydmy	-

2. metodą mediany – wylicza się medianę ze zbioru indywidualnych wartości α , co pozwala ograniczyć wpływ skrajnych wartości;
3. metodą Clarka – polega na przeprowadzeniu testu zgodności kierunku zmian stanu wody i ciśnienia atmosferycznego, kierując się regułą reakcji „lustrzanej”; ich znaki powinny w takich sytuacjach zgadzać się. Znak dodatni przypisuje się wartości ΔH kiedy zwierciadło wody podziemnej podnosi się a wartości ΔP , kiedy następuje spadek ciśnienia. Niezgodność znaków wystąpi więc w przypadku jednoczesnego spadku lub wzrostu. Następnie sumuje się wszystkie zmiany zwierciadła wody oraz zmiany ciśnienia atmosferycznego i na ich podstawie oblicza się współczynnik α ;
4. metodą nachylenia linii trendu – pary wartości opisujące zmiany stanu wody podziemnej oraz ciśnienia atmosferycznego nanosi się w postaci punktów na układ współrzędnych. Na ich podstawie wykreśla się linię trendu (np. metodą najmniejszych kwadratów), której nachylenie odpowiada wartości współczynnika efektywności barometrycznej.

W przypadku wód podziemnych o zwierciadle swobodnym, współczynnik efektywności barometrycznej przyjmuje zazwyczaj wartości bardzo niskie. Część autorów, np. L. J. Turk (1975), E. P. Weeks (1979) twierdzi, że w takich warunkach reakcja zwierciadła wody podziemnej na wahania ciśnienia atmosferycznego jest minimalna lub nie występuje. Część zaś, np. P. W. Hare i R. E. Morse (1997), zauważa taką zależność jednocześnie wskazując na wpływ struktury hydrogeologicznej, porowatości ośrodka wodonośnego, wilgotności gleby i temperatury powietrza. Wyniki badań prowadzonych w Polsce wykazują słaby wpływ zmian ciśnienia atmosferycznego na zmiany stanów wód podziemnych wyrażający się współczynnikiem efektywności barometrycznej $\alpha = 0,11$ (Kachnic 2007, 2009).

ŹRÓDŁA I WYBÓR DANYCH

Pomiary położenia zwierciadła wód podziemnych w sieci 16 piezometrów w zlewni badawczej Stacji Bazowej ZMŚP „Kampinos” (d. „Pożary”) prowadzone są raz na dobę od listopada 1993 r. Do analiz wybrano dane z lat hydrologicznych 1994 – 2009. Na stany wody podziemnej w latach późniejszych miała wpływ działalność bobrów, które pojawiły się w zlewni i dokonały istotnego przekształcenia stosunków wodnych (Lenartowicz i in. 2009). Posterunek meteorologiczny należący do stacji ZMŚP „Kampinos” znajduje się w Granicy, około 2 km na zachód od badanego obszaru (Zintegrowany..., 1999). Niestety, pomiarów ciśnienia atmosferycznego nie prowadzono ani w stacji ZMŚP ani w innych stacjach w KPN. Pobrano zatem dane z ogólnodostępnych baz, pochodzące z najbliższej stacji synoptycznej IMGW Warszawa – Okęcie położonej w odległości około 32 km od zlewni badawczej. Założono, że ciśnienie atmosferyczne w takiej odległości nie powinno znacząco się różnić, szczególnie w przypadku wartości dobowych. Według S.P. Chromowa (1977) poziomy gradient średniej dobowej wartości ciśnienia

atmosferycznego tuż przy powierzchni gruntu wynosi średnio 1-3 hPa na około 100 km.

W celu zgromadzenia odpowiednio długiego i jednorodnego ciągu obserwacji wykorzystano dwa źródła ogólnie dostępnych danych:

- NCDC (ang. *National Climatic Data Center*) (www.ncdc.noaa.gov) – światowa baza klimatologiczna gromadząca dane w ramach działalności NOAA (ang. *National Oceanic and Atmospheric Administration*);
- Ogimet (www.ogimet.com) – hiszpański serwis meteorologiczny działający od 2005 roku, tworzący bazę danych meteorologicznych z całego świata na podstawie informacji rozsyłanych przez WMO.

Opracowano ciąg średnich dobowych wartości ciśnienia atmosferycznego zredukowanego do poziomu morza z lat 1994-2009, przy czym okres 1994-1999 na podstawie NCDC a okres 2000-2009 na podstawie Ogimet. Średnie dobowe wartości ciśnienia atmosferycznego do 2005 r. obliczono z wartości godzinnych, a od 2006 r. z wartości trzygodzinnych. W przypadku braków w danych uwzględniono wartość średniej dobowej ciśnienia atmosferycznego, jeżeli pozyskano ją z co najmniej 4 wartości pomiarowych z danej doby.

Na podstawie najdłuższego dostępnego ciągu danych jednoczesnych z obu baz (27.09.1999-22.06.2002, w sumie 1000 wartości) poddano ocenie ich zgodność. Maksymalna różnica pomiędzy średnią dobową wartością ciśnienia atmosferycznego obliczonego z bazy NCDC i z bazy Ogimet wyniosła 1,2 hPa, a średnia różnica z całego okresu zaledwie 0,01 hPa. Test sumy rang oraz test korelacji rangowej Spearmana na trend potwierdziły również, że cała seria danych jest jednorodna statystycznie.

Wykorzystując zgromadzone serie danych dokonano wstępnej oceny wahań stanów wody podziemnej i ciśnienia atmosferycznego pod kątem ich zmian dobowych. Do dalszych analiz brano pod uwagę obliczone w następujący sposób wartości:

- zmiana ciśnienia atmosferycznego z dnia na dzień: różnica pomiędzy średnim dobowym ciśnieniem atmosferycznym dnia kolejnego i dnia bieżącego:

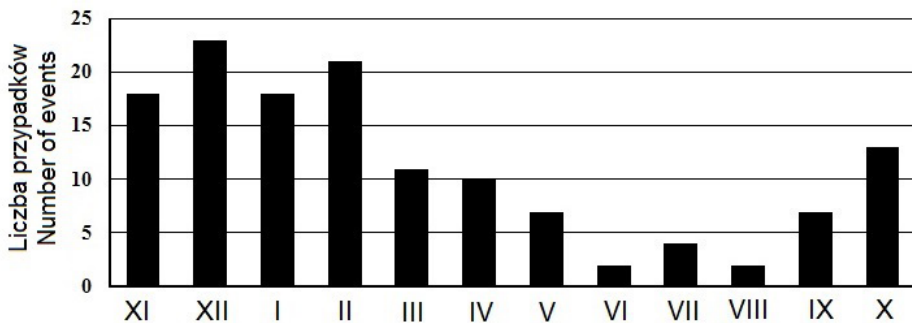
$$\Delta P_i = P_{i+1} - P_i$$

- zmiana stanu wód podziemnych z dnia na dzień: różnica między stanem wód podziemnych zmierzonym danego dnia a stanem w dniu kolejnym:

$$\Delta H_i = H_i - H_{i+1}$$

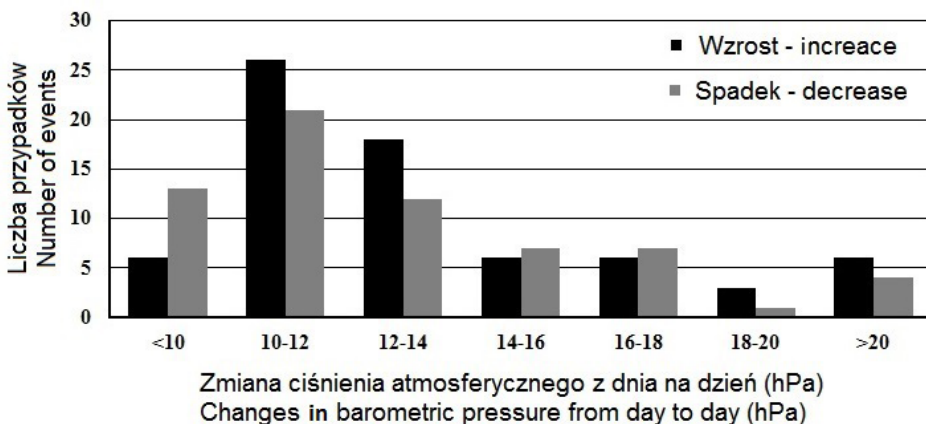
Zakładając istnienie wpływu ciśnienia atmosferycznego na stany wód podziemnych można przypuszczać, że reakcja będzie najbardziej wyraźna przy bardzo dużych zmianach ciśnienia. Z 16 lat hydrologicznych wybrano zatem przypadki, w których stwierdzono duże zmiany dobowe ciśnienia atmosferycznego, a za umowną granicę przyjęto wartość 10 hPa tzn. taką, która może być już wyraźnie odczuwana przez człowieka. Jeżeli w danym miesiącu nie zanotowano takiej zmiany dobowej, wybierano maksymalną, jaka wystąpiła. Zastosowanie tego kryterium pozwoliło wyodrębnić 551 przypadków, które stanowią tylko 9,4% całej bazy danych. Średnio z każdego roku zakwalifikowano po 34 przypadki. Aby wyeliminować

wać wpływ innych czynników, takich jak opad atmosferyczny, ze zbioru danych odrzucono dni, w których wystąpił lub które poprzedzał opad. Łącznie pozostało 136 przypadków, co stanowi 2% całej bazy danych. Większość danych reprezentuje okres zimowy. Tylko 8 przypadków reprezentuje okres letni (czerwiec – sierpień) (ryc. 2). Wybrane dni reprezentują zarówno spadek (65) jak i wzrost ciśnienia atmosferycznego (71). Ponad połowę przypadków stanowią zmiany ciśnienia w granicach 10-14 hPa (ryc. 3). Maksymalna wartość spadku ciśnienia wynosiła 26,5 hPa (16 stycznia 2000 r.), natomiast największy wzrost to 23,5 hPa (25 grudnia 1997 r.).



Ryc. 2. Wybrane największe dobowe zmiany ciśnienia atmosferycznego w latach 1994-2009 według miesiący

Fig. 2. The highest selected diurnal changes in barometric pressure in years 1994-2009 by months



Ryc. 3. Wybrane największe dobowe zmiany ciśnienia atmosferycznego w latach 1994-2009 według ich wielkości (w hPa)

Fig. 3. The highest selected diurnal changes in barometric pressure in years 1994-2009 by magnitude (in hPa)

LUSTRZANA REAKCJA ZWIERCIADŁA WODY NA ZMIANY CIŚNIENIA ATMOSFERYCZNEGO

Poszukiwanie tzw. lustrzanej reakcji zwierciadła wody podziemnej na zmianę ciśnienia atmosferycznego nie jest proste. Oczekiwana reakcja, czyli obniżenie/podniesienie się zwierciadła wody podziemnej towarzyszące odpowiednio wzrostowi/spadkowi ciśnienia atmosferycznego nie zachodzi zawsze identycznie we wszystkich badanych piezometrach.

Z grupy wyłonionych uprzednio 136 przypadków dużej dobowej zmiany ciśnienia atmosferycznego wybrano takie, w których w przynajmniej 1 piezometrze zaobserwowano oczekiwaną reakcję lustrzaną. Otrzymano 83 epizody spełniające ten warunek, z których w tylko 12 stan wód podziemnych zmienił się w tym samym kierunku dokładnie we wszystkich 16 piezometrach. Postanowiono rozszerzyć zbiór danych i wybrano dodatkowo przypadki, w których zwierciadło wody zmienia się w tym samym kierunku we wszystkich piezometrach lub w części z nich pozostaje bez zmian. Otrzymano zbiór 54 reakcji, które poddano dalszej analizie.

Piezometry, w których wahania zwierciadła wody podziemnej charakteryzowały się najwyższą współzależnością z wahaniami ciśnienia atmosferycznego są stosunkowo płytkie i położone w zatorfionym obniżeniu (13, 14, 15), ale też należą do nich głębsze stanowiska w zagłębieniu międzywydmowym (10) czy pod stokiem wysoczyzny (16). W większości z nich na 136 badanych znaczących dobowych zmian ciśnienia w ponad 80 przypadkach zaobserwowano zmianę stanu wody. Udział reakcji lustrzanych to około 60%. Ze wszystkich stanowisk wyróżnia się piezometr pod stokiem wysoczyzny (16) o głębokości do wody około 1,50 m, w którym udział takich reakcji stanowi 65% wszystkich badanych zmian (tab. 2). W dwóch piezometrach w wydmach, w których zwierciadło wody jest średnio na głębokości powyżej 2 m, udział reakcji lustrzanych wynosi poniżej 50%. Można wnioskować, że mogą być one przypadkowe.

Na tym poziomie uporządkowania danych współczynnik korelacji liniowej Pearsona pomiędzy zmianami dobowymi ciśnienia atmosferycznego i stanów wód podziemnych jest wysoki, osiągając wartości od -0,7 do -0,8 (tab. 3). Najślabszą zależność wystąpiła w znajdującym się w zatorfionym zagłębieniu najpłytszym piezometrze (11), w którym zwierciadło wody podziemnej jest najbardziej stabilne.

W zbiorze 54 możliwych reakcji lustrzanych jest tylko 16 zanotowanych podczas spadku ciśnienia atmosferycznego, co utrudnia porównanie intensywności wahań stanów wody przy spadku i wzroście ciśnienia. Spadek ciśnienia atmosferycznego częściej generuje oczekiwaną reakcję zwierciadła wody. Na 16 przypadków w piezometrach najgłębszych reakcja zaszła 10-11 razy, w najpłytszych 11-12 razy, a w pozostałych maksymalnie 15 razy. Poszczególne piezometry reagują zatem w 63-94% przypadków na spadek ciśnienia atmosferycznego i tylko w 45-79% przypadków na jego wzrost.

Tabela 2. Liczba znaczących dobowych zmian stanu wody podziemnej w reakcji na zmianę ciśnienia atmosferycznego i udział reakcji lustrzanych w 136 wybranych przypadkach według piezometrów w latach 1994-2009

Table 2. Number of significant diurnal changes in groundwater stages induced by barometric pressure changes and the percentage of mirror reactions in 136 selected events in years 1994-2009 by piezometer

Nr piezometru <i>No of piezometer</i>	11	6	3	8	7	9	2	12	15	14	13	4	16	10	5	1
Liczba zmian ogółem <i>Number of changes, total</i>	62	82	86	82	84	81	86	85	87	92	92	85	89	79	83	79
Udział reakcji lustrzanych <i>Share of mirror reactions (%)</i>	58	55	58	60	56	60	59	54	62	59	58	61	65	56	49	49

Ponownie zwierciadło wody podziemnej w piezometrze pod stokiem wysoczyzny (16) okazuje się być najbardziej podatne na występowanie reakcji lustrzanych. Zarówno podczas spadku, jak i wzrostu ciśnienia, oczekiwana reakcja zwierciadła wody zachodzi częściej niż w pozostałych piezometrach (tab. 3). Należy także zwrócić uwagę na piezometr położony w zagłębieniu z torfami (15), w którym zwierciadło wody podziemnej zdecydowanie najczęściej w porównaniu z innymi stanowiskami reaguje na wzrost ciśnienia atmosferycznego.

Rozmiary wahań zwierciadła wody w wyniku badanych reakcji nie są zbyt duże. Najczęściej osiągają wartość 1 cm, co jest wynikiem na granicy błędu pomiaru. Na podstawie zbioru reakcji lustrzanych stwierdza się wyższe wartości wahań zwierciadła wody podziemnej podczas spadku ciśnienia atmosferycznego. Maksymalna zmiana dobową wyniosła w takich sytuacjach 9-10 cm w piezometrach, w których zwierciadło wody jest czułe na zmiany ciśnienia atmosferycznego (13-16). Najgłębsze piezometry w wydmach charakteryzują wartości 2-3 krotnie mniejsze. W tych samych piezometrach podczas wzrostu ciśnienia atmosferycznego zwierciadło wody podziemnej opadło maksymalnie o 5 cm a w najgłębszych tylko o 2 cm.

WSPÓŁCZYNNIK EFEKTYWNOŚCI BAROMETRYCZNEJ

Do oceny siły oddziaływania ciśnienia atmosferycznego na wahania zwierciadła wody w piezometrach posłużono się współczynnikiem efektywności barometrycznej α . Jego wartość oszacowano czterema metodami: średniej arytmetycznej, mediany, Clarka oraz nachylenia linii trendu. W tym celu wykorzystano wybrane 54 przypadki reakcji „lustrzanej”. Uzyskane wyniki obliczeń świadczą o stosunkowo małej efektywności barometrycznej w badanych stanowiskach, chociaż można zaobserwować znaczące jej zróżnicowanie pomiędzy piezometrami (tab. 4).

Zastosowanie do obliczeń metody mediany daje obniżone wartości współczynnika efektywności barometrycznej, które nie przekraczają 10% i w większości stanowisk są podobne. Tylko naj płytszy i najgłębszy piezometr charakteryzują inne wartości. Zarówno metoda Clarka jak i średniej arytmetycznej daje identyczne wyniki. Natomiast metoda nachylenia linii trendu daje wartości nieco wyższe.

Wyniki obliczeń współczynnika efektywności barometrycznej wskazują, że zwierciadło wody podziemnej w piezometrze zlokalizowanym w zatorfionych łąkach w obniżeniu terenu (14) charakteryzuje się największą czułością wynoszącą, w zależności od metody 9-16%. Poza nim na szczególną uwagę zasługują także wspomniane już piezometry położone w zatorfionym obniżeniu (13, 15), piezometr pod stokiem wysoczyzny (16) oraz nie wyróżniający się do tej pory płytki piezometr w dolinie Kanalu Olszowieckiego (9). Dwa stanowiska, które już we wcześniejszych analizach ujawniały słabszą reakcję zwierciadła wody podziemnej na zmiany ciśnienia atmosferycznego wyróżniają się najniższymi wartościami współczynnika α . Są to: najpłytszy piezometr na torfowisku niskim (11) oraz najgłębszy piezometr na wydmie (1).

Tabela 4. Współczynnik efektywności barometrycznej obliczony 4 metodami (%)
Table 4. Barometric efficiency (%) estimated using 4 methods

Nr piezometru <i>No of piezometer</i>	11	6	3	8	7	9	2	12	15	14	13	4	16	10	5	1
Metoda średniej arytmetycznej <i>Arithmetic mean method</i>	6	9	8	9	8	10	8	9	13	14	12	8	12	8	7	6
Metoda mediany <i>Median method</i>	4	8	8	8	8	9	8	8	9	9	9	8	9	8	6	6
Metoda Clarka <i>Clark's method</i>	6	8	8	9	8	10	8	9	13	14	12	8	13	9	7	6
Metoda linii trendu <i>Trend line method</i>	7	9	9	10	9	11	8	10	14	16	13	8	15	11	7	6

Jak już wspomniano, spadkowi ciśnienia atmosferycznego towarzyszą większe wahania zwierciadła wody, co pozwala domyślać się, że współczynnik efektywności barometrycznej musi uzyskiwać wtedy większe wartości. W takich sytuacjach współczynnik α jest rzeczywiście o kilka punktów procentowych wyższy i zazwyczaj jest to różnica przekraczająca 10% (tab. 5). Maksymalna różnica pomiędzy reakcją podczas spadku i wzrostu ciśnienia z dnia na dzień pojawia się w stanowiskach, gdzie zwierciadło wody podziemnej jest najbardziej czułe na takie wahania. W opisywanych już piezometrach 13-16 prawdopodobny jest wzrost stanu wody podziemnej o 15-20% wielkości spadku ciśnienia, podczas gdy jego wzrost może potencjalnie skutkować obniżeniem się zwierciadła wody o maksymalnie 10-11% tej wartości. Podczas wzrostu ciśnienia atmosferycznego piezometry: najpłytszy (11) oraz najgłębszy (1) ponownie wykazują minimalną reakcję. Oznacza to, że wpływ ciśnienia atmosferycznego na zwierciadło wody podziemnej w tych stanowiskach nie jest istotny.

Podjęto próbę oceny czy wielkość reakcji wód podziemnych na dobową zmianę ciśnienia atmosferycznego zależy od strefy stanów w jakiej znajduje się zwierciadło wody. W tym celu wybrano cztery piezometry: dwa wykazujące najbardziej wyraźną reakcję zwierciadła wody podziemnej na zmiany ciśnienia atmosferycznego (14 i 16) oraz dwa o najsłabszej reakcji (11 i 1). Analizy dokonano na podstawie reakcji lustrzanych, które wystąpiły po 136 wyróżnionych przypadkach istotnych dobowych zmian ciśnienia atmosferycznego. Granice stref stanów (tab. 6) obliczono wykorzystując formuły stosowane w przypadku wód powierzchniowych (Bajkiewicz-Grabowska, Mikulski, 1999). Reakcje zwierciadła wody podziemnej analizowano następnie w ramach wyznaczonych stref (tab. 7).

Analiza zachowania zwierciadła wody podziemnej w czasie trwania wysokich, średnich czy niskich stanów w stanowiskach, w których jest ono najbardziej wrażliwe na zmiany ciśnienia atmosferycznego (14 i 16) wykazuje, że najwyższe wartości współczynników efektywności barometrycznej odpowiadają strefie stanów wysokich (tab. 7). Maksymalna wartość współczynnika α z całej grupy reakcji lustrzanych wyniosła 78% i odpowiadała strefie wysokich stanów wód podziemnych w piezometrze 14 (zatorfiona łąka). Zwraca uwagę fakt, że odnosząc współczynnik α do głębokości występowania zwierciadła wody podziemnej jego najmniejsze wartości odpowiadają w obu piezometrach głębokości pomiędzy 120 a 160 cm p.p.t.

W stanowisku płytkim w torfowisku (11) w czasie trwania stanów wysokich zwierciadło wody podziemnej jest bardzo stabilne, a dobową zmianę ciśnienia atmosferycznego sporadycznie wywołuje jego zmianę. Współczynnik efektywności barometrycznej jest najwyższy w czasie trwania stanów niskich, a jego maksymalna wartość sięga nawet 40%. W najgłębszym stanowisku na wydmie (1) ze względu na niewielką liczbę zarejestrowanych przypadków wyniki obliczeń nie są reprezentatywne, niemniej maksymalne wartości α odpowiadają strefie stanów wysokich.

Tabela 5. Współczynnik efektywności barometrycznej (%) podczas spadku oraz wzrostu ciśnienia atmosferycznego z dnia na dzień w 54 przypadkach w latach 1994-2009
Table 5. Barometric efficiency (%) during decrease and increase of barometric pressure from day to day in 54 selected events in years 1994-2009

Nr piezometru <i>No of piezometer</i>	11	6	3	8	7	9	2	12	15	14	13	4	16	10	5	1	
Podczas spadku ciśnienia atmosferycznego z dnia na dzień <i>During decrease of barometric pressure from day to day</i>																	
Metoda średniej arytmetycznej <i>Arithmetic mean method</i>	10	11	9	11	10	10	13	16	17	19	18	10	18	13	8	8	
Metoda mediany <i>Median method</i>	7	10	7	8	9	9	14	14	15	15	15	8	14	10	5	6	
Metoda Clarka <i>Clark's method</i>	10	11	10	11	11	10	13	15	19	20	18	10	19	13	8	8	
Metoda linii trendu <i>Method of trend line</i>	10	11	13	11	14	10	10	4	30	28	11	12	23	14	10	11	
Podczas wzrostu ciśnienia atmosferycznego z dnia na dzień <i>During increase of barometric pressure from day to day</i>																	
Metoda średniej arytmetycznej <i>Methods of arithmetic mean</i>	4	8	8	8	7	7	8	6	11	11	10	7	10	6	7	5	
Metoda mediany <i>Median method</i>	0	8	8	8	7	8	9	7	9	8	8	7	9	8	6	5	
Metoda Clarka <i>Clark's method</i>	4	7	8	8	7	6	8	6	10	11	9	7	10	7	7	5	
Metoda linii trendu <i>Trend line method</i>	1	2	6	4	2	1	7	3	5	2	1	1	6	13	1	1	

Tabela 6. Granice strefy stanów średnich wód podziemnych w wybranych piezometrach w latach 1994-2009 (cm p.p.t.)

Table 6. Groundwater level zones in selected piezometers in years 1994-2009 (water level in cm b.t.l.)

Nr piezometru	1	11	14	16
Górna granica strefy stanów wysokich <i>Upper limit of high groundwater level zone</i>	206	-27	6	83
Górna granica strefy stanów średnich <i>Upper limit of mean groundwater level zone</i>	243	-3	35	125
Dolna granica strefy stanów średnich <i>Lower limit of mean groundwater level zone</i>	288	38	79	171
Dolna granica strefy stanów niskich <i>Lower limit of low groundwater level zone</i>	341	114	161	252
Głębokość całkowita piezometru (cm) <i>Total depth of piezometer (cm)</i>	450	250	240	330

Tabela 7. Współczynnik efektywności barometrycznej (%) w czasie reakcji lustrzanych w poszczególnych strefach stanów wód podziemnych obliczony metodą mediany

Table 7. Barometric efficiency (%) during mirror reaction within three groundwater level zones estimated using median method

Nr piezometru i jego charakterystyka <i>No of piezometer and their characteristics</i>	Strefa stanów wysokich <i>High groundwater level zone</i>	Strefa stanów średnich <i>Mean groundwater level zone</i>	Strefa stanów niskich <i>Low groundwater level zone</i>
11 – naj płytsze stanowisko <i>the shallowest site</i>	7,0	8,6	12
1 – naj głębsze stanowisko <i>the deepest site</i>	16,2	8,8	13,1
14 – największe reakcje na zmiany ciśnienia; <i>the biggest reactions to barometric changes</i>	14,3	13,1	12,3

WNIOSKI

W badanej zlewni trudno jednoznacznie potwierdzić wpływ zmian ciśnienia atmosferycznego na wahania zwierciadła wód podziemnych. Wysokie dobowe zmiany ciśnienia atmosferycznego (powyżej 10 hPa) generują maksymalnie w 68% przypadków wyraźną reakcję stanu wody podziemnej. Reakcje lustrzane stanowią 49-65% wszystkich dobowych zmian stanów wody. Towarzyszą im zazwyczaj niewielkie wahania zwierciadła wody podziemnej; są one jednak 2-3 krotnie większe podczas spadków niż podczas wzrostu ciśnienia atmosferycznego.

Zastosowanie czterech metod wyznaczania współczynnika efektywności barometrycznej (α) pozwala stwierdzić, że przyjmuje on w badanej zlewni wartości z przedziału 4-16%, co jest zgodne z wynikami innych autorów. Z drugiej strony metody te dają bardzo zróżnicowane wyniki, szczególnie w przypadku oceny wpływu spadku i wzrostu ciśnienia atmosferycznego. Metodę nachylenia linii trendu charakteryzują wyniki znacznie odbiegające od metod mediany i Clarka. Wspomniane rozbieżności utrudniają jednoznaczną ocenę przydatności współczynnika efektywności barometrycznej do opisu reakcji zwierciadła wody na zmiany ciśnienia atmosferycznego.

Największą zależność z ciśnieniem atmosferycznym wykazują stany wody podziemnej w piezometrach o średniej głębokości do zwierciadła wody pomiędzy 50 a 150 cm, położonych w większej odległości od cieku w zatorfionym zagłębieniu (13-15) i pod stokiem wysoczyzny (16). Zmiany stanów wody podziemnej w tych piezometrach są dwukrotnie większe podczas reakcji lustrzanych niż w pozostałych piezometrach. Najmniejszą współzależność z ciśnieniem atmosferycznym wykazują stany wody podziemnej w piezometrach na wydmach o najgłębiej (1 i 5) oraz na torfowisku o najpłycej (11) położonym zwierciadle wody. Wielkość reakcji lustrzanej osiąga w nich wartości na granicy błędu pomiaru. Poza piezometrami, w których zwierciadło wody podziemnej jest najbardziej wrażliwe na zmiany ciśnienia atmosferycznego, występowanie wysokich stanów wód nie wpływało na większą liczbę i rozmiar reakcji na zmiany ciśnienia.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wpływ ciśnienia atmosferycznego na zwierciadło wód podziemnych jest trudny do zidentyfikowania. Z serii danych dobowych obejmujących 16 lat udało się wychwycić jedynie 54 przypadki potencjalnie niezakłóconych reakcji lustrzanych (ok. 1% całej zgromadzonej bazy danych). Wydaje się zatem, że do przyszłych badań należy pozyskiwać dane o znacznie wyższej rozdzielczości czasowej. Pozwoli to na oddzielenie innych, poza ciśnieniem atmosferycznym, czynników mających wpływ na położenie zwierciadła wód podziemnych (np. relacja opad/parowanie czy efekt bocznego dopływu wód).

Literatura

- Acworth R. I., Brain T., 2008, Calculation of barometric efficiency in shallow piezometers using water levels, atmospheric and earth tide data, *Hydrogeology Journal*, 16, 1469-1481.
- Bajkiewicz-Grabowska E., Mikulski Z., 1999, *Hydrologia ogólna*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- Chromow S.P., 1977, *Meteorologia i klimatologia*, PWN, Warszawa.
- Davis D. R., Rasmussen T. C., 1993, A comparison of linear regression with Clark's method for estimating barometric efficiency of Confined Aquifers, *Water Resour. Res.*, vol. 29, nr 6, 1849-1854.
- Fic M., Wierzbicki A., 1994, Organizacja sieci monitoringu wód podziemnych na terenie rezerwatu Pożary w Kampinoskim Parku Narodowym, *Przegląd Geologiczny*, vol. 42, nr 12, 1004-1008.
- Gonthier G. J., 2007, A graphical method for estimation of barometric efficiency from continuous data – concepts and application to a site in the Piedmont, Air Force Plant 6, Marietta, Georgia (<http://pubs.usgs.gov/sir/2007/5111/pdf/sir2007-5111.pdf>) (stan marzec 2015).
- Hare P. W., Morse R. E., 1997, Water-level fluctuations due to barometric pressure changes in an isolated portion of an unconfined aquifer, *Ground Water*, vol. 35, nr 4, 667-671.
- Kachnic M., 2007, Współczynnik efektywności barometrycznej w piezometrze stacji bazowej w Koniczynie k. Torunia. Tom XIII Sympozjum „Współczesne Problemy Hydrogeologii” vol. 3, 539-547.
- Kachnic M., 2009, Ocena współczynnika efektywności barometrycznej z pomocą rejestratora pojemnościowego firmy DATAFLOW. Biul. Państw. Inst. Geol., vol. 436, 195-198.
- Kostrzewski A. (red.), 1995, *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego w Polsce. Propozycje programowe*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
- Lenartowicz M., Olszewski A., Andrzejewska A., 2009, Bobry jako przyczyna zakłóceń monitoringu wód w zlewni ZMŚP „Pożary” [w:] Bochenek W., Kijowska M. (red.) *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie środowiska przyrodniczego w okresie przemian gospodarczych w Polsce*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Szymbark, 69-75.
- Pazdro Z., Kozerski B., 1990, *Hydrogeologia ogólna*, Wyd. Geolog., Warszawa.
- Turk L. J., 1975, Diurnal fluctuations of water tables induced by atmospheric pressure changes, *Journal of Hydrology*, 26, 1-16.
- Tylkowski J., 2014, Stan geoeosystemów Polski w roku 2013 na podstawie badań Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Biała Góra.
- Weeks E. P., 1979, Barometric fluctuations in wells tapping deep unconfined aquifers, *Water Resour. Res.*, vol. 15, nr 5, 1167-1176.
- Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stacja Bazowa „Pożary” w Kampinoskim Parku Narodowym, 1999, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa.
- <http://www.ncdc.noaa.gov> (stan marzec 2015)
- <http://www.ogimet.com/index.phtml.en> (stan marzec 2015)

Summary

This paper presents the results of study on unconfined groundwater table fluctuations induced by barometric pressure changes. Integrated Monitoring of the Natural Environment Programme (IMNE) research catchment located within the Kampinos National Park near Warsaw was selected as the study area. The network of 16 piezometers is located in the research catchment and the groundwater levels have been measured there in diurnal time-step since 1994. Atmospheric pressure data were collected via NCDC and Ogimet services from the nearest Institute of Meteorology and Water Management (IMWM) synoptic station Warsaw - Okęcie. Collected data series covered the period from 1994 to 2009. Events of the greatest daily changes in barometric pressure accompanied by groundwater level response (so-called mirror reaction) were selected in the first step. Barometric efficiency was estimated then on that basis. Also the differences in groundwater level response at the time of increase and decrease in atmospheric pressure and during high and low water levels were analyzed.

It was found that the barometric efficiency in the piezometers varied from 4 to 16%, which was consistent with the results of other authors. Unfortunately, the divergent results, provided by different methods for estimation of barometric efficiency made the interpretation of data more difficult. Piezometers of water level from 50 to 100 cm represented clear response to barometric pressure changes. However, shallower and deeper water levels did not show an expected effect. Most likely those piezometers were controlled by other factors, such as precipitation, evaporation, infiltration or lateral flow. Using of more detailed (e.g. hourly) data series is highly recommended for further investigations.