

Wieloletnia dynamika odpływów charakterystycznych z wybranych zlewni Polski w świetle zmian indeksu NAO

Multiannual dynamics of characteristic runoff from selected Polish river catchments in the light of changes of the NAO index

BEATA STANISŁAWCZYK

Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki
90-139 Łódź, ul. Narutowicza 88; hydro@geo.uni.lodz.pl

Zarys treści. W opracowaniu przeprowadzono analizę współzmienności charakterystycznych odpływów jednostkowych (Wq , Sq , Nq) z wybranych obszaru Polski i natężenia Oscylacji Północnoatlantyckiej, wyrażonego w postaci zimowego indeksu NAO Hurrella. Materiał analityczny stanowiły szeregi przepływów dobowych na 40 posterunkach wodowskazowych, zlokalizowanych na takiej samej liczbie polskich rzek w latach 1951-2010. Siłę współzmienności określono za pomocą współczynników korelacji liniowej Pearsona. Inercję odpływu względem zmian NAO oceniono poprzez współczynnik kroskorelacji, obliczony dla szeregów przesuniętych względem siebie o stały przedział czasu równy 1 rok (indeks NAO Hurrella w danym roku korelowano z charakterystycznymi odpływami jednostkowymi w roku następnym). Statystyczną istotność uzyskanych współczynników korelacji i kroskorelacji każdorazowo zbadano testem t -Studenta (na poziomie $\alpha = 0,05$). Dokonano również oceny wpływu zmian Oscylacji Północnoatlantyckiej na zmienność średniego ważonego odpływu jednostkowego na obszarze Polski (Sq_{wag}).

Słowa kluczowe: Oscylacja Północnoatlantycka, charakterystyczne odpływy jednostkowe, Polska.

Wprowadzenie

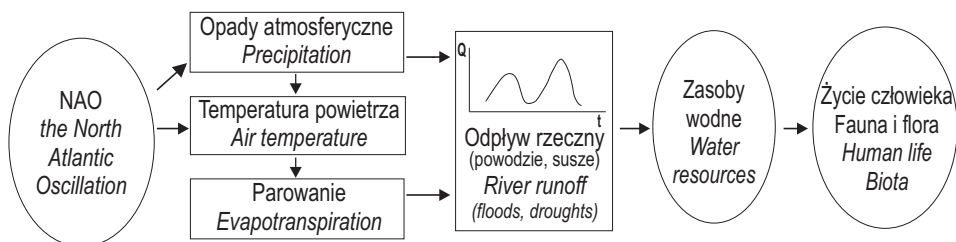
Oscylacja Północnoatlantycka (NAO) – to makroskalowe zjawisko atmosferyczne, które znacząco modyfikuje warunki klimatyczne nad rozległymi obszarami półkuli północnej (Marsz, 2002; Pociask-Karteczka i inni, 2003; Wrześciński, 2010). Rozwój Oscylacji warunkują zmiany wysokości ciśnienia atmosferycznego w dwóch ośrodkach barycznych – Niżu Islandzkim oraz Wyżu Azorskim (Marsz, 2002; Pociask-Karteczka i inni, 2002-2003). Można wyodrębnić dwie fazy NAO (dodatnią i ujemną), które w odmienny sposób wpływają na warunki pogodowe. Dodatnią fazę NAO charakteryzuje synchroniczne występowanie wyższego niż

średnia wieloletnia ciśnienia atmosferycznego w Wyżu Azorskim oraz mniejszego niż średnia wieloletnia ciśnienia w centrum Niżu Islandzkiego. W takim przypadku rośnie gradient baryczny pomiędzy tymi ośrodkami ciśnienia, co sprzyja nasileniu cyrkulacji zachodniej – warunki atmosferyczne na obszarze Europy są wówczas modyfikowane przez ciepłe i wilgotne masy powietrza napływające z południowej części Oceanu Atlantyckiego (Bartnik i Jokiel, 2012; Pociask-Karteczka i inni, 2002-2003). Z kolei, podczas ujemnej fazy NAO występuje większe od średniej wieloletniej ciśnienie w Niżu Islandzkim i mniejsze od średniej wieloletniej ciśnienie w Wyżu Azorskim. W wyniku tego następuje zahamowanie cyrkulacji zachodniej, przy równoczesnym intensywnym rozwoju cyrkulacji południkowej. Nad obszar Europy przemieszczają się wówczas, zwykle suche, masy powietrza przede wszystkim z kierunku północnego, północno-wschodniego lub południowego. Zasięg oddziaływania Oscylacji Północnoatlantyckiej jest na tyle rozległy, że stanowi ona ważny czynnik kształtowania warunków cyrkulacyjnych i klimatycznych w Polsce (Marsz, 2001; Pociask-Karteczka i inni, 2002-2003; Wrzesiński, 2010).

W literaturze przedmiotu większość prac poświęcona jest badaniom wpływu NAO na zmiany i wieloletnią zmienność różnych charakterystyk hydroklimatycznych, w tym na temperaturę powietrza oraz wielkość, częstość i rozkład opadów atmosferycznych (Kozuchowski i Degirmendzić, 2002; Wibig, 2001). Cechy obu tych elementów klimatycznych mają bezpośredni wpływ na wielkość ewapotranspiracji. Z kolei, ewapotranspiracja wraz z opadami atmosferycznymi kształtuje warunki formowania się odpływu rzeczno, a zatem i jego rozmieszczenie w czasie i przestrzeni (Pociask-Karteczka, 2006a). Jednocześnie, zmiany zachodzące w ustroju hydrologicznym rzek prowadzą do modyfikacji wielkości zasobów wodnych, a te są przecież fundamentem życia i gospodarki człowieka, a także zapewniają odpowiednie warunki do prawidłowego funkcjonowania środowiska naturalnego (ryc. 1).

Dotychczasowe badania potwierdzają istotny wpływ NAO na sezonową strukturę odpływu rzeczno, jednak te zależności są przestrzennie zróżnicowane i w poszczególnych regionach na świecie mają odmienny charakter. Niemniej warto zauważyć, że najczęściej NAO oddziałuje na kształtowanie się reżimu odpływu w tych regionach, gdzie zaznacza się wpływ Oscylacji na elementy klimatyczne (Pociask-Karteczka, 2006b). W ostatnich latach powstało także wiele opracowań dotyczących wpływu intensywności NAO na zmiany i zmienność odpływu rzeczno w Polsce. W rezultacie przeprowadzonych badań stwierdzono m.in. istotną korelację pomiędzy Oscylacją Północnoatlantycką i przepływami Warty w Poznaniu (Styszyńska, 2002). Odwrotnie proporcjonalną zależność dostrzeżono również pomiędzy NAO i przepływem wybranych rzek karpaccich (Pociask-Karteczka i inni, 2002-2003). Co więcej, udokumentowano także pewne istotne zależności pomiędzy minimalnymi i maksymalnymi przepływami niektórych rzek karpaccich w chłodnej i cieplej porze roku a indeksem NAO

Hurrella oraz wskaźnikiem SCAND¹ (Pociask-Karteczka i inni, 2003; Pociask-Karteczka, 2006a,b). Stwierdzono również korelację pomiędzy intensywnością NAO a wielkością odpiływu rzecznoego w miesiącach wiosennych. Okazuje się bowiem, że podczas ujemnej fazy Oscylacji, a szczególnie w latach kiedy notuje się ekstremalnie niskie indeksy NAO, w centralnej części Europy – w tym również w Polsce – bardzo często formują się wówczas wysokie wezbrania roztopowe (Bartnik i Jokiel, 2012; Kaczmarek, 2002; Pociask-Karteczka i inni, 2003; Pociask-Karteczka, 2006a,b; Wrześniński, 2010). Jednocześnie, na podstawie badań wpływu NAO na przepływy większych rzek europejskich (w tym także Wisły i Odry) stwierdzono, że intensywność wiosennych wezbrań roztopowych maleje ze wschodu na zachód kontynentu (Kaczmarek, 2002). Przedmiotem analiz była także ocena wpływu NAO na wielkość odpiływu rzecznoego w Polsce w cyklu sezonowym; wpływ ten został potwierdzony (Wrześniński, 2008). Badano również wielkość oraz poziom sezonowości odpiływu rzecznoego w Polsce w różnych fazach Oscylacji Północnoatlantyckiej (Wrześniński, 2010).



Ryc. 1. Uproszczony schemat oddziaływania Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO) na charakterystyki meteorologiczne (opad atmosferyczny, temperatura powietrza, parowanie) oraz odpiływ rzeczny i wielkość zasobów wodnych

Źródło: Pociask-Karteczka (2006a); zmienione.

Simplified scheme for the impact of the North Atlantic Oscillation (NAO) on meteorological characteristics (precipitation, air temperature and evapotranspiration), as well as river runoff and water resources

Source: Pociask-Karteczka (2006a), modified.

Celem opracowania jest zbadanie współzmienności charakterystycznych odpiływów jednostkowych (wysokich, średnich i niskich) ze zlewni na obszarze Polski i natężenia Oscylacji Północnoatlantyckiej, wyrażonego indeksem NAO Hurrella. Miarami tej współzmienności będą współczynniki korelacji liniowej

¹ SCAND – Scandinavia pattern; definiuje układ baryczny, w którym ośrodek wysokiego ciśnienia znajduje się nad Skandynawią, natomiast dwa ośrodki niskiego ciśnienia są zlokalizowane nad zachodnią częścią Europy i wschodnimi obszarami Rosji (Pociask-Karteczka i inni, 2003; www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/scand.shtml - 04.2017).

dla ciągów synchronicznych oraz korelacji krzyżowej (kroskorelacji) dla ciągów przesuniętych o 1 rok (indeks NAO – wcześniej). Szeregami synchronicznymi nazywane są te, których początek datowany jest na ten sam rok. Współmienność mierzona współczynnikiem kroskorelacji prowadzona jest natomiast między ciągami charakterystycznych odpływów jednostkowych w danym roku a indeksem NAO Hurrella z roku poprzedzającego. Przeprowadzone analizy pozwolą zidentyfikować ewentualny porządek przestrzenny siły i kierunków współmienności indeksu NAO i charakterystycznych odpływów jednostkowych oraz wskazać rolę Oscylacji Północnoatlantyckiej w formowaniu odpływów wysokich i niskich. Uogólnienie uzyskanych informacji umożliwi ocenę wpływu NAO na wielkość średniego odpływu jednostkowego w skali całego kraju.

Obszar i metody badań

W analizie uwzględniono 40 posterunków wodowskazowych, zlokalizowanych na takiej samej liczbie rzek Polski (zlewnie autochtoniczne). W badaniach wykorzystano szeregi przepływów dobowych zanotowanych w wybranych przekrojach w wieloleciu 1951-2010, pozyskane z bazy IMiGW-PIB. Długość okresu obserwacji na poszczególnych posterunkach jest jednak zróżnicowana, dlatego serie pomiarowe liczą od 48 do 60 lat (tab. 1). Dane hydrometryczne posłużyły do wyznaczenia odpływów jednostkowych: Wq , Sq , Nq , które obliczono na podstawie przepływów głównych pierwszego stopnia: maksymalnych (WQ), średnich (SQ) oraz minimalnych (NQ).

Analizowane przekroje pomiarowe zostały tak wybrane, aby były rozmieszczone dość równomiernie na terenie Polski (ryc. 2). Równocześnie, przekroje te zamykają zlewnie położone w obrębie różnych regionów fizycznogeograficznych kraju, zatem reprezentują również odmienne warunki kształtowania się reżimu hydrologicznego.

Natężenie zjawiska NAO zostało wyrażone za pomocą indeksu NAO Hurrella, który jest definiowany jako znormalizowana średnia różnica ciśnienia atmosferycznego pomiędzy Lizboną (Portugalia) a Stykkishólmur/Reykjavik (zachodnia Islandia) (Marsz, 2002; Pociask-Karteczka i inni, 2002-2003).

A – powierzchnia zlewni (km^2) / river catchment area (km^2);

WWq – najwyższy wysoki odpływ jednostkowy ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) / maximum specific river runoff ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$);

SSq – średni odpływ jednostkowy ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) / mean specific river runoff ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$);

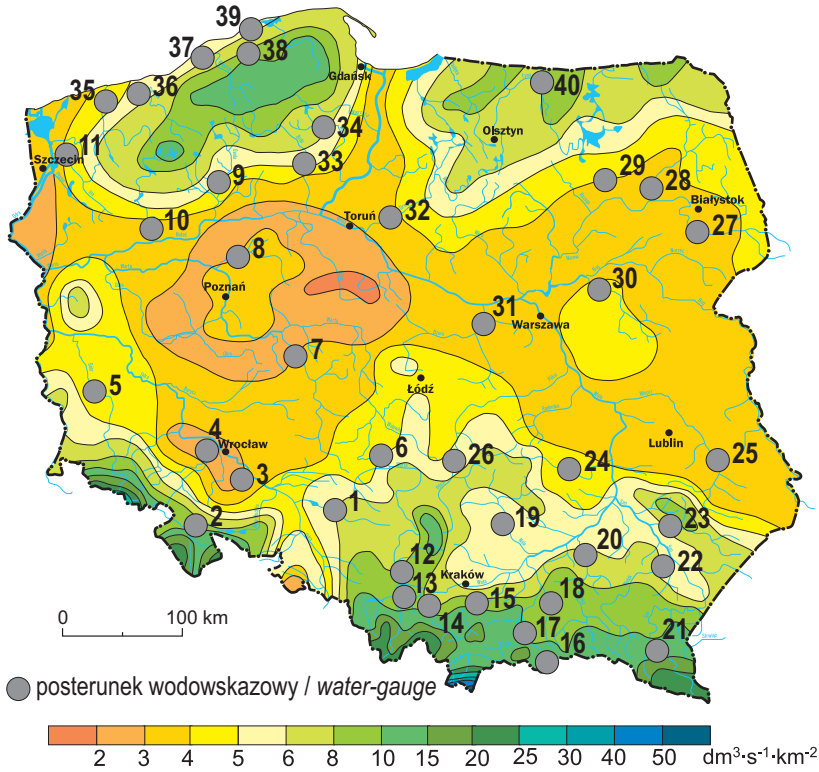
NNq – najniższy niski odpływ jednostkowy ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) / minimum specific river runoff ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$);

^a brak danych w 1992 r. / lack of data in 1992.

Źródło / Source: Roczniki Hydrologiczne Wód Powierzchniowych (dorzecza: Odry i Wisły), 1951-2010, IMGW-PIB, Warszawa.

Tabela 1. Charakterystyczne odpływy jednostkowe z wybranych zlewni Polski
 Characteristic specific river runoff from selected catchments of Polish rivers

Lp. No.	Rzeka <i>River</i>	Wodowskaz <i>Water-gauge</i>	Okres obserwacji <i>Period</i>	A (km ²)	WWq (dm ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	SSq (dm ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	NNq (dm ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)
1	Mała Panew	Staniszczce Wielkie	1956-2010	1 101	216,17	6,95	1,34
2	Nysa Kłodzka	Kłodzko	1951-2010	1 081	641,07	12,00	0,87
3	Oława	Oława	1951-2010	936	57,05	3,74	0,01
4	Bystrzyca	Jarnołtów	1959-2010	1 721	258,57	5,49	0,56
5	Bóbr	Żagań	1953-2010	4 255	199,06	8,93	1,53
6	Warta	Działoszyn	1951-2010	4 094	66,44	6,07	1,65
7	Proсна	Bogusław	1951-2010	4 282	53,71	3,78	0,39
8	Wełna	Pruśce	1951-2006	1 146	32,20	3,02	0,13
9	Gwda	Ptusza	1959-2006	2 052	24,37	5,52	1,05
10	Drawa	Drawiny	1960-2010	3 281	15,54	6,50	2,41
11	Ina	Goleniów	1956-2010	2 138	40,41	6,18	0,91
12	Przemsza	Jeleń	1958-2010	2 006	51,84	9,57	5,08
13	Soła	Oświęcim	1958-2010	1 357	1283,71	15,42	0,61
14	Skawa	Wadowice	1958-2010	833	635,05	15,49	0,83
15	Raba	Proszówki	1956-2010	1 473	828,24	11,60	0,31
16	Poprad	Muszyna	1951-2006	1 519	296,91	11,31	1,32
17	Dunajec	Nowy Sącz	1956-2010	4 337	620,24	15,18	1,38
18	Biała	Koszyce Wielkie	1951-2010	955	650,26	9,31	0,45
19	Nida	Pińczów	1958-2010	3 323	156,18	5,65	0,95
20	Wisłoka ^a	Mielec	1956-2010	3 888	300,93	9,24	0,58
21	San	Lesko	1956-2010	1 617	579,47	17,63	0,16
22	Wisłok	Tryńcza	1957-2010	3 524	276,67	7,99	0,68
23	Tanew	Harasiuki	1958-2006	2 035	116,46	5,94	1,43
24	Kamienna	Kunów	1958-2010	1 110	409,91	5,30	0,58
25	Wieprz	Krasnystaw	1956-2010	3 010	99,67	4,18	1,18
26	Pilica	Przedbórz	1951-2010	2 550	121,96	6,02	1,00
27	Narew	Suraż	1956-2010	3 425	72,99	4,43	0,49
28	Biebrza	Burzyn	1953-2010	6 929	123,68	5,00	0,62
29	Pisa	Ptaki	1959-2006	3 576	24,02	5,78	1,54
30	Liwiec	Łochów	1957-2010	2 471	111,70	4,33	0,47
31	Bzura	Sochaczew	1951-2006	6 258	76,70	3,61	0,38
32	Drwęca	Elgiszewo	1959-2010	5 019	29,87	5,79	1,77
33	Brda	Tuchola	1959-2010	2 477	19,74	7,91	2,97
34	Wda	Czarna Woda	1959-2006	828	20,77	7,64	2,79
35	Rega	Trzebiatów	1959-2010	2 644	36,31	7,81	2,39
36	Parsęta	Bardy	1957-2010	2 885	48,53	9,62	3,43
37	Wieprza	Stary Kraków	1951-2010	1 542	48,70	10,25	3,63
38	Słupia	Słupsk	1956-2010	1 453	38,68	10,88	3,13
39	Łupawa	Smółdzino	1951-2010	807	49,19	10,33	3,90
40	Łyna	Sępól	1959-2010	3 640	44,51	6,74	1,26



Ryc. 2. Rozmieszczenie badanych posterunków wodowskazowych na tle średniego odpływu jednostkowego w Polsce (numery jak w tab. 1)

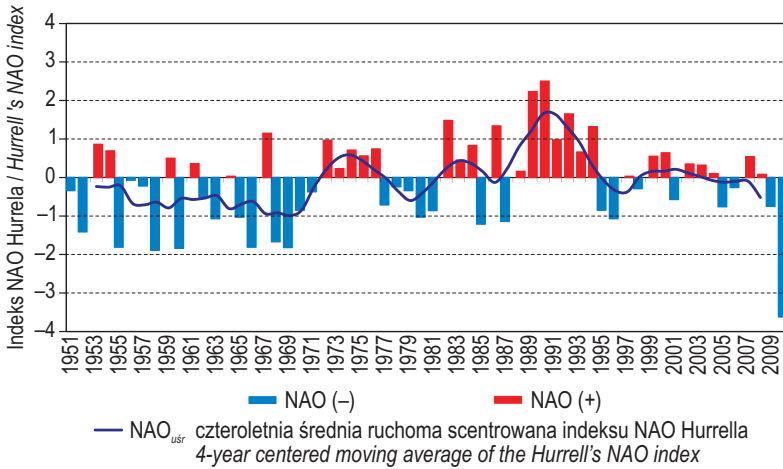
Źródło: Jokiel (2004); zmienione.

Location of the studied water-gauges as set against the mean specific river runoff in Poland (numbering of river catchments as in Table 1)

Source: Jokiel (2004), modified.

Różnica ciśnień jest uśredniana z czterech miesięcy zimowych (od grudnia do marca), dlatego charakterystyka ta jest określana mianem zimowego indeksu NAO Hurrella. Wartości indeksu NAO zaczerpnięto ze strony internetowej: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based> (ryc. 3).

Siłę współzmienności charakterystycznych odpływów jednostkowych (Wq_i , Sq_i , Nq_i) z analizowanych zlewni i indeksu NAO zbadano za pomocą współczynnika korelacji liniowej Pearsona, obliczonego według standardowej formuły (Tomalski i Tomaszewski, 2015):



Ryc. 3. Indeks NAO Hurrella w latach 1951-2010

Values for the Hurrell NAO index in the years 1951-2010

Opracowanie własne na podstawie danych / Author's own work based on:
<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(q_i - q_{sr}) \times (NAO_i - NAO_{sr})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (q_i - q_{sr})^2 \times \sum_{i=1}^N (NAO_i - NAO_{sr})^2}} \quad (1)$$

gdzie:

r – współczynnik korelacji Pearsona;

q_i – odpływ jednostkowy w roku i [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$];

q_{sr} – odpływ jednostkowy średni [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$];

NAO_i – indeks NAO w roku i ;

NAO_{sr} – średni indeks NAO;

N – liczba lat.

Z uwagi na znaczną odległość dzielącą ośrodek powstawania i rozwoju Oscylacji Północnoatlantycznej od Polski, skutki NAO mogą mieć swoje odzwierciedlenie w wielkości odpływu polskich rzek z pewnym opóźnieniem. By zidentyfikować ewentualną inercję i zbadać jej siłę przeprowadzono również analizę współzmienności pomiędzy indeksem NAO Hurrella i charakterystycznymi odpływami jednostkowymi obliczając współczynniki korelacji krzyżowej (kroskorelacji), przy czym szereg indeksu NAO był przesunięty o jeden rok wstecz w stosunku

do szeregów odpływów charakterystycznych (Norcliffe, 1986; Tomalski i Tomaszewski, 2015).

Podjęto również próbę odpowiedzi na pytanie, czy zmiany Oscylacji Północnoatlantyckiej wpływają na zmienność średniego odpływu jednostkowego w skali Polski. W tym celu zbadano stopień współzmienności indeksu NAO i średniego ważonego odpływu jednostkowego z obszaru Polski (Sq_{wag}). Aby wyznaczyć ważony średni odpływ jednostkowy, dla każdego roku obliczono sumę iloczynów średniego odpływu jednostkowego z poszczególnych zlewni oraz ich powierzchni. Następnie, suma ta została podzielona przez łączną powierzchnię wszystkich badanych zlewni. Średni ważony odpływ jednostkowy obliczono według formuły:

$$SQ_{wag} = \frac{\sum_{j=1}^K Sq_j \times A_j}{\sum_{j=1}^K A_j} \quad (2)$$

gdzie:

Sq_{wag} – średni ważony odpływ jednostkowy ze wszystkich zlewni [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$];

Sq_j – średni odpływ jednostkowy ze zlewni j [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$];

A_j – powierzchnia zlewni j [km^2];

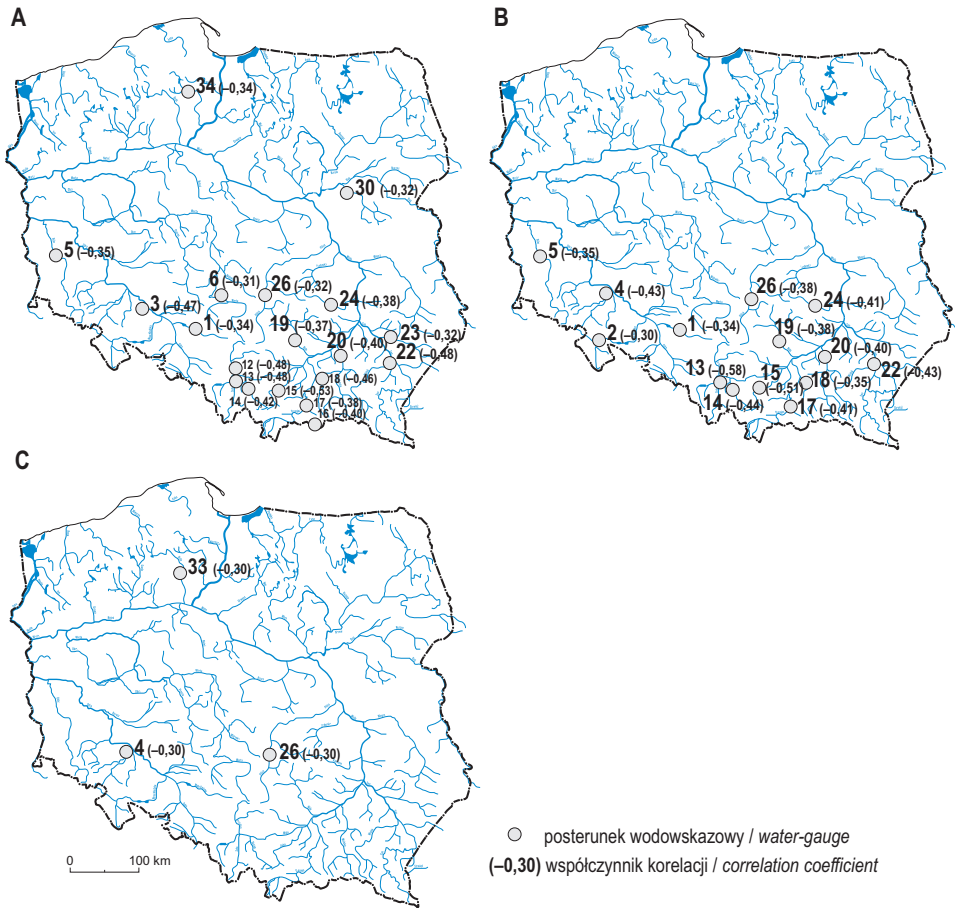
$K=40$ – liczba zlewni.

Statystyczną istotność obliczonych współczynników korelacji i kroskorelacji oceniano każdorazowo testem t -Studenta, przyjmując poziom istotności $\alpha=0,05$. Do analiz statystycznych i konstrukcji diagramów wykorzystano standardowe programy obliczeniowe MsExcel oraz STATISTICA, natomiast materiał graficzny opracowano w programie CorelDRAW.

Wyniki badań

Statystycznie istotne, choć niezbyt wysokie, współczynniki korelacji między wysokimi odpływami jednostkowymi (Wq) a indeksem NAO Hurrella uzyskano dla blisko połowy (19) badanych zlewni (ryc. 4A). W ich rozmieszczeniu zaznacza się wyraźny porządek przestrzenny, bowiem niemal wszystkie te zlewnie znajdują się w południowej części Polski. Należy także podkreślić, iż wszystkie obliczone istotne współczynniki korelacji są ujemne, czyli niskiemu indeksowi NAO Hurrella w danym roku towarzyszą podwyższone Wq i odwrotnie. Wpływ zmian indeksu NAO na dyspersję w szeregach Wq w większości przypadków nie przekracza 25% (maksymalny współczynnik determinacji $r^2=28\%$ dla Raby po wodowskaz Proszówki).

W przypadku 14 analizowanych zlewni obliczone współczynniki korelacji między średnimi odptywami jednostkowymi (S_q) a indeksem NAO Hurrella były także ujemne, niewysokie, choć istotne statystycznie (ryc. 4B). Podobnie jak w przypadku odptywów wysokich, zdecydowana większość zlewni, w których stwierdzono istotną współzmienność, jest położona w południowej części Polski. Co więcej, ponad połowa z nich to zlewnie rzek górskich (Nysa Kłodzka, Bystrzyca, Soła, Skawa, Raba, Dunajec, Biała, Wisłoka, Wisłok). Ujemne współczynniki korelacji wskazują na zależność odwrotnie proporcjonalną (niski indeks NAO

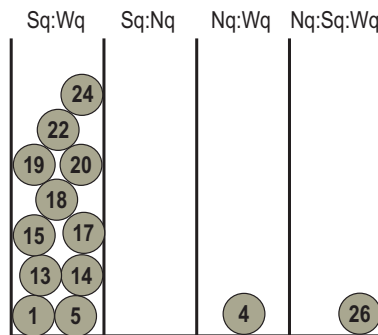


Ryc. 4. Współczynniki korelacji między wysokim (A), średnim (B) i niskim (C) odptywem jednostkowym a indeksem NAO Hurrella (numery zlewni jak w tab. 1)
 Values of coefficients for correlations between maximum (A), mean (B) and minimum (C) specific river runoff and Hurrell's NAO index (with numbering of river catchments as in Table 1)
 Opracowanie własne, podobnie następane ryciny. / Author's own work, as well as other figures.

– wysoki odpływ średni). Współczynniki determinacji (r^2) wynoszą w tej grupie zlewni od 9% do 34%, co wskazuje, że zmienność indeksu NAO wyjaśnia maksymalnie nieco ponad 30% dyspersji S_q .

Zupełnie inaczej kształtuje się współzmiennność niskich odpływów jednostkowych z badanych zlewni i indeksu NAO (ryc. 4C). Statystycznie istotną słabą korelację uzyskano tylko dla 3 zlewni – Oławy, Pilicy oraz Brdy i także potwierdziła ona odwrotnie proporcjonalną zależność. Co więcej, w przeciwieństwie do wysokich oraz średnich odpływów jednostkowych, nie zaznaczają się tutaj prawidłowości regionalne – statystycznie istotne współczynniki korelacji dotyczą zlewni położonych w różnych regionach Polski, o odmiennych warunkach fizycznogeograficznych.

W rozpatrywanym zbiorze znajdują się zlewnie, dla których statystycznie istotne współczynniki korelacji z indeksem NAO Hurrella uzyskano jednocześnie dla więcej niż jednego szeregu charakterystycznych odpływów jednostkowych (ryc. 5). Aż w 11 zlewniach odpływy wysokie i średnie są równocześnie skorelowane z tym indeksem (ponad 1/4 badanych przypadków). Są to w większości zlewnie górskie (głównie karpackie), a także z obszaru Wyżyny Małopolskiej: Kamiennej, Nidy oraz Pilicy. W żadnej z rozpatrywanych zlewni nie występuje jednoczesna statystycznie istotna korelacja średnich i niskich odpływów jednostkowych z indeksem NAO Hurrella. Ujemną i statystycznie istotną współzmiennością ekstremalnych odpływów jednostkowych (N_q , W_q) oraz indeksu NAO Hurrella odznacza się zlewnia Bystrzycy. Należy też wyraźnie podkreślić, że w świetle przeprowadzonych analiz, NAO nie wywiera istotnego wpływu na



Statystycznie istotna korelacja między indeksem NAO Hurrella a: S_q i W_q ; S_q i N_q ; N_q i W_q ; N_q , S_q i W_q
 Statistically significant correlation between Hurrell's NAO index and: S_q and W_q ; S_q and N_q ; N_q and W_q ; N_q , S_q and W_q

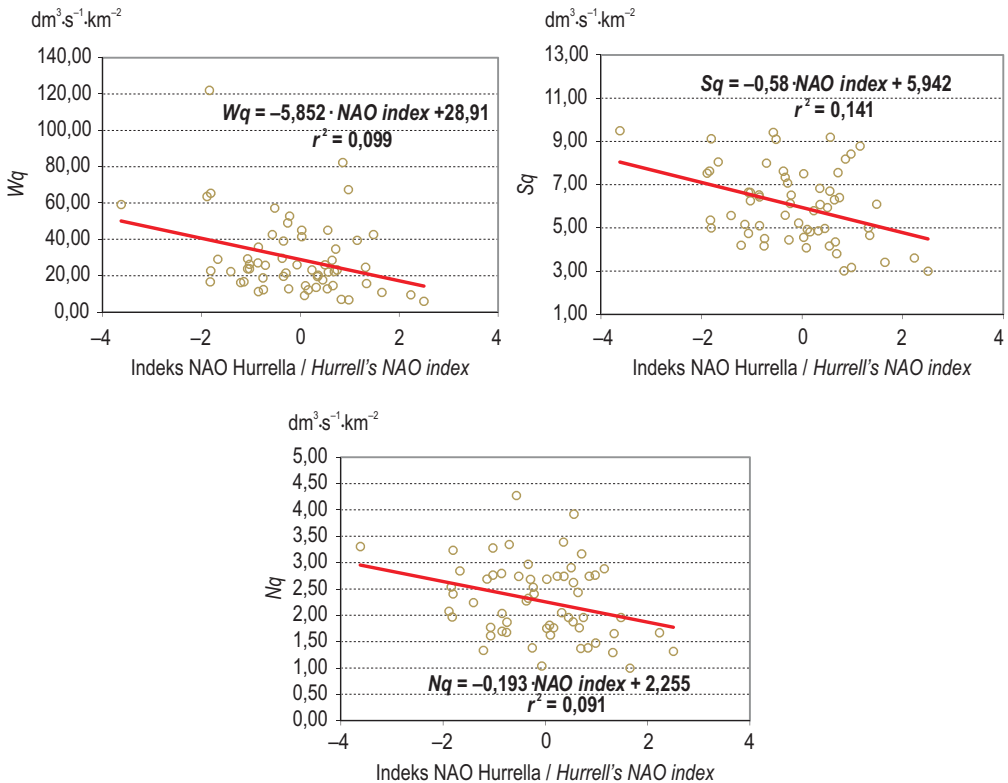
Ryc. 5. Numery zlewni, w których stwierdzono statystycznie istotną korelację między indeksem NAO Hurrella i charakterystycznymi odpływami jednostkowymi W_q , S_q i N_q (numery zlewni jak w tab. 1)

Numbers of river catchments in which a statistically significant correlation between values for Hurrell's NAO index and for W_q , S_q and N_q specific river runoff were to be noted (numbering of river catchments as in Table 1)

odpiływy jednostkowe: wysokie, średnie i niskie w przeważającej części zlewni położonych na terenach nizinnych oraz pojeziernych Polski.

Interesującym przypadkiem w badanym zbiorze wydaje się zlewnia Pilicy, dla której wszystkie analizowane szeregi charakterystycznych odpiływów jednostkowych (Wq , Sq , Nq) wykazały dość słabą, ale statystycznie istotną korelację z indeksem NAO Hurrella (ryc. 6). Zależność jest w każdym przypadku odwrotnie proporcjonalna – im wyższy indeks NAO Hurrella, tym mniejsze odpiływy. Współczynniki determinacji wskazują przy tym, że zmiany indeksu NAO wyjaśniają od 9% (w przypadku Nq) do 14% (Sq) zmienności odpiływu ze zlewni Pilicy.

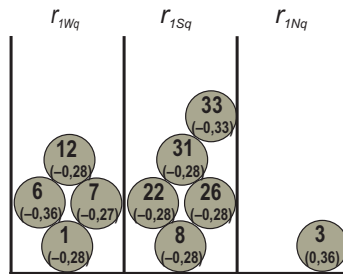
Zbadano także stopień współzmienności charakterystycznych odpiływów jednostkowych z badanymi zlewni i indeksem NAO Hurrella z roku poprzedzającego. W całym zbiorze 120 obliczonych współczynników kroskorelacji (3 szeregi charakterystycznych odpiływów jednostkowych; 40 zlewni) zaledwie 10 było istot-



Ryc. 6. Korelacja i linie regresji między wysokim (Wq), średnim (Sq) i niskim (Nq) odpiływem jednostkowym ze zlewni Pilicy (Przedbórz) a indeksem NAO Hurrella

Correlation and linear regressions characterising maximum (Wq), mean (Sq) and minimum (Nq) values for specific river runoff from the catchment of the Pilica (at Przedbórz) as set against Hurrell's NAO index

nych statystycznie. Co ważne, współczynniki kroskorelacji były znacznie mniejsze od uzyskanych dla szeregów synchronicznych (por. ryc. 4 i 7). Współczynnik korelacji między indeksem NAO Hurrella z danego roku a wysokimi odpływami jednostkowymi w roku następnym jest ujemny i statystycznie istotny w przypadku kilku zlewni wyżynnych: Małej Panwi, Warty, Prosny i Przemszy. Podobne zależności dotyczą indeksu NAO i odpływów średnich ze zlewni: Wełny, Wisłoka, Pilicy, Bzury i Brdy. Połowa zlewni, dla których uzyskano istotną zależność w przypadku korelacji krzyżowej odznacza się jednocześnie statystycznie istotnymi współczynnikami korelacji liniowej między indeksem NAO a odpływami charakterystycznymi (por. ryc. 4 i 7). Na przykład, stwierdzono statystycznie istotną współzmiennność indeksu NAO Hurrella i wysokich odpływów jednostkowych w danym roku, jak i w roku kolejnym, w przypadku zlewni: Małej Panwi, Warty i Przemszy. Podobną prawidłowość można zaobserwować w przypadku średnich odpływów jednostkowych w zlewniach Wisłoka i Pilicy.



Współczynnik kroskorelacji pomiędzy indeksem NAO Hurrella a: Wq, Sq, Nq
 Crosscorrelation between Hurrell's NAO index and: Wq, Sq, Nq
 w nawiasie wielkość współczynnika / value of coefficient in brackets

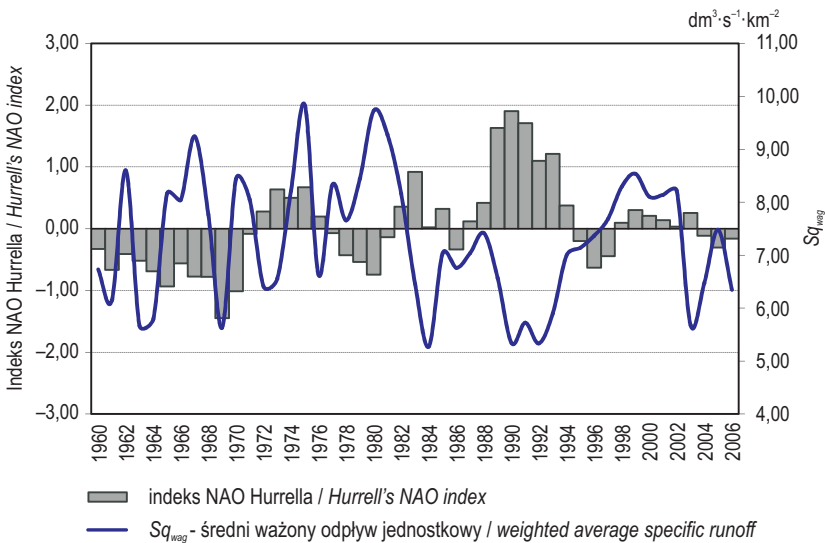
Ryc. 7. Statystycznie istotne współczynniki kroskorelacji między indeksem NAO Hurrella i badanymi charakterystycznymi odpływami jednostkowymi z przesunięciem o 1 rok (r_{1Wq} , r_{1Sq} , r_{1Nq}) (numery zlewni zgodnie z tab. 1)

Statistically significant coefficient values for the cross-correlation between Hurrell's NAO index and studied specific river runoffs with a 1-year shift (r_{1Wq} , r_{1Sq} , r_{1Nq}) (numbering of river catchments as in Table 1)

Biorąc pod uwagę wielkość współczynników kroskorelacji oraz „losowy” rozkład przestrzenny zlewni, w których omawiane wyżej zależności są istotne, należy zauważyć, że związki kroskorelacyjne są wyraźnie słabsze niż korelacyjne. Oznacza to, że tylko w danym roku NAO odgrywa pewną, niewielką rolę w kształtowaniu odpływów wysokich i średnich w południowej Polsce – inercja z roku na rok jest słaba i ma raczej charakter przypadkowy.

Analiza wieloletnich zmian średniego ważonego odpływu jednostkowego Sq_{wag} z obszaru Polski obejmuje okres 1960-2006 (ryc. 8). W tym wieloleciu uwzględnione serie czasowe były kompletne dla wszystkich zlewni. Wydaje się

bowiem zasadne, aby liczba analizowanych zlewni była w każdym roku jednokowa. Wyjątek stanowiła zlewnia Wisłoki, dla której brak danych z 1992 r. – rok ten został pominięty w analizach statystycznych. Średni wieloletni odpływ jednostkowy obliczony jako średnia z rocznych Sq_{wag} wynosi $7,29 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Uzyskany Sq_{wag} różni się zatem od średniego odpływu jednostkowego w Polsce, tj. $5,64 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (Fal i inni, 1997). Należy jednak zaznaczyć, że sumaryczna powierzchnia rozpatrywanych zlewni stanowiła blisko 33% terytorium Polski, zatem z punktu widzenia liczby zlewni oraz ich łącznej powierzchni, próbę można uznać za wystarczającą (Boczarow, 1976).



Ryc. 8. Zmienność średniego ważonego odpływu jednostkowego (Sq_{wag}) w Polsce i indeksu NAO Hurrella w latach 1960-2006

Variability characterising weighted average specific runoff (Sq_{wag}) in Poland and values assumed by Hurrell's NAO index in the years 1960-2010

Współczynnik korelacji między średnim ważonym odpływem jednostkowym z obszaru Polski i indeksem NAO Hurrella wynosi $r = -0,26$ i znajduje się na granicy istotności statystycznej. Warto jednak dostrzec trwające zwykle kilka lat okresy, w których zaznacza się wspomniana wcześniej odwrotna zależność pomiędzy odpływem średnim i indeksem NAO. W latach, w których przeważają indeksy relatywnie wysokie, odpływ średni jest stosunkowo niski i odwrotnie. Prawidłowości takie występują w latach: 1962-1972, 1977-1983, 1984-1998. Ogólnie, w latach 1960-1983 przeważały ujemne indeksy NAO, a średni odpływ jednostkowy z obszaru Polski był stosunkowo wysoki i zróżnicowany. W póź-

niejszym okresie indeksy NAO Hurrella wyraźnie wzrosły, a towarzyszyły temu spadek i mniejsza zmienność odpływu jednostkowego w Polsce.

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiają sformułowanie kilku wniosków oraz dostrzeżenie pewnych prawidłowości.

- Najwięcej istotnych współczynników korelacji liniowej uzyskano pomiędzy indeksem NAO Hurrella a wysokimi i średnimi odpływami jednostkowymi z analizowanych zlewni (odpowiednio 19 i 14 przypadków). Oscylacja Północnoatlantycka bardzo rzadko wywiera natomiast wpływ na wielkość niskich odpływów jednostkowych (3 przypadki).
- Wszystkie statystycznie istotne współczynniki korelacji świadczą o odwrotnej proporcjonalnej zależności między charakterystycznymi odpływami jednostkowymi (Wq , Sq , Nq) i indeksem NAO Hurrella, tj. niskie odpływy przy wysokim indeksie NAO Hurrella w danym roku i odwrotnie; podobną prawidłowość udokumentowano wcześniej w stosunku do niektórych rzek karpaccich (Pociask-Karteczka i inni, 2002-2003).
- Oscylacja Północnoatlantycka wywiera istotny wpływ przede wszystkim na wielkość charakterystycznych odpływów jednostkowych ze zlewni w południowej części Polski. Nie ma koincydencji między indeksem NAO Hurrella a charakterystycznymi odpływami jednostkowymi w przeważającej części zlewni rzek nizinnych i pojeziernych Polski.
- W co czwartej analizowanej zlewni (11 zlewni) jednocześnie wysokie i średnie odpływy są skorelowane w tym samym roku z indeksem NAO Hurrella; można tutaj dostrzec również pewne prawidłowości przestrzenne – są to bowiem przede wszystkim zlewnie rzek górskich (głównie karpaccich), a także zlewnie położone na Wyżynie Małopolskiej;
- Na podstawie rozkładu przestrzennego zlewni, w których wystąpiły statystycznie istotne współczynniki zarówno korelacji, jak i kroskorelacji należy stwierdzić, że Oscylacja Północnoatlantycka jedynie w danym roku wywiera wpływ na kształtowanie Wq , Sq – inercja jest słaba i nie wykazuje żadnych prawidłowości regionalnych.
- Nie stwierdzono istotnego wpływu Oscylacji Północnoatlantyckiej na wielkość średniego ważonego odpływu jednostkowego z obszaru Polski ($r = -0,26$; nieistotny statystycznie), należy jednak zaznaczyć, że w wieloleciu 1960-2010 można wyróżnić okresy, kiedy występuje odwrotnie proporcjonalna zależność między indeksem NAO Hurrella a Sq_{wag} – jest ona szczególnie widoczna w latach 1960-1983, kiedy Sq_{wag} był relatywnie wysoki i zróżnicowany przy ujemnych indeksach NAO Hurrella.

Piśmiennictwo / References

- Bartnik A., Jokieli P., 2012, *Geografia wzebrań i powodzi rzecznych*, Wydawnictwo UŁ, Łódź.
- Boczarow M. K., 1976, *Metody statystyki matematycznej w geografii*, PWN, Warszawa.
- Fal B., Bogdanowicz E., Czernuszenko W., Dobrzyńska I., Koczyńska A., 1997, *Przeptywy charakterystyczne głównych rzek polskich w latach 1951-1990*, Materiały Badawcze IMGW – Seria: Hydrologia i Oceanologia, 21, Warszawa.
- Jokieli P., 2004, *Zasoby wodne środkowej Polski na progu XXI wieku*, Wydawnictwo UŁ, Łódź.
- Kaczmarek Z., 2002, *Wpływ Oscylacji Północnoatlantycznej na przepływy rzek europejskich*, [w:] A.A. Marsz, A. Styszyńska (red.), *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski*, Akademia Morska, Gdynia, s. 163-172.
- Kożuchowski K., Degirmendźić J., 2002, *Wskaźniki cyrkulacji a temperatura powietrza w Polsce*, [w:] A.A. Marsz, A. Styszyńska (red.), *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski*, Akademia Morska, Gdynia, s. 111-128.
- Marsz A.A., 2001, *Stan termiczny Północnego Atlantyku a reżim termiczny zim na polskim wybrzeżu Bałtyku (problem długoterminowej prognozy termiki zim)*, Wyższa Szkoła Morska, Gdynia.
- Marsz A.A., 2002, *Wprowadzenie*, [w:] A.A. Marsz, A. Styszyńska (red.), *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski*, Akademia Morska, Gdynia, s. 11-29.
- Norcliffe G.B., 1986, *Statystyka dla geografów*, PWN, Warszawa.
- Pociask-Karteczka J., 2006a, *River hydrology and the North Atlantic Oscillation: A general review*, *AMBIO*, 35, 6, s. 312-314.
- Pociask-Karteczka J., 2006b, *Regionalne różnicowanie wpływu Oscylacji Północnoatlantycznej na reżim rzek*, [w:] J. Trepińska, Z. Olecki (red.), *Klimatyczne aspekty środowiska geograficznego*, IGIIP UJ, Kraków, s. 261-269.
- Pociask-Karteczka J., Limanówka D., Nieckarz Z., 2002-2003, *Wpływ Oscylacji Północnoatlantycznej na przepływy rzek karpaccich (1951-2000)*, *Folia Geographica – Series Geographica Physica*, 33-34, s. 89-104.
- Pociask-Karteczka J., Nieckarz Z., Limanówka D., 2003, *Prediction of hydrological extremes by air circulation indices*, [w:] *Water Resources Systems – Water Availability and Global Change*, IAHS Publications, 280, s. 134-141.
- Roczniki hydrologiczne wód powierzchniowych (dorzecza: Odry i Wisły) 1951-2010, Wydawnictwo IMGW, Warszawa.
- Styszyńska A., 2002, *Związki między przepływem warty w Poznaniu a zimowymi wskaźnikami NAO w okresie 1865-2000*, [w:] A.A. Marsz, A. Styszyńska (red.), *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski*, Akademia Morska, Gdynia, s. 173-180.
- Tomalski P., Tomaszewski E., 2015, *Metody, formuły i wzory obliczeniowe stosowane w pracy*, [w:] P. Jokieli (red.), *Metody statystyczne w badaniach hydrologicznych środkowej Polski*, Wydawnictwo UŁ, Łódź, s. 215-271.
- Wibig J., 2001, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na rozkład przestrzenny anomalii temperatury i opadów w Europie*, Wydawnictwo UŁ, Łódź.
- Wrzeński D., 2008, *Impact of the North Atlantic Oscillation on river runoff in Poland*, IWRA, 13th World Water Congress Montpellier, France, 1-4 September 2008; http://wwc2008.msem.univ-montp2.fr/resource/authors/abs217_article.pdf.

Wrześniński D., 2010, *Odptyw rzek w Polsce w różnych fazach Oscylacji Północnoatlantycznej*, Badania Fizjograficzne, Seria A – Geografia Fizyczna, 61, s. 129-144.
<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based> (02.2016).

[Wpłynęło: wrzesień 2016; poprawiono: kwiecień 2017 r.]

BEATA STANISŁAWCZYK

MULTIANNUAL DYNAMICS OF CHARACTERISTIC RUNOFF FROM SELECTED
POLISH RIVER CATCHMENTS
IN THE LIGHT OF CHANGES IN THE NAO INDEX

The work detailed here concerns an analysis of characteristic (i.e. Wq maximum, Sq – mean and Nq – minimum) specific runoff from selected river catchments in Poland as set against the recorded intensity of the North Atlantic Oscillation (NAO) as quantified using Hurrell's NAO index. Analysis was based around daily river discharges at water-gauges located along 40 rivers in numerous different regions of Poland (Fig. 2), and deemed to be representative of various kinds of hydrological regime. The data spanned the 1951-2010 period, though time series for particular river catchments were in fact in the 48- to 60-year range.

The data in question were made subject to calculations of coefficients for the correlation between simultaneous series describing characteristic specific river runoffs and values of Hurrell's NAO index. However, assessment also accounted for inertia of specific river runoff, by using cross-correlation coefficients, and most especially the relationship between studied specific river runoff and values for the NAO index recorded in the preceding year. The statistical significances of correlation and cross-correlation coefficient values were assessed using the Student t test ($\alpha = 0.05$). The correlation between values for the Hurrell index and weighted average specific runoff from Poland was also analysed.

A key research finding was that the largest number of statistically-significant correlation coefficients (19 and 14 respectively) were obtained when Hurrell's NAO index was set against maximum or mean specific river runoffs (Fig. 4). In contrast, the NAO is shown to have a rather minor impact on minimum specific river runoff in Poland (with significance achieved for data from just 3 catchments).

Asynchronicity to the relationship between the NAO and characteristic runoff in Poland was also observed, though it needs stressing that the NAO primarily influences specific river runoff in southern Poland, with only a more minor influence on runoff in the lowland and lakeland regions of central and northern Poland. The calculated cross-correlation method largely failed to reveal inertia of the analysed characteristic specific river runoff, with no statistically significant correlation being obtained between Hurrell index values and weighted average specific runoff from Poland. Equally, several-year periods with an asynchronous relationship between the NAO and weighted average specific runoff from Poland were to be noted between 1960 and 2010.

