

*Joanna Pociask-Karteczka¹, Danuta Limanówka²,
Zenon Nieckarz³*

WPŁYW OSCYLACJI PÓŁNOCNOATLANTYCKIEJ NA PRZEPIŁY RZEK KARPACIKI (1951-2000)

Zbadano związek przepływów Skawy (profil Wadowice), Dunajca (profil Nowy Sącz) oraz Wisły (profil Sandomierz) z oscylacją północnoatlantycką (NAO). W analizie uwzględniono przepływy roczne, sezonowe, miesięczne i ekstremalne rzek oraz zimowy wskaźnik NAO Hurrella, a także średnie miesięczne i roczne wskaźniki NAO Rogersa w latach 1951-2000. Zastosowano analizę korelacji liniowej. Związki pomiędzy oscylacją północnoatlantycką a przepływami rzek karpaccich nie są zbyt silne, zaś ich istotność niewielka; niemniej jednak ujawniły się pewne — nie stwierdzone i nie badane wcześniej — zależności, pozwalające na wyjaśnienie zmienności przepływów rzek karpaccich. Średnie przepływy roczne rzek karpaccich są ujemnie skorelowane ze wskaźnikiem rocznym NAO. Oznacza to, iż w latach o pozytywnej fazie NAO, średni przepływ roczny jest niższy, niż w latach, w których występuje negatywna faza NAO. Dotyczy to zwłaszcza Wisły, dla której związek ten jest najsilniejszy. Stan cyrkulacji w okresie zimowym wyrażony wskaźnikami NAO jest „zapowiedzią” wielkości odpływu w okresach późnoletnim i wczesnojesiennym: jeśli zima jest zdominowana silną pozytywną fazą NAO, to pod koniec lata i na początku jesieni, w badanych rzekach można spodziewać się niskich przepływów, i na odwrót.

Słowa kluczowe: oscylacja północnoatlantycka, telekoneksje, odpływ, Karpaty
Key words: North Atlantic Oscillation, teleconnections, runoff, Carpathian Mts.

WSTĘP

Wielkość i dynamika odpływu kształtowane są głównie przez czynniki pogodowe, z których najważniejszymi są opady i temperatura powietrza. Te zaś wiążą się z procesami cyrkulacji atmosferycznej, pełniącymi rolę ogniwa łączącego zjawiska zachodzące w hydrosferze ze zjawiskami meteorologicznymi. Zatem pierwotną, choć pośrednią przyczyną obiegu wody, są zmiany zachodzące w wielkoskalowych układach barycznych, oddziałujących na warunki pogodowe danego obszaru. W przypadku Polski, funkcję takiego układu pełni oscylacja północnoatlantycka (NAO), określana jako klimatotwórcza dla Polski (Marsz, Żmudzka 1999; Marsz 2001).

Oscylacja północnoatlantycka stanowi efekt współdziałania dwóch ośrodków barycznych: Wyżu Azorskiego oraz Niżu Islandzkiego. Gdy ciśnienie w Niżu Azorskim wzrasta, zaś w Niżu Islandzkim spada, ma wówczas miejsce pozytywna faza NAO. Rozwija się wtedy nasiloną cyrkulacja strefowa; silny gradient baryczny nad północnym Atlantykiem powoduje przemieszczenie mas powietrza znad Atlantyku z zachodu na wschód nad północno-zachodnią i centralną Europę. Gdy ciśnienie w Wyżu Azorskim spada, zaś w Niżu Islandzkim wzrasta, północno-zachodnia składowa gradientu barycznego słabnie lub całkowicie zanika, zaś rośnie wschodnia lub zachodnia. Występuje wówczas tzw. negatywna faza NAO, podczas której rozwija się silny, międzystrefowy ruch mas powietrza (cyrkulacja południkowa). Nad Polskę napływają strumienie powietrza z północy lub południa, niekiedy — ze wschodu (Marsz, Styszyńska 2001).

Oscylacja północnoatlantycka stanowi jeden z podstawowych regionalnych systemów sterujących, którego wpływ zaznacza się nie tylko w Polsce, ale również w znacznej części Europy i Ameryki Północnej (Bonsal i in. 2001; Shabbar i in. 1997; Marsz 2001; Wibig 1999a, b, c; Wibig 2000, 2001). W Polsce uwidacznia się on m.in. w postaci wyraźnej zależności między postępującym ociepleniem a intensywnością oscylacji północnoatlantyckiej wyrażającej się wzrostem zimowego wskaźnika NAO Hurrella. Szczególnie silny wpływ oscylacji północnoatlantyckiej na cyrkulację powietrza w Polsce zaznacza się w sezonie zimowym (Niedźwiedź 2002). Wyraźny jest wpływ NAO na temperaturę powietrza podczas chłodnej pory roku (Kołuchowski, Degirmendżic 2002; Marsz, Styszyńska 2001), a także na warunki radiacyjne, wilgotnościowe i ewaporacyjne oraz zwierciadło wód gruntowych w ciągu roku (Bryś, Bryś 2002). Zatem, jeśli NAO wpływa na tak wiele elementów meteorologicznych, wydaje się uzasadnione, iż powinien istnieć związek NAO z warunkami hydrologicznymi wyrażonymi wielkością i dynamiką odpływu. O ile wpływ NAO na warunki pogodowe i klimat Polski zostały w znacznej mierze rozpoznane (Łupikasz 2001; Marsz 1999; Marsz, Styszyńska 2001), o tyle badania nad wpływem NAO na odpływ rzeczny należą do nielicznych (Kaczmarek 2002; Styszyńska 2002). Z. Kaczmarek wykazał związek NAO z odpływem roztopowym Wisły, Odry i Łaby: znaczne wezbrania roztopowe tych rzek występują w następstwie zim charakteryzujących się ekstremalnie niskimi wartościami wskaźnika NAO.

Celem opracowania jest znalezienie odpowiedzi na pytanie: czy — i w jakim stopniu — oscylacja północnoatlantycka wpływa na przepływy rzek karpackich. W badaniach wykorzystano:

- średnie przepływy miesięczne, sezonowe, roczne oraz przepływy ekstremalne Skawy, Dunajca oraz Wisły w latach 1951–2000,
- zimowy wskaźnik NAO Hurrella oraz średnie miesięczne i roczne wskaźniki NAO Rogersa w latach 1951–2000 (www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.html).

Wskaźnik Hurrella jest to znormalizowana uśredniona różnica ciśnień między Lizboną i Stykkisholmur/Reykjavik odnosząca się do okresu od grudnia do marca; stąd też wskaźnik ten zwany jest zimowym i datuje się go na rok stycznia, natomiast wskaźnik Rogersa to uśredniona, standaryzowana różnica ciśnienia między Ponta Delgada (Azory) i Akureyri (Islandia). W badaniach zastosowano analizę korelacji liniowej.

Analizowane zlewnie są zróżnicowane pod względem powierzchni: od 835 do 31 846 km² (tab. 1). Skawa (Wadowice) i Dunajec (Nowy Sącz) leżą w obrębie Karpat Wewnętrznych, natomiast Wisła (Sandomierz) reprezentuje rzekę tranzytową, której reżim jest zdominowany rzekami karpackimi. W ciągu roku, w badanych zlewniach występują dwa okre-

Tabela 1 — Table 1

Powierzchnia (A) badanych zlewni
The area (A) of investigated basins

Rzeka River	Profil Water level gauge	A [km ²]
Skawa	Wadowice	835
Dunajec	Nowy Sącz	4 341
Wisła	Sandomierz	31 846

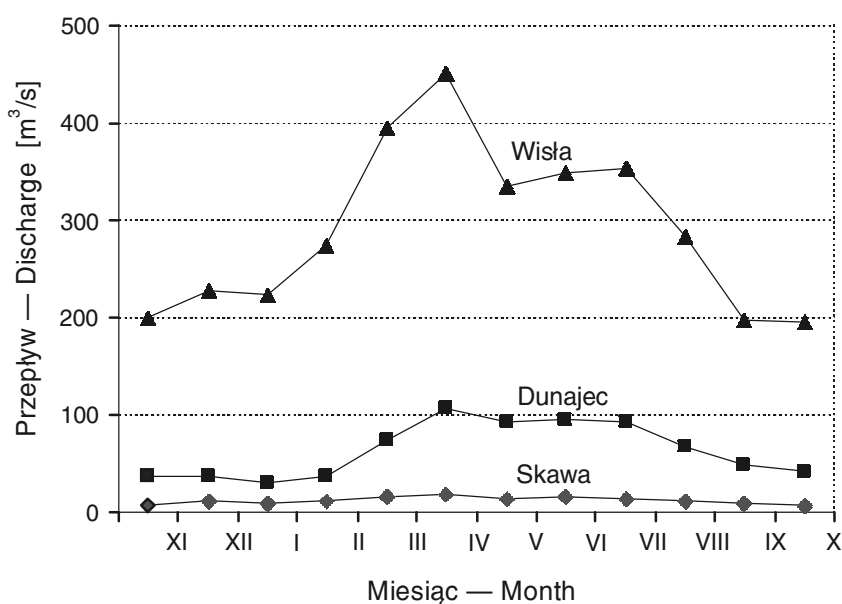
Tabela 2 — Table 2

Współczynnik korelacji między przepływami średnimi rocznymi Q_r , półrocza zimowego Q_z i półrocza letniego Q_l badanych rzek w latach 1951–2000 ($p < 0,001$)
Correlation coefficients between the annual Q_r and seasonal winter Q_z and summer Q_l discharges of investigated rivers, 1951–2000 ($p < 0,001$)

Rzeka — River	Q_r	Q_z	Q_l
Wisła — Skawa	0,87	0,82	0,90
Wisła — Dunajec	0,83	0,86	0,92
Dunajec — Skawa	0,77	0,84	0,81

sy wezbraniowe: roztopowy w kwietniu oraz deszczowy w czerwcu i lipcu (ryc. 1). Taki rytm odpływu jest charakterystyczny dla rzek Polskich Karpat Zachodnich (Dobija 1981; Ziemońska 1973).

Przebiegi badanych rzek, zarówno średnie roczne, jak i średnie sezonowe (półrocza zimowego i letniego) są ze sobą silnie skorelowane (tab. 2). Uwagę zwraca wysoka wartość współczynnika korelacji R między średnimi przepływami Dunajca i Wisły w półroczu letnim ($R = 0,92$, poziom istotności $p < 0,001$), świadcząca o bardzo zbliżonym reżimie obu rzek w sezonie letnim.



Ryc. 1. Reżim przepływów Skawy, Dunajca i Wisły (1951–2000)

Fig. 1. Runoff of the Skawa, Dunajec and Wisła (1951–2000)

OKRES BADAŃ

Okres badań (1951–2000) obejmuje końcowe lata trzeciej epoki cyrkulacyjnej NAO oraz epokę ostatnią. Epoki te zostały wyróżnione na podstawie związku wskaźnika Hurrella z roczną temperaturą powietrza w Polsce. Trzecia epoka cyrkulacyjna (1930–1970) odznaczała się dość stabilnym i umiarkowanym wpływem NAO na obszar Polski. Podczas ostatniej epoki cyrkulacyjnej (1971–1995), wpływ oscylacji północnoatlantyckiej był bardzo silny. Dominował wówczas strefowy, zachodni przepływ mas powietrza, charakteryzujący się oceanizacją reżimu opadowego. Epoka ta odznaczała się bardzo wysokim wskaźnikiem NAO, najwyż-

szymi wartościami rosnącego trendu wskaźnika NAO i sum temperatur powietrza w miesiącach zimowych oraz największym stopniem skorelowania średniej temperatury powietrza w lipcu ze wskaźnikiem zimowym NAO (Marsz 1999).

WPLYW NAO NA ŚREDNIE PRZEPLYWY ROCZNE, SEZONOWE I EKSTREMALNE

Analiza współczynnika korelacji liniowej pomiędzy średnimi przepływami rocznymi Skawy, Dunajca i Wisły (1951–2000) i rocznym wskaźnikiem NAO pozwala stwierdzić, iż w przypadku Wisły, współczynnik ten jest istotny na poziomie $p < 0,01$ ($R = -0,38$). Ujemna korelacja wskazuje, iż przy wysokich wartościach wskaźnika NAO, przepływy są niewielkie, i na odwrót (tab. 3). W odróżnieniu od półrocza zimowego, daje się

Tabela 3 — Table 3

Współczynniki korelacji (R_r) między wskaźnikiem rocznym NAO a średnimi rocznymi przepływami (druk pogrubiony — $p < 0,01$)

Correlation coefficients between the annual NAO index and the annual discharges (bold — $p < 0,01$)

Rzeka — River	R_r
Skawa — Wadowice	-0,36
Dunajec — Nowy Sącz	-0,28
Wisła — Sandomierz	-0,38

Tabela 4 — Table 4

Współczynniki korelacji między wskaźnikiem rocznym (R_r) i zimowym (R_z) NAO a średnimi przepływami półrocza zimowego ($p > 0,05$)

Correlation coefficients between the annual NAO index (R_r) and the winter NAO index (R_z) and the winter-seasonal discharges ($p > 0,05$)

Rzeka — River	R_r	R_z
Skawa — Wadowice	-0,08	0,04
Dunajec — Nowy Sącz	0,02	0,17
Wisła — Sandomierz	-0,05	-0,03

zauważyć wyraźny związek rocznego wskaźnika NAO z przepływami średnimi półrocza letniego, zwłaszcza przepływami Wisły ($R = -0,40$; $p < 0,01$) i Skawy ($R = -0,39$; $p < 0,01$) (tab. 4, 5). Przy wysokich wartościach wskaźnika rocznego NAO, przepływy rzek karpackich w półroczu letnim są niskie. Może to być skutek stosunkowo niskich opadów w sezonie letnim roku zdominowanego pozytywną fazą NAO. Współczynniki korelacji między przepływami letnimi rzek i zimowym wskaźnikiem NAO są niż-

Tabela 5 — Table 5

Współczynniki korelacji między wskaźnikiem rocznym (R_r) i zimowym (R_z) NAO a średnimi przepływami półrocza letniego (druk pogrubiony — $p < 0,01$)

Correlation coefficients between the annual NAO index (R_r) and the winter NAO index (R_z) and the summer-seasonal discharges (bold — $p < 0.01$)

Rzeka — River	R_r	R_z
Skawa — Wadowice	-0,39	-0,26
Dunajec — Nowy Sącz	-0,31	-0,09
Wisła — Sandomierz	-0,40	-0,25

Tabela 6 — Table 6

Współczynnik korelacji między wskaźnikiem rocznym (R_r) i zimowym (R_z) NAO a przepływami maksymalnymi i minimalnymi (druk pogrubiony — $p < 0,01$)

Correlation coefficients between the annual NAO index (R_r) and the winter NAO index (R_z) and the maximum and minimum discharges (bold — $p < 0.01$)

Zlewnia — Basin	Przepływ — Discharge	R_r	R_z
Skawa — Wadowice	maksymalny maximum	-0,39	-0,11
	minimalny minimum	0,05	0,05
Dunajec — Nowy Sącz	maksymalny maximum	-0,43	-0,43
	minimalny minimum	-0,16	-0,16
Wisła — Sandomierz	maksymalny maximum	-0,34	-0,22
	minimalny minimum	0,16	0,29

sze, warto jednak zauważyć, iż w przypadku przepływów Skawy i Wisły, są znacznie wyższe, niż w przypadku Dunajca (tab. 5). Nie zaznacza się wpływ NAO na przepływy ekstremalne, zwłaszcza przepływy minimalne. Wyjątek stanowią przepływy maksymalne Skawy i Dunajca (tab. 6).

WPLYW NAO NA ŚREDNIE PRZEPŁYWY MIESIĘCZNE

Związek między rocznym wskaźnikiem NAO i średnimi przepływami miesięcznymi zaznacza się najwyraźniej w przypadku przepływów Wisły w sierpniu ($R = -0,39$; $p < 0,01$) (tab. 7). Nie zaznacza się wpływ zimowego wskaźnika NAO na średnie przepływy miesięczne rzek; wyjątek stanowi Dunajec, gdzie dla stycznia $R = 0,38$ ($p < 0,01$).

Tabela 7 — Table 7

Współczynniki korelacji między wskaźnikiem rocznym NAO a średnimi przepływami miesięcznymi (druk pogrubiony — $p < 0,01$)

Correlation coefficients between the annual NAO index and mean monthly discharges (bold — $p < 0.01$)

Rzeka River	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Skawa — Wadowice	0,17	0,25	0,13	-0,22	-0,03	-0,28	-0,30	-0,18	-0,20	-0,34	-0,20	-0,09
Dunajec — Nowy Sącz	0,13	0,25	0,31	-0,06	0,11	-0,26	-0,05	-0,14	-0,23	-0,34	-0,19	-0,05
Wisła — Sandomierz	0,17	0,28	0,23	-0,12	-0,09	-0,30	-0,17	-0,17	-0,25	-0,39	-0,31	-0,14

Warto zauważyć, iż analizując współczynniki korelacji między wskaźnikiem zimowym NAO i średnimi przepływami miesięcznymi, zmiana charakteru zależności — tj. z korelacji dodatniej na korelację ujemną — następuje w kwietniu. Jest to okres, kiedy słabnie cyrkulacja strefowa. Korelacje dodatnie pojawiają się dopiero późną jesienią (tab. 8).

Na uwagę zasługuje związek między wskaźnikiem zimowym NAO i przepływami rzek w styczniu i sierpniu. O ile łatwo zrozumieć zależność w styczniu, o tyle asynchroniczne powiązanie z sierpniem jest dość zadziwiające (tab. 8). Częściowym wyjaśnieniem są wyniki badań wpływu NAO na opady: w południowej części Polski, wskaźnik zimowy NAO objaśnia prawie 30% zmienności sum opadów w sierpniu (Styszńska 2001). Asynchroniczność zjawisk jest prawdopodobnie spowodowana wielkoskalowymi i długotrwałymi procesami przenoszenia prądowego anomalii temperatury wody powierzchniowej Atlantyku Północnego (Marsz 1999).

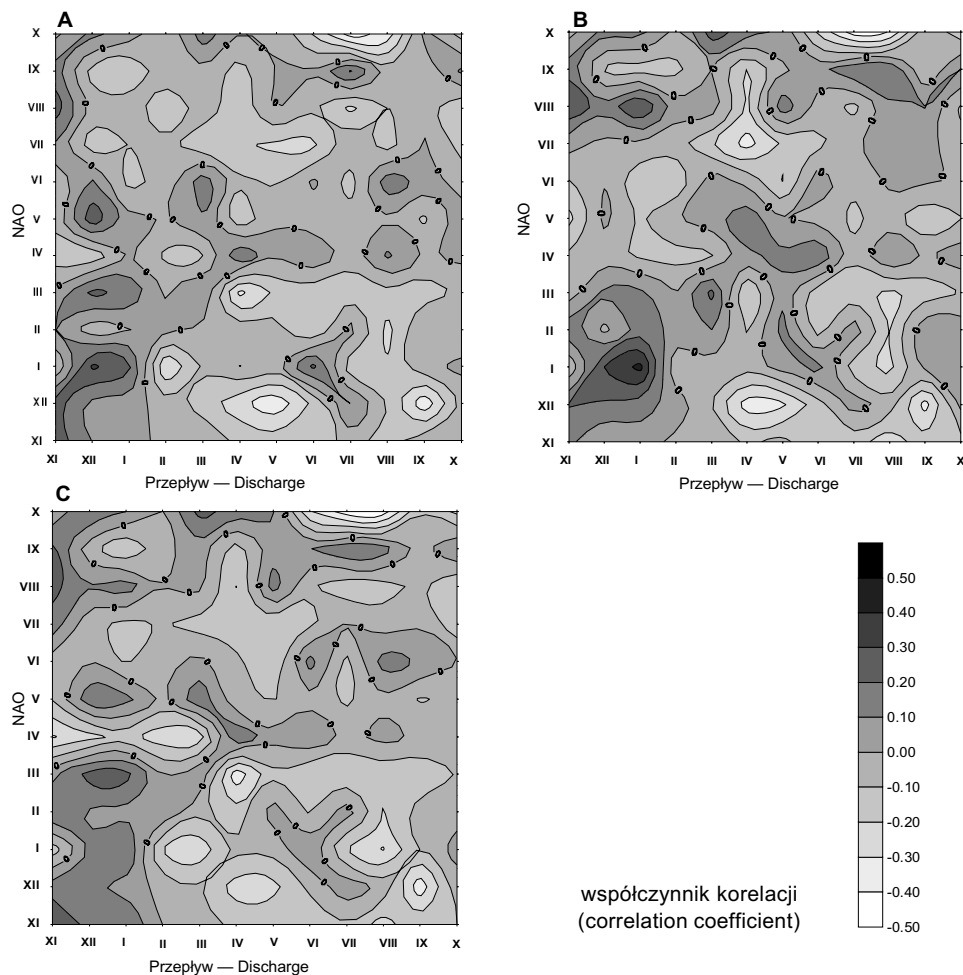
Tabela 8 — Table 8

Współczynniki korelacji między wskaźnikiem zimowym NAO a średnimi przepływami miesięcznymi (druk pogrubiony — $p < 0,01$)
Correlation coefficients between the winter NAO index and mean monthly discharges (bold — $p < 0.01$)

Rzeka River	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Skawa — Wadowice	-0,03	0,18	0,22	0,02	0,01	-0,16	-0,21	-0,09	-0,11	-0,26	-0,19	-0,05
Dunajec — Nowy Sącz	0,05	0,19	0,38	0,13	0,21	-0,15	0,13	-0,01	-0,06	-0,25	-0,10	0,05
Wisła — Sandomierz	0,04	0,17	0,21	0,04	-0,12	-0,20	-0,13	-0,14	-0,12	-0,25	-0,24	-0,05

Analiza związków między miesięcznymi wskaźnikami NAO i miesięcznymi przepływami rzek wskazuje, iż nie są one zbyt silne i wykazują zróżnicowanie w odniesieniu do poszczególnych rzek i miesięcy. W przypadku Skawy, najsilniejsze występują między październikowym wskaźnikiem NAO i przepływami w lipcu ($R = -0,44$; $p < 0,01$) oraz sierpniu ($R = -0,36$; $p < 0,05$), między wskaźnikiem NAO w grudniu i przepływami w maju ($R = -0,37$; $p < 0,05$) oraz wrześniu ($R = -0,36$; $p < 0,05$), a także między wskaźnikiem NAO w styczniu i przepływami w grudniu ($R = 0,32$; $p < 0,05$) (ryc. 2A). Współczynniki korelacji w przypadku Dunajca nie są zbyt silne i kształtują się podobnie jak dla Skawy: najwyższe odnoszą się do wskaźnika NAO w październiku i przepływów Dunajca w lipcu ($R = -0,45$; $p < 0,01$) i sierpniu ($R = -0,40$; $p < 0,05$) oraz wskaźnika NAO w styczniu i przepływów Dunajca w grudniu ($R = 0,31$; $p < 0,05$) i styczniu ($R = 0,43$; $p < 0,01$), a także do wskaźnikiem NAO w grudniu i przepływów w maju ($R = -0,32$; $p < 0,05$) i wrześniu ($R = -0,34$; $p < 0,05$) (ryc. 2B). W odniesieniu do Wisły, zależności są podobne, jak w przypadku Skawy i Dunajca. Najsilniejszy związek istnieje między październikowym wskaźnikiem NAO i przepływami Wisły w lipcu oraz sierpniu ($R = -0,45$; $p < 0,01$), między wskaźnikiem NAO w grudniu i przepływami Wisły we wrześniu ($R = -0,36$; $p < 0,05$), między wskaźnikiem NAO w styczniu i przepływami Wisły w sierpniu ($R = 0,31$; $p < 0,05$) oraz między wskaźnikiem NAO w marcu i przepływami w kwietniu ($R = -0,36$; $p < 0,05$) a także między wskaźnikiem NAO w kwietniu i przepływami w listopadzie ($R = 0,31$; $p < 0,05$) (ryc. 2C). Podobne synchroniczne i asynchroniczne związki stwierdziła A. Styszyńska (2002) w odniesieniu do przepływów Warty.

Wiele z powyższych korelacji odzwierciedla związki przypadkowe. Korelacje odzwierciedlające jednoznaczne zależności przyczynowo-skut-



Ryc. 2. Korelacja między średnimi wskaźnikami miesięcznymi NAO Rogersa i średnimi przepływami miesięcznymi Skawy (A), Dunajca (B) i Wisły (C), 1951–2000

Fig. 2. Correlation between the monthly Rogers' indexes of NAO and the mean monthly discharges of Skawa (A), Dunajec (B) and Wisła (C), 1951–2000

kowe między NAO i odpływem, ograniczają się do wskaźnika NAO w grudniu i przepływów wszystkich badanych rzek we wrześniu oraz Skawy i Dunajca w maju następnego roku, a wskaźnika NAO w styczniu i przepływu Dunajca w styczniu i Wisły w sierpniu. Prawie we wszystkich przypadkach korelacja jest ujemna. Wyraźnie zaznacza się wpływ NAO na przepływy w lipcu i sierpniu, mimo iż są to miesiące, w których przepływy rzek karpackich odznaczają się największą zmiennością z roku na rok (Chelmiński i in. 1998–1999).

WPLYW NAO NA PRZEPLYWY ŚREDNIE
TRZECH KOLEJNYCH MIESIĘCY

Analizie poddano współczynnik korelacji między średnim przepływem rzek a wartością średnią wskaźnika NAO z trzech kolejnych miesięcy. Dość wyraźnie uwidacznia się wpływ NAO w miesiącach jesienno-zimowych (XI, XII, I) na przepływy wszystkich rzek w okresie wiosennym (III, IV, V) oraz przepływy Skawy i Wisły w półroczu letnim i jesiennym (VIII, IX, X), natomiast Dunajca — w tym samym czasie (ryc. 3). Wyraźna zależność zaznacza się także między NAO w miesiącach zimowych (I, II, III) i przepływami Dunajca i Wisły latem (VII, VIII, IX). Synchroniczne związki występują: w przypadku Skawy — jesienią (X, XI, XII), zaś Dunajca — zimą (XII, I, II), natomiast niesynchroniczne — między NAO (VIII, IX, X) a przepływami Dunajca i Wisły (X, XI, XII) oraz między NAO (IX, X, XI) i przepływami Wisły (X, XI, XII) (ryc. 3, tab. 9).

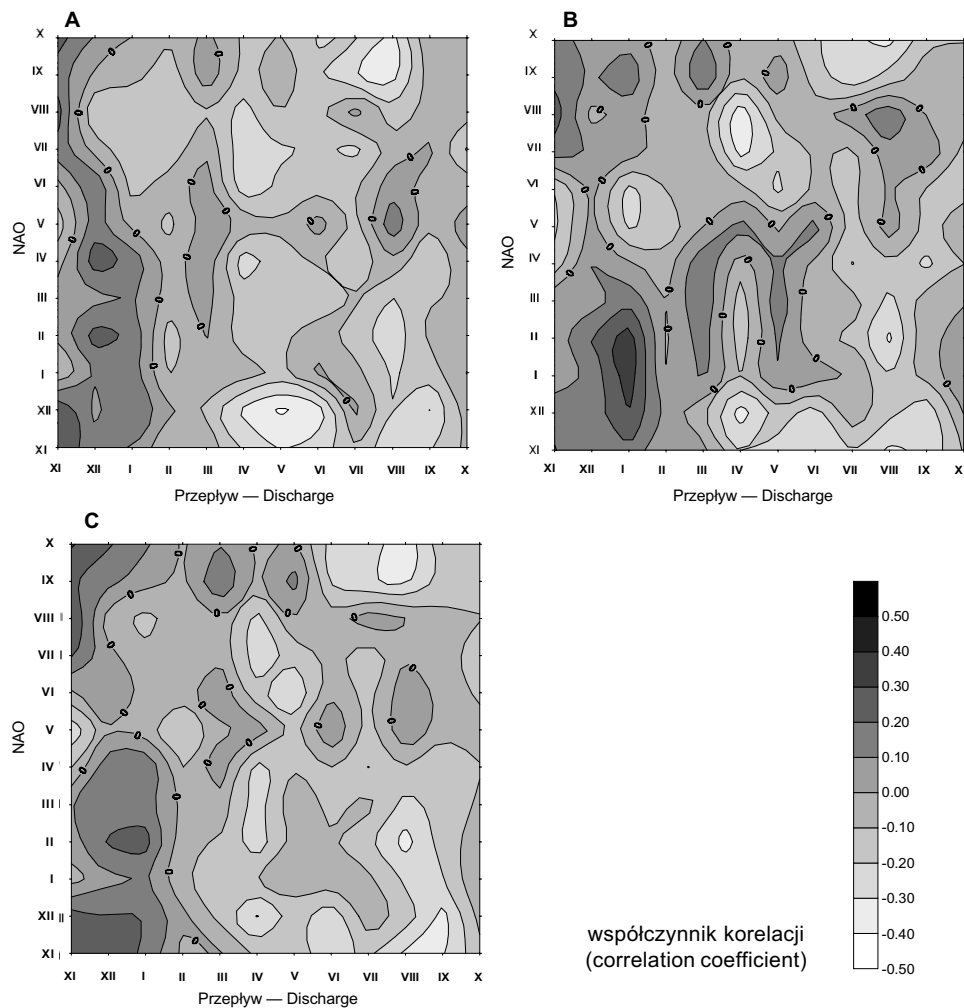
Powyższa analiza potwierdza wcześniejsze wnioski i zwraca także uwagę na nowe powiązanie między NAO w miesiącach zimowych i odpływem rzek wiosną. Korelacja ujemna wskazuje, iż im silniejsza pozytywna faza NAO zimą, tym odpływ wiosną jest niższy. Można przypuszczać, że po zimie z silnie zaznaczoną pozytywną fazą NAO, wezbrania roztopowe nie będą wysokie. Do podobnych wniosków doszedł Z. Kaczmarek

Tabela 9 — Table 9

Współczynniki korelacji między wskaźnikiem rocznym (R_r) i zimowym (R_z) NAO oraz przepływami średnimi rocznymi i sezonowymi w epoce cyrkulacyjnej E II (1951–1970)
(druk pogrubiony — $p < 0,01$)

Correlation coefficients between the annual NAO index (R_r) and the winter NAO index (R_z) and the annual and seasonal discharges in the air-circulation epoch
E II (1951–1970) (bold — $p < 0.01$)

Przepływ — Discharge	Rzeka — River	R_r	R_z
Roczny — Annual	Skawa	-0,55	-0,32
	Dunajec	-0,32	-0,18
	Wisła	-0,39	-0,24
Półrocza letniego Summer half-year	Skawa	-0,64	-0,33
	Dunajec	-0,40	-0,25
	Wisła	-0,50	-0,33
Półrocza zimowego Winter half-year	Skawa	-0,26	-0,20
	Dunajec	0,03	0,05
	Wisła	0,05	0,08



Ryc. 3. Związek średnich wartości wskaźnika NAO z trzech kolejnych miesięcy ze średnimi przepływami Skawy (A), Dunajca (B) i Wisły (C) w tym samym czasie (1951–2000) (opis osi czasu odpowiada środkowemu miesiącowi z trzech uwzględnionych w obliczeniach średniej)

Fig. 3. Correlation between three months mean values of NAO and discharges of Skawa (A), Dunajec (B) and Wisła (C), 1951–2000 (months in the figure suit the middle of three counted months)

(2002), badający odpływ Wisły, Odry i Łaby: niskie wartości wskaźników NAO zimą wskazują na możliwość wystąpienia znacznych wezbrań roztopowych.

WPLYW NAO NA PRZEPŁYWY RZEK W EPOKACH CYRKULACYJNYCH
(1951–1970 i 1971–1995)

W trzeciej epoce cyrkulacyjnej (1951–1970) zaznaczył się istotny i wyraźny wpływ NAO na przepływy półrocza letniego ($R = -0,64$; $p < 0,01$) i średni przepływ roczny Skawy ($R = -0,55$; $p < 0,05$) (tab. 9). W kolejnej epoce (1971–1995), brak jest tak mocnych i istotnych związków, mimo, że wpływ NAO na warunki pogodowe był znaczny. Wyróżnia się jedynie związek między rocznym wskaźnikiem NAO i średnimi przepływami rocznymi Wisły i Dunajca (odpowiednio $R = -0,49$ i $R = -0,40$; $p < 0,05$) (tab. 10).

Wydaje się, że wpływ wielkoskalowej cyrkulacji powietrza powinien najsilniej zaznaczać się w zlewni o największej powierzchni. W małych zlewniach, odpływ w znacznej mierze uwarunkowany jest cyrkulacją lokalną oraz czynnikami geograficznymi, takimi jak: układ dolin, deniwelacje, spadki i użytkowanie terenu, układ sieci rzecznej, warunki hydrogeologiczne. Tymczasem, „najczulszą” na zmiany NAO okazała się zlewnia Skawy (Wadowice) — najmniejsza z badanych. Jednak aby ocenić, czy wpływ NAO jest zróżnicowany w odniesieniu do zlewni o różnych powierzchniach, należałoby uwzględnić w badaniach znacznie większą liczbę zlewni.

Tabela 10 — Table 10

Współczynniki korelacji między wskaźnikiem rocznym (R_r) i zimowym (R_z) NAO a przepływami średnimi rocznymi i sezonowymi a w epoce cyrkulacyjnej E III (1971–1995) (druk pogrubiony — $p < 0,05$)

Correlation coefficients between the annual NAO index (R_r) and the winter NAO index (R_z) and the annual and seasonal discharges in the air-circulation epoch E III (1971–1995) (bold — $p < 0.05$)

Przepływ — Discharge	Rzeka — River	R_r	R_z
Roczny Annual	Skawa	-0,380	-0,332
	Dunajec	-0,404	-0,057
	Wisła	-0,485	-0,382
Półrocza letniego Summer half-year	Skawa	-0,264	-0,230
	Dunajec	-0,264	0,061
	Wisła	-0,342	-0,195
Półrocza zimowego Winter half-year	Skawa	-0,288	-0,253
	Dunajec	-0,276	-0,015
	Wisła	-0,299	-0,346

DYSKUSJA I WNIOSKI

Na podstawie analizy współczynników korelacji między wskaźnikami NAO i przepływami rzek karpackich można stwierdzić:

1. Wpływ NAO na średnie przepływy półrocza letniego: w latach o wysokim wskaźniku rocznym NAO, średnie przepływy Wisły i Skawy w tym półroczu są niewielkie i na odwrót. Roczny wskaźnik NAO objaśnia prawie 41% zmienności średnich przepływów Skawy w półroczu letnim oraz 30% zmienności średnich przepływów rocznych w trzeciej epoce i kilkanaście procent zmienności średnich przepływów rocznych Wisły i Dunajca w kolejnej epoce cyrkulacyjnej.

2. Wpływ NAO na przepływy maksymalne Skawy i Dunajca: im wyższy wskaźnik roczny NAO, tym przepływy maksymalne Skawy i Dunajca są niższe.

3. Wpływ NAO na średnie przepływy roczne rzek karpackich: w latach o dodatnim wskaźniku NAO, średnie przepływy roczne są niższe niż w latach, w których występuje niski wskaźnik NAO (dotyczy to zwłaszcza Wisły, w odniesieniu do której związek ten jest najsilniejszy).

4. Wpływ NAO w grudniu i styczniu na przepływy rzek: im wyższa wartość wskaźnika NAO w grudniu, tym przepływy Skawy i Dunajca w maju oraz wszystkich rzek we wrześniu następnego roku są niższe; ponadto, im wyższa wartość wskaźnika NAO w styczniu, tym przepływy Dunajca w styczniu są wyższe, zaś przepływy Wisły w sierpniu są niższe.

5. Stan cyrkulacji w okresie zimowym jest „zapowiedzią” wielkości odpływu w okresach późnoletnim i wczesnojesiennym; jeśli zima jest zdominowana silną pozytywną fazą NAO, to pod koniec lata i na początku jesieni w badanych rzekach można spodziewać się głębokiej niżówki.

6. „Najczulszą” na zmiany NAO okazała się najmniejsza z badanych — zlewnia Skawy (Wadowice), choć wydaje się, iż wpływ wielkoskalowej cyrkulacji powietrza powinien najsilniej zaznaczać się w zlewniach o znacznych powierzchniach, gdzie odpływ nie jest w dużej mierze uwarunkowany cyrkulacją lokalną oraz czynnikami geograficznymi.

Wpływ oscylacji północnoatlantyckiej na przepływy rzek karpackich nie jest silny, lecz nie jest niezauważalny. Większość uzyskanych współczynników korelacji jest stosunkowo niska, zaś ich istotność niewielka, co jest zapewne spowodowane pośrednim związkiem przepływu rzeczno-go z warunkami cyrkulacyjnymi. Wydaje się, iż szczegółowa analiza wpływu NAO na odpływ powinna być dokonywana w poszczególnych epokach cyrkulacyjnych, na co zwróciła uwagę A. Styszyńska (2002), która stwierdziła, iż każda epoka może odznaczać się indywidualnym charakterem związków. Ponadto, siła związku uzależniona jest także od

rodzaju wskaźnika NAO użytego w obliczeniach. Wraz z przemieszczeniem się na wschód, południowego punktu bazowego uwzględnionego w obliczaniu wskaźnika NAO, siła związku rośnie: najsilniejsze związki — zdaniem Styszyńskiej — stwierdza się stosując wskaźnik Jonesa, najsłabsze — stosując wskaźnik Rogersa. Ponadto, kluczowym zagadnieniem koniecznym do pełnej interpretacji wpływu NAO na warunki hydrologiczne jest szczegółowa znajomość wpływu NAO na wielkość opadów i ich rozkład w ciągu roku. Opady bowiem, są tym elementem, który podlega transformacji w odpływ.

¹ Uniwersytet Jagielloński
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
Zakład Hydrologii
ul. Grodzka 64
PL 31-044 Kraków

² Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej,
Oddział w Krakowie
ul. Piotra Borowego 14
PL 30-215 Kraków

³ Uniwersytet Jagielloński
Instytut Fizyki
ul. Reymonta 4
PL 30-059 Kraków

LITERATURA

- Bonsal B.R., Shabbar A., Higuichi K., 2001, *Impact of low frequency variability modes on Canadian winter temperature*, Intern. Journal of Climatology 21.
- Bryś K., Bryś T., 2002, *Wpływ Oscylacji Północnoatlantyckiej na zmienność warunków wilgotnościowych, radiacyjnych, dynamicznych i ewaporacyjnych we Wrocławiu-Swojcu w latach 1946–2000* [w:] *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski*, red. A.A. Marsz, A. Styszyńska, Akad. Morska w Gdyni.
- Chelmiński W., Skąpski R., Soja R., 1998–99, *Reżim hydrologiczny rzek karpacczych w Polsce*, Folia Geogr. ser. Geogr.-Phys. 29–30.
- Dobija A., 1981, *Sezonowa zmienność odpływu w zlewni górnej Wisły (po Zawichost)*, Zesz. Nauk. UJ. Prace Geogr. 53.
- Kaczmarek Z., 2002, *Wpływ Oscylacji Północnoatlantyckiej na przepływy rzek europejskich* [w:] *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski*, red. A.A. Marsz, A. Styszyńska, Akad. Morska w Gdyni.
- Kożuchowski K., Degirmendžic J., 2002, *Wskaźniki cyrkulacji a temperatura powietrza w Polsce* [w:] *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski*, red. A.A. Marsz, A. Styszyńska, Akad. Morska w Gdyni.

- Łupikasza E., 2001, *Zmienność wskaźnika nierównomierności opadów w Europie w XX wieku oraz jego związki ze zmiennością wskaźnika NAO* [w:] *Postęp badań zmian klimatu i ich znaczenie dla życia i gospodarczej działalności człowieka*, Prace i Studia Geogr. 29.
- Marsz A., 1999, *Oscylacja Północnoatlantycka a reżim termiczny zim na obszarze północno-zachodniej Polski i na polskim wybrzeżu Bałtyku*, Przegł. Geogr. 71, 3.
- Marsz A., 2001, *Stan termiczny Północnego Atlantyku a reżim termiczny zim na polskim wybrzeżu Bałtyku (problem długoterminowej prognozy termiki zim)*, Wyższa Szkoła Morska w Gdyni 101.
- Marsz A., Styszyńska A., 2001, *Oscylacja Północnego Atlantyku a temperatura powietrza nad Polską*, Wyższa Szkoła Morska w Gdyni 101.
- Marsz A., Żmudzka E., 1999, *Oscylacja Północnego Atlantyku a długość okresu wegetacyjnego w Polsce*, Przegł. Geofiz. 44.
- Niedźwiedz T., 2002, *Relacje między NAO wskaźnikami cyrkulacji nad Polską* [w:] *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski*, red. A.A. Marsz, A. Styszyńska, Akad. Morska w Gdyni.
- Shabbar A., Higuchi K., Skinner W., Knox J.L., 1997, *The association between the BWA index and winter surface temperature variability over eastern Canada and west Greenland*, Intern. Journal of Climatology 17.
- Styszyńska A., 2001, *Oscylacja Północnego Atlantyku a opady na obszarze Polski* [w:] *Postęp badań zmian klimatu i ich znaczenie dla życia i gospodarczej działalności człowieka*, Prace i Studia Geogr. 29.
- Styszyńska A., 2002, *Związki między przepływem Warty w Poznaniu a zimowymi wskaźnikami NAO w okresie 1865–2000* [w:] *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski*, red. A.A. Marsz, A. Styszyńska, Akad. Morska w Gdyni.
- Wibig J., 1999a, *Cyrkulacja atmosferyczna nad Europą na powierzchni izobarycznej 500 hPa. Część I — zima*, Przegł. Geof. 44, 1–2.
- Wibig J., 1999b, *Cyrkulacja atmosferyczna nad Europą na powierzchni izobarycznej 500 hPa. Część II — Wiosna, lato, jesień*, Przegł. Geofiz. 44, 1–2.
- Wibig J., 1999c, *Precipitation in Europe in relation to circulation patterns at 500 hPa level*, Intern. Journal of Climatology 19.
- Wibig J., 2000, *Oscylacja Północnoatlantycka i jej wpływ na kształtowanie pogody i klimatu*, Przegł. Geofiz. 45, 2.
- Wibig J., 2001, *Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na rozkład przestrzenny anomalii temperatury i opadów w Europie*, Rozpr. Hab. Uniw. Łódzkiego 208.
- www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.html (strona J. Hurrella, National Center for Atmospheric Research)
- Ziemońska Z., 1973, *Stosunki wodne w Polskich Karpatach Zachodnich*, Prace Geogr. IG PAN 103.

Joanna Pociask-Karteczka, Danuta Limanówka, Zenon Nieckarz

THE NORTH ATLANTIC OSCILLATION IMPACT ON HYDROLOGICAL REGIME
IN POLISH CARPATHIANS (1951–2000)

Summary

The impact of the North Atlantic Oscillation was analysed for the following rivers: Skawa — 835 km², Dunajec — 4 341 km², Wisła — 31 846 km².

Data on river discharges were available for 1951–2000. Sets of long-term monthly mean, seasonal, minimum and maximum values of river discharge were taken into consideration. And, the winter Hurrell's NAO index and the Rogers's NAO indexes respectively (Hurrell's web-site). The linear correlation analysis was used.

The meteorological conditions in Poland are influenced by NAO, in particular in winter (Marsz 1999; Marsz, Styszyńska 2001; Wibig 1999). Therefore, it may be possible a non-direct influence of NAO on river runoff. According to this assumption, analysis of correlation of winter NAO index has been done. The correlation between winter NAO index and mean monthly discharge in winter is significant only in case of Dunajec ($R = 0.38$; $p < 0.01$). Lower correlation deals with winter NAO index and discharges of all rivers in August and the Wisła discharge in September. Analysis of correlation between mean monthly NAO index with mean monthly discharges has been done also. There are some correlations between:

- December NAO index and discharges of Skawa in May and September (respectively: $R = -0.37$, $R = -0.36$; $p < 0.05$),
- December NAO index and discharges of Dunajec in May and September (respectively $R = -0.32$, $R = -0.34$; $p < 0.05$),
- January NAO index and discharge of Dunajec in January ($R = 0.43$; $p < 0.01$),
- December NAO index and discharge of Wisła in September ($R = -0.36$; $p < 0.05$),
- January NAO index and discharge of Wisła in August ($R = 0.31$; $p < 0.05$),
- March NAO index and discharge of Wisła in April ($R = -0.36$; $p < 0.05$).

The relationship between monthly values have not been strong. Therefore, three-months mean values were analysed. The correlation between XI–XII–I NAO index and discharges of all rivers in the spring (III–IV–V), and discharges of Skawa and Wisła in the summer and autumn, and discharge of Dunajec in winter, are significant. There are also synchronic relationships in the autumn and winter months in Skawa and Dunajec.

The NAO conditions in 1951–2000 were very differentiated. There were distinguished a few air-circulation epochs (Marsz, Styszyńska 2001). One of them: the epoch E II — began in 1930 and finished in 1970, and the next one: epoch III — began in 1971 and finished in 1995.

There is a significant correlation between annual mean NAO index and annual and summer-half-year discharge of Skawa in the air circulation epoch 1951–1970 (respectively: $R = -0.55$; $p < 0.05$; $R = -0.64$; $p < 0.01$). There are some significant correlation in the next epoch 1971–1995, but relationship is not very strong. For example, correlation between annual NAO index and annual discharges of Wisła and Dunajec is significant (respectively: $R = -0.40$, $R = -0.49$; $p < 0.05$).

The positive NAO episode in winter are associated with low discharges in the summer and in the beginning of the autumn. There has been stated statistically significant positive correlation between NAO and discharge in January. There were analysed relationship between three months mean values of discharges and three months mean values of Rogers' indexes. There were significant correlations between NAO in the autumn–winter months and river discharges in the spring. This delay may be caused by snow-cover ablation process in the spring.

It may be stated the possibility of improving the runoff forecast of some Polish Carpathian rivers based on the NAO conditions in winter. It is realized that more research into the precipitation phenomena during positive and negative phases of NAO responsible for river runoff responses is required.