

Wpłynęło 29.05.2018 r.
Zrecenzowano 29.08.2018 r.
Zaakceptowano 28.09.2018 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

ANALIZA STRUKTURY I CZASU TRWANIA ZJAWISK LUDOWYCH NA WARCIE NA TLE WARUNKÓW TERMICZNYCH W OKRESIE 1991–2010

Renata GRAF¹⁾ ADEF, Jan T. ŁUKASZEWICZ BPDF,
Kamil JAWGIEL BDEF

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych,
Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego, Zakład Hydrologii
i Gospodarki Wodnej

¹⁾ orcid.org/0000-0003-1518-4773

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki analizy struktury i czasu trwania zjawisk lodowych na Warcie w latach 1991–2010. Przebieg zjawisk lodowych został opisany na tle zmian temperatury powietrza i wody oraz wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO). Określono formy zjawisk lodowych występujących na Warcie w poszczególnych cyklach jej zlodzenia. Zinterpretowano również zmienność temperatury wody w okresie zimowym i jej wpływ na liczbę dni ze zjawiskami lodowymi. W analizie zjawisk lodowych uwzględniono: charakter odcinka rzeki, na którym prowadzono obserwacje oraz stopień antropopresji, wyrażający się przekształceniem koryta rzecznoego, wpływem urbanizacji w strefach większych ośrodków miejskich oraz oddziaływaniem zbiornika Jeziorsko. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono ogólną tendencję w zmienności zjawisk lodowych występujących na rzece, a także określono przyczyny zróżnicowania struktury zjawisk w ujęciu regionalnym. Stwierdzono związek pomiędzy przebiegiem i częstością zjawisk lodowych a warunkami termicznymi i fazami NAO.

Słowa kluczowe: pokrywa lodowa, rzeka Warta, temperatura powietrza, termika wód, zjawiska lodowe

Do cytowania For citation: Graf R., Łukaszewicz J.T., Jawgiel K. 2018. Analiza struktury i czasu trwania zjawisk lodowych na Warcie na tle warunków termicznych w okresie 1991–2010. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 18. Z. 4 (64) s. 5–28.

WSTĘP

Typową cechą rzek w strefie klimatu umiarkowanego jest występowanie zjawisk lodowych w sezonie zimowym. Na pełny cykl zlodzenia w reżimie lodowym rzeki składa się kilka faz powstawania i zaniku zjawisk lodowych. Najczęściej analizowanymi parametrami są daty początku i końca występowania zjawisk lub pokrywy lodowej oraz ich przebieg. Na czas trwania zjawisk lodowych i ich zaniku wpływają m.in. położenie geograficzne oraz warunki meteorologiczne, głównie temperatura powietrza, a także termika i chemizm wód [BELTAOS, PROWSE 2009; CAISSIE 2006].

Przeciętne terminy pojawiania się zjawisk lodowych na rzekach w Polsce, jak również terminy ich zaniku są bardzo zróżnicowane [PAWŁOWSKI i in. 2017]. Zjawiska lodowe najwcześniej występują w trzeciej dekadzie listopada (górny Dunajec i górny San), natomiast najpóźniej – w drugiej dekadzie stycznia, na rzekach w północnej i południowo-zachodniej Polsce [BĄCZYK, SUCHOŻEBRSKI 2016; GORACZKO, PAWŁOWSKI 2014; PAWŁOWSKI 2009]. Zanik zjawisk lodowych na rzekach w Polsce obserwuje się najczęściej od końca stycznia do końca marca. Położenie geograficzne rzeki warunkuje cechy jej ustroju hydrologicznego i termicznego, które mogą być modyfikowane przez oddziaływania antropogeniczne, np. dopływ zanieczyszczeń [TAKÁCS i in. 2014]. Częstość występowania zjawisk lodowych oraz ich natężenie różnicują się także ze względu na sposób i intensywność zasilania cieków, zmianę warunków hydraulicznych przepływu wód oraz cech morfologicznych związanych z układem koryta i doliny rzecznej. Duże znaczenie dla trwałości zjawisk lodowych na rzekach, zwłaszcza pojawienia i utrzymywania się stałej pokrywy lodowej, ma transfer energii cieplnej, który następuje między strumieniem powietrza a ośrodkiem wodnym oraz między osadami dennymi w korycie rzeczonym i wypełniającą je wodą [CAISSIE 2006]. Na reżim termiczny i lodowy rzek wpływają również czynniki lokalne, związane ze sposobem zagospodarowania doliny rzecznej i zlewni [GRAF 2015; 2018, ŁASZEWSKI, JELEŃSKI 2013; ŁUKASZEWICZ 2017b; WEBB, NOBILIS 2007; WIEJACZKA 2007]. Dopływ zanieczyszczeń, zwłaszcza termalnych, do rzeki powoduje wzrost temperatury jej wód, co znacznie ogranicza zamarzanie rzeki i utrzymywanie się zjawisk lodowych.

Wyniki raportów i badań prowadzonych w ostatnim 40-leciu na rzekach europejskich wykazują zmniejszenie częstości pojawiania się i czasu trwania zjawisk lodowych, zwłaszcza pokrywy lodowej [EEA 2012], co jest efektem wpływu zmian klimatycznych, szczególnie zwiększenia częstości występowania cieplejszych zim. Zaobserwowaną tendencję potwierdzają również badania zmian termiki wód rzecznych, które wykazały jej wzrost o około 1–3°C w ciągu ostatniego stulecia.

Zmiany w strukturze i czasie trwania zjawisk lodowych, ze względu na ich dużą wrażliwość na zmienność klimatu, mogą stanowić wyznacznik jego zmian [CAISSIE 2006; MARSZELEWSKI, PIUS 2016; TAKÁCS i in. 2014]. Poza tym informacje o zlodzeniu rzek mają wymiar praktyczny, m.in. w zakresie identyfikacji

i minimalizacji zagrożeń związanych z zatorami i powodziami zatorowymi [PAWŁOWSKI i in. 2017; WOŁOSZYN 2006]. Często stanowią one utrudnienie dla pracy urządzeń hydrotechnicznych regulujących przepływy i stany wody na rzekach. W następstwie zlodzenia rzeki może dochodzić również do zmiany warunków funkcjonowania określonych biocenoz, co wpływa w dużym stopniu na stan ekologiczny cieków [ALLAN, CASTILLO 2007].

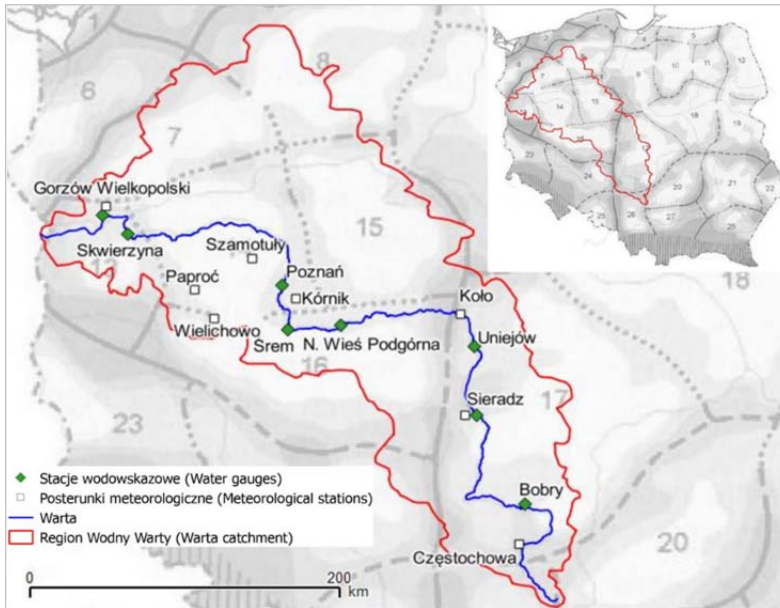
W artykule przedstawiono zróżnicowanie struktury i czasu trwania zjawisk lodowych na Warcie z uwzględnieniem wpływu temperatury powietrza, cech reżimu termicznego wód i oddziaływań antropogenicznych. Analizie poddano występowanie poszczególnych form lodu oraz liczbę cykli zlodzenia obejmującego: zamarzanie, zamarznięcie (pokrywa lodowa) i rozmarzanie (spływ lodu). Przeprowadzone badania miały na celu określenie tendencji zmian w występowaniu zjawisk lodowych na Warcie w ujęciu regionalnym i lokalnym.

OBSZAR BADAŃ

Analizę przebiegu zjawisk lodowych na Warcie przeprowadzono na odcinku między przekrojami Bobry (bieg górny) i Gorzów Wielkopolski (bieg dolny) – rysunek 1. Wytypowany fragment doliny reprezentuje typowe dla Warty przełomowe i pradolinne odcinki jej biegu, które różnią się między innymi: liczbą i charakterem zlewni dopływów oraz stopniem przekształcenia i zainwestowania doliny.

Górny bieg Warty obejmuje odcinek od źródeł rzeki do zmiany układu doliny z południkowego na równoleżnikowy w rejonie Koła–Konina, gdzie rzeka wpływa w Pradolinę Warszawsko-Berlińską (rys. 1). Początkowo Warta płynie tzw. Obniżeniem Górnej Warty [KONDRACKI 2009], następnie przepływa w kilku odcinkach przełomowych przez Wyżynę Wieluńską, wcinając się w teren na głębokość ponad 70 m. Środkowy bieg Warty reprezentuje jej pradolinny (Pradolina Warciańsko-Odrzańska) i przełomowy (Poznański Przełom Warty) fragment doliny, do połączenia których dochodzi w okolicach Śremu (rys. 1). W odcinku pradolinnym dolina Warty osiąga szerokość około 15 km, a jej dno zajmują głównie torfowiska. Odcinek przełomowy, który rozpoczyna się w Śremie, jest dość wąski (do kilku km) i wcięty w podłoże do 15–20 m. W rejonie Obornik następuje zmiana charakteru biegu Warty z przełomowego w równoleżnikowy (Pradolina Toruńsko-Eberswaldzka), którym rzeka płynie aż do ujścia do Odry.

Warta na badanym odcinku przepływa przez sześć regionów klimatycznych wyróżnionych przez WOSIA [2010] – rysunek 1, tabela 1. Regionalne różnice warunków klimatycznych są szczególnie widoczne ze względu na dużą rozciągłość południkową i równoleżnikową obszaru. W miarę przesuwania się w kierunku wschodnim w regionie wodnym Warty obserwuje się wyższe amplitudy temperatury powietrza oraz dłuższą i chłodniejszą zimą.



Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań i posterunków obserwacyjnych IMGW-PIB na tle regionalizacji klimatycznej WOSIA [2010]; numery na mapce = regiony klimatyczne; źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Location of the test area and arrangement of measurement stations of the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute (IMGW-PIB) against the backdrop of WoŚ [2010] climatic regionalization, numbers on the map = climatic regions; source: own study

Region Środkowopolski (17), wyodrębniony jako wyraźnie różniący się od pozostałych, cechuje się najniższą średnią temperaturą powietrza zimą, która wynosi $-1,5^{\circ}\text{C}$, oraz najniższą temperaturą powietrza w styczniu (tab. 1). Najdłuższym czasem trwania termicznej zimy charakteryzują się regiony Środkowopolski (79 dni) i Wielkopolski Wschodni (75 dni). W porównaniu z czasem trwania w pozostałych regionach jest to o 2–4 tygodnie dłużej. Pomiędzy regionami zauważalne są różnice w zakresie średniej liczby dni z mrozem. W stosunku do regionu Środkowopolskiego (17) we wszystkich przypadkach, poza regionem Wielkopolskim Zachodnim (15), liczba tych dni jest mniejsza o około tydzień (tab. 1). Najdłuższym czasem trwania klimatycznej zimy, o około 6–14 dni dłuższym niż w pozostałych regionach, cechuje się region klimatyczny Wielkopolski Wschodni (15).

Na analizowanym odcinku Warty obserwuje się regionalne zróżnicowanie cech reżimu hydrologicznego – od średnio po silnie wykształcony reżim niwalny [WRZESIŃSKI 2013]. Warta w swoim górnym biegu (rys. 1) cechuje się reżimem niwalnym średnio wykształconym. Termin wezbrań w górnym odcinku jest względnie stabilny i przypada na okres zimowo-wiosenny (I–IV) i wiosenny (III–IV). Na odcinku od Nowej Wsi Podgórznej do Poznania (rys. 1) rzeka charakteryzu-

Tabela 1. Średnie roczne wartości wybranych elementów pogody w regionach klimatycznych Regionu Wodnego Warty w latach 1951–2000 według WOSIA [2010]**Table 1.** The average annual values of the selected weather elements in climatic the Warta River water regions in the years 1951–2000 according to WoŚ [2010]

Parametr Parameter	Region Region						średnia ¹⁾ average ¹⁾
	7	13	14	15	16	17	
Średnia temperatura powietrza zimą Average air temperature in winter	-0,7	-0,4	-0,7	-1,1	-0,9	-1,5	-0,8
Średnia temperatura powietrza w styczniu Average air temperature in January	-1,5	-1,2	-1,4	-2,0	-1,5	-2,5	-1,7
Średnia długość trwania termicznej zimy ($t < 0^{\circ}\text{C}$) Average duration of thermal winter ($t < 0^{\circ}\text{C}$)	64	50	61	75	66	79	66
Liczba dni z mrozem Number of days with frost	32	32	34	40	33	40	35
Średnia długość klimatycznej zimy Average length of the climatic winter	127	125	131	139	133	133	131

Objaśnienia: Explanations: 7 = Pomorski Zachodni, 13 = Lubuski, 14 = Wielkopolski Zachodni, 15 = Wielkopolski Wschodni, 16 = Wielkopolski Południowy, 17 = Środkowopolski (numery oznaczone na rys. 1 the numbers marked in the Figure 1).

¹⁾ Wartości uśrednione na podstawie średnich z regionów 7, 13, 14, 15, 16 i 17 w latach 1951–2000 wg WOSIA [2010].

¹⁾ The averaged values based on the average values from regions 7, 13, 14, 15, 16 and 17 in the years 1951–2000 according to WoŚ [2010].

je się reżimem niwalnym silnie wykształconym, w którym średnia wartość przepływu miesiąca wiosennego stanowi ponad 180% średniego przepływu rocznego rzeki. Rzeka w swoim środkowym biegu jest zasilana wodami podziemnymi w 40–60% [WRZESIŃSKI 2013]. W odcinku pradolinowym, zlokalizowanym między Skwierzyną a Gorzowem Wielkopolskim, Warta cechuje się reżimem niwalnym średnio wykształconym, a udział wód podziemnych w jej zasilaniu przekracza 60%.

Region Wodny Warty charakteryzuje się zróżnicowaną antropopresją (tab. 2), która jest wypadkową wpływu różnych form działalności gospodarczej na stan zasobów wodnych, m.in. użytkowania terenu, zabudowy hydrotechnicznej, zrzutów ścieków, a także poboru wód powierzchniowych i podziemnych [ILNICKI i in. 2015; RZGW 2007].

Na Warcie poniżej Sieradza znajduje się duży zbiornik retencyjny Jeziersko o powierzchni 42,3 km² z zaporą w Skęczniewie, który zbudowany został w 1986 r., a pełny zakres piętrzenia uzyskano w 1992 r. [GORĄCZKO, PAWŁOWSKI 2014]. Zbiornik wykorzystuje się głównie do celów energetycznych i rolniczych. Odcinek środkowego biegu Warty jest poddany najsilniejszej wypadkowej presji antropogenicznej [RZGW 2007], która związana jest z działalnością eksploatacyjną kopalni węgla brunatnego w okolicach Konina i Turku oraz oddziaływaniem aglomeracji poznańskiej (tab. 2). Funkcjonowanie kopalni, zwłaszcza odkrywkowych, wpływa na zaburzenie lokalnych warunków krążenia wód powierzchniowych,

Tabela 2. Najsilniejsza presja antropogeniczna na poszczególnych odcinkach Warty**Table 2.** The strongest anthropogenic pressure on individual sections of the Warta River

Odcinek biegu rzeki Course of the river	Stacja wodowskazowa Water gauge	Najsilniejsza presja ¹⁾ The strongest pression ¹⁾
Górny Upper	Bobry	zrzuty ścieków discharges of sewage
	Sieradz	zabudowa hydrotechniczna hydrotechnical structures
	Uniejów	zabudowa hydrotechniczna hydrotechnical structures
		pobór wody powierzchniowej surface water intake
Środkowy Middle	Uniejów	użytkowanie terenu land use
		zrzuty ścieków discharges of sewage
	Nowa Wieś Podgórna	użytkowanie terenu land use
		zabudowa hydrotechniczna hydrotechnical structures
	Śrem	użytkowanie terenu land use
		pobór wody powierzchniowej surface water intake
Dolny Bottom	Poznań	zrzuty ścieków discharges of sewage
		użytkowanie terenu land use
	Skwierzyna	pobór wody powierzchniowej surface water intake
		zabudowa hydrotechniczna hydrotechnical structures
Gorzów Wielkopolski	zabudowa hydrotechniczna hydrotechnical structures	
	użytkowanie terenu land use	
		zrzuty ścieków discharges of sewage

¹⁾ Dane na podstawie pozwoleń wodnoprawnych: 1997–2005; źródło: RZGW [2007].

¹⁾ Data based on water law permits: 1997–2005; source: RZGW [2007].

wych i podziemnych. Przejawem działalności górniczej w tej części zlewni Warty są m.in. zmiany naturalnego przebiegu cieków i cech reżimu hydrologicznego, gromadzenie wód kopalnianych w zbiornikach retencyjnych, a także pobór eksploatacyjny wód i zrzut zanieczyszczeń, co prowadzi do zmian jakości wód [RZGW 2007].

W zasięgu aglomeracji poznańskiej presja antropogeniczna przejawia się głównie poprzez specyfikę użytkowania terenu i w efekcie wzrost wskaźnika urbanizacji powyżej 50% [GRAF 2015] oraz intensywny pobór wód powierzchniowych na cele komunalne i duże zrzuty ścieków o charakterze bytowym. Dolny odcinek biegu rzeki charakteryzuje się umiarkowaną wypadkową presją antropogeniczną [RZGW 2007] – tabela 2. Najsilniejszą presją na tym fragmencie doliny Warty wywiera zabudowa hydrotechniczna, której głównym zadaniem jest regulacja przepływu oraz minimalizowanie skutków powodzi. Istotny jest również wpływ zmian użytkowania terenu w Gorzowie Wielkopolskim. Wody powierzchniowe,

poza strefą miejską, wykorzystywane są w tym rejonie przede wszystkim do napełniania stawów rybnych i nawodnień rolniczych.

MATERIAŁ ŹRÓDŁOWY I METODY BADAŃ

W analizie struktury i uwarunkowań przebiegu zjawisk lodowych na Warcie wykorzystano dobowe obserwacje zjawisk lodowych i pomiary temperatury wód rzecznych rejestrowanych w półroczu zimowym roku hydrologicznego (od 1 XI 1990 r. do 30 IV 2010 r.) pochodzące z ośmiu posterunków pomiarowych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB) zlokalizowanych wzdłuż biegu rzeki (rys. 1). Dodatkowo analizowano dobową zmienność temperatury powietrza ze stacji meteorologicznych IMGW-PIB oraz jej wpływ na przebieg temperatury wód i zjawisk lodowych na Warcie. Do badań przyjęto okres 1991–2010, obejmujący w sumie 20 pełnych sezonów zimowych (1 XI–30 IV), co podyktowane było dostępnością i jednorodnością danych dla wszystkich posterunków obserwacyjnych. Pozyskane dane są zweryfikowane i poddane kontroli jakości, a w ocenie ich jednorodności wykorzystany został test Alexanderssona. Uwzględniono także zmienność wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO), jednego z elementów wpływających na zmianę temperatury powietrza. Wykorzystano w tym przypadku wskaźnik Jonesa, obliczany jako różnica ciśnienia atmosferycznego między Gibraltarem a południowo-zachodnią Islandią [NIEDŹWIEDŹ 2002]. Dane dotyczące wskaźnika NAO pozyskano z bazy danych National Weather Service.

W celu określenia wpływu czynników antropogenicznych, modyfikujących przebieg zjawisk lodowych na Warcie w ujęciu lokalnym, uwzględniono najsilniejsze presje antropogeniczne na poszczególnych odcinkach rzeki, wykorzystując bazę danych Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej w Poznaniu – RZGW (obecnie Państwowe Gospodarstwo Wodne Wody Polskie) [RZGW 2007].

Analizując warunki tworzenia się zjawisk lodowych na Warcie, określono w przekroju każdego posterunku strukturę zjawisk lodowych, czyli występowanie poszczególnych form lodu w obrębie ich faz. Rozpatrywano fazę zamarzania rzeki, reprezentowaną przez śryż i lód brzegowy, fazę zamarznięcia, czyli utrzymywania się pokrywy lodowej, oraz fazę rozpadu pokrywy (rozpad i spływ lodu), w której występują kra i zator. Wykorzystując podstawowe statystyki opisowe, analizowano dominującą formę lodu oraz czas trwania pokrywy lodowej w obrębie cykli zlodzenia. Częstość występowania zjawisk lodowych na rzekach rozpatrywano jako sumy dni z zaobserwowanym zjawiskiem lodowym w chłodnym półroczu roku hydrologicznego (XI–IV). Czas trwania zjawisk lodowych w poszczególnych latach określono jako średnią sumę dni z zaobserwowanym zjawiskiem w profilach wszystkich stacji wodowskazowych. Występowanie zjawisk lodowych na rzece rozpatrywano również w podziale na dekady.

Zmienność form i czas trwania zjawisk lodowych oraz ogólną tendencję zaobserwowaną w ich przebiegu w poszczególnych latach 1991–2010 przedstawiono w każdym z posterunków wodowskazowych na tle zmienności średniej temperatury wody i powietrza w zimowym półroczu roku hydrologicznego. Uwzględniono dane ze stacji meteorologicznej znajdującej się w sąsiedztwie posterunku wodowskazowego (rys. 1). Dane i informacje dotyczące doboru stacji meteorologicznej do określonego posterunku wodowskazowego zawarte zostały w objaśnieniach na rysunkach 3. i 5.

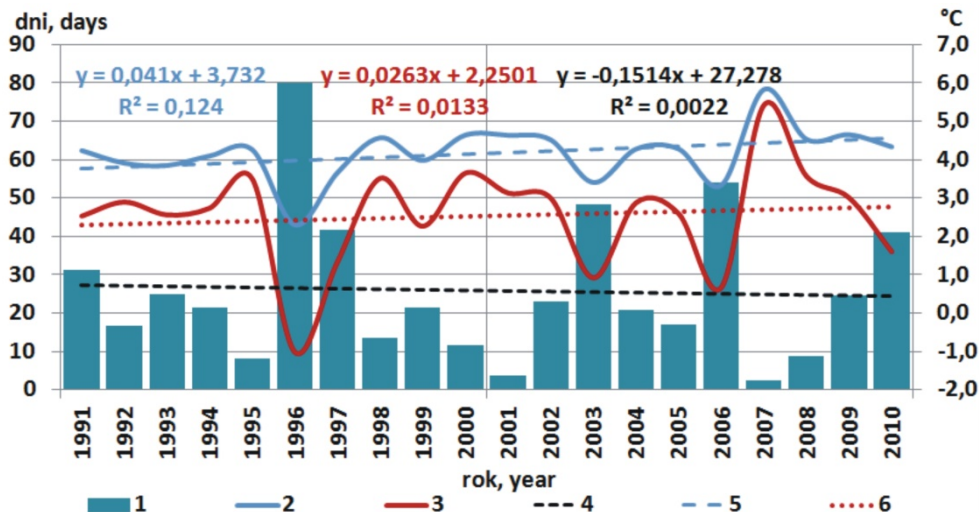
Do badania zależności między poszczególnymi parametrami zastosowano metodę regresji liniowej. Na podstawie przeprowadzonych badań wyodrębniono okresy i miejsca najdłuższego występowania zjawisk lodowych na rzece oraz scharakteryzowano ich przebieg. Określono wpływ zmian temperatury powietrza oraz trendów tych zmian na zmienność termiki wód w rzekach, a także charakterystyki zjawisk lodowych (czas trwania cyklu zlodzenia oraz poszczególnych form lodowych na rzekach). W ocenie siły trendu wykorzystano test trendu Manna–Kendalla, co umożliwiło przybliżone określenie jego zmiany w całym okresie obserwacji.

Zbadano również wpływ zmiennych i korelacje między regionami klimatycznymi i ich cechami a częstością zjawisk lodowych rejestrowanych na stacjach wodowskazowych znajdujących się w poszczególnych regionach. Analizę przeprowadzono w odniesieniu do całego roku, jak i trzech miesięcy zimowych (grudnia, stycznia i lutego). W tym celu zastosowano test U Manna–Whitneya jako nieparametryczną alternatywę dla testu *t*-Studenta, określającego zależność między regionem ujętym całościowo (jako pojedyncza zmienna ilościowa) a częstością zjawisk. Przeanalizowano także za pomocą korelacji *r*-Pearsona zależność pomiędzy zmiennymi ilościowymi reprezentowanymi przez poszczególne cechy regionu klimatycznego a częstością występowania zjawisk lodowych.

WYNIKI

Zgodnie z analizą danych ze wszystkich przekrojów obserwacyjnych przebieg i czas trwania zjawisk lodowych na Warcie w okresie 1991–2010 był zróżnicowany. Najdłużej zjawiska lodowe utrzymywały się w 1996 r. oraz w latach 1997, 2003 i 2006, natomiast najkrótszy czas ich trwania zarejestrowano w latach 1995, 2001 i 2007 (rys. 2). Na tle zmienności średnich rocznych wartości temperatury powietrza i wody (1991–2010) stwierdzono ujemny trend czasu trwania zjawisk lodowych na rzece.

Porównanie dat początku zjawisk lodowych na analizowanym odcinku rzeki wykazało, że najwcześniej notowano je w rozpatrywanym okresie w trzeciej dekadzie grudnia (35–45% ogólnej liczby obserwacji), a najpóźniej w pierwszej dekadzie stycznia. PAWŁOWSKI i in. [2017], na podstawie danych za lata 1981–2010,

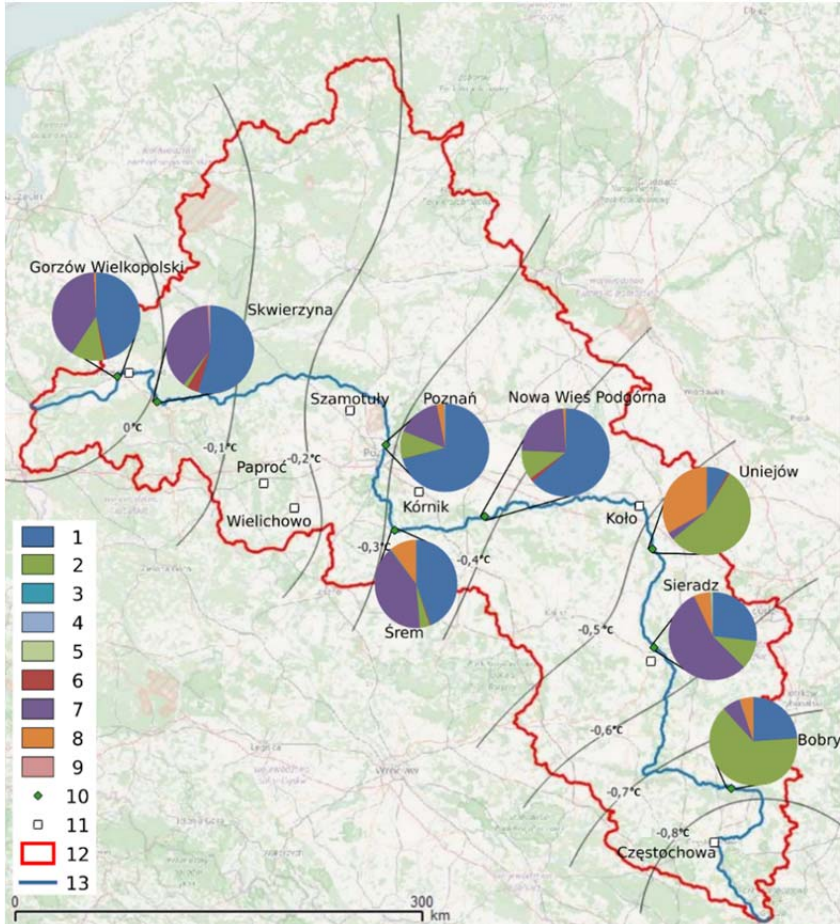


Rys. 2. Tendencje zmian czasu trwania zjawisk lodowych na Warcie na tle zmienności średnich wartości temperatury powietrza i wody w półroczu zimowym (°C) w okresie 1991–2010; 1 = czas trwania zjawisk lodowych, 2 = średnia temperatura wody, 3 = średnia temperatura powietrza, 4 = trend liniowy średniej temperatury wody, 5 = trend liniowy średniej temperatury powietrza, 6 = trend liniowy średniej liczby dni ze zjawiskiem lodowym; uwaga: uwzględniono dane ze wszystkich stacji wodowskazowych na rzece; źródło: wyniki własne

Fig. 2. Trends of changes in the duration of ice phenomena on the Warta River against the backdrop of the variability of the average air and water temperature (°C) in 1991–2010; 1 = duration of ice phenomena, 2 = the average water temperature, 3 = the average air temperature, 4 = linear trend of the average water temperature, 5 = linear trend of the average air temperature, 6 = linear trend of the average number of days with ice phenomena; note: data from all the water gauge stations on the Warta River have also been taken into consideration; source: own study

również określili dla tego rejonu przeciętny początek zjawisk lodowych na koniec grudnia. Ostatnia faza zlodzenia na Warcie (pochód lodu) rejestrowana była w okresie badań najczęściej w drugiej dekadzie lutego. Data końca zjawisk lodowych na rzece przypadła na trzecią dekadę lutego (25–30% obserwacji). Najwięcej dni z odnotowanymi zjawiskami lodowymi przypadło na styczeń (41,4% obserwacji), a następnie luty (28,0%) i grudzień (22,5%). Spośród wszystkich form lodu pojawiających się na rzece najczęściej występował śryż (46,1% udziału w strukturze zjawisk) oraz pokrywa lodowa (30,3%), co potwierdza, że Warta, ze względu na uwarunkowania termiczne, stopień uregulowania oraz zmienność charakteru koryta i prędkość nurtu, cechuje się stosunkowo wysoką śryżogennością [GOŁEK 1964].

Pełny cykl zlodzenia rzeki, obejmujący wszystkie trzy jego fazy, był w badanym okresie zjawiskiem bardzo rzadkim na Warcie (rys. 3). Ponadto stwierdzono znaczne zróżnicowanie struktury i czasu trwania zjawisk lodowych na rzece w analizowanych przekrojach.



Rys. 3. Struktura zjawisk lodowych na Warcie na tle średniej temperatury powietrza w półroczu chłodnym (w podziale na stacje wodowskazowe) w okresie 1991–2010: 1 = śryż, 2 = lód brzegowy, 3 = zator lodowy, 4 = lód brzegowy i kra, 5 = zator śryżowy, 6 = kra, 7 = pokrywa lodowa, 8 = lód brzegowy i śryż, 9 = śryż i kra, 10 = stacje wodowskazowe, 11 = posterunki meteorologiczne, 12 = Region Wodny Warty, 13 = Warta; źródło: wyniki własne

Fig. 3. Structure differentiation of ice phenomena on the Warta River on the base of average air temperature in the winter semi-annual period (division into water gauges) in the period 1991–2010: 1 = frazil ice, 2 = stranded ice, 3 = ice jam, 4 = stranded ice and floe, 5 = frazil ice jam, 6 = ice floe, 7 = ice cover, 8 = stranded ice and frazil ice, 9 = frazil ice and floe, 10 = water gauges, 11 = meteorological stations, 12 = the Warta River Water Region, 13 = the Warta River; source: own study

W przekroju Bobry (górnny bieg rzeki – rys. 1) w omawianym okresie zarejestrowano znacznie większą liczbę dni z lodem brzegowym i śryżem niż w innych przekrojach, co stanowiło w sumie ponad 80% przypadków liczby dni ze zjawiskami lodowymi (rys. 3). Dni z zaobserwowaną pokrywą lodową na tym odcinku

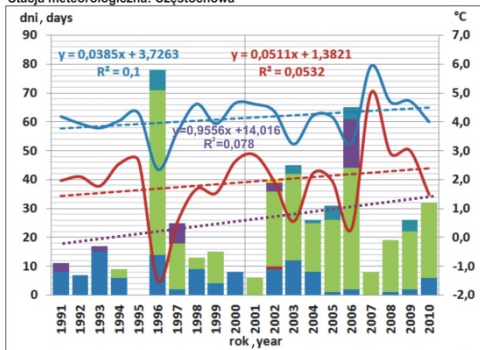
rzeki stanowiły 8% wszystkich dni, w których odnotowano występowanie zjawisk lodowych. W Sieradzu, który znajduje się powyżej zbiornika Jeziorsko, zamarzanie rzeki (pierwsza faza cyklu) objęło 40% czasu zlodzenia, natomiast czas utrzymywania się stałej pokrywy lodowej stanowił 50% czasu trwania zjawisk lodowych. Lokalizacja posterunku Sieradz mogła przyczynić się do spowolnienia odpływu na Warcie i wystąpienia zatorów śryżowych (1 I 2006, 11–12 I 2010) – rysunek 3. W czasie ich trwania stan wody na rzece wyniósł odpowiednio 354 cm i 365–369 cm, co stanowiło wartość o 100–110 cm wyższą od średniego rocznego stanu Warty rejestrowanego w omawianym przekroju w okresie 1991–2010. Poniżej zbiornika Jeziorsko, w przekroju Uniejów, zaobserwowano na Warcie istotną zmianę w strukturze zjawisk lodowych. Podobnie jak na stacji Bobry, największy udział w strukturze (50%) miał lód brzegowy z pierwszej fazy cyklu, czyli zamarzania rzeki, a także zjawiska lodowe z fazy rozpadu (40%).

W środkowym biegu Warty (rys. 1), w odcinku Pradoliny Warszawsko-Berlińskiej (posterunek Nowa Wieś Podgórna), zanotowano w strukturze zjawisk lodowych znaczny udział śryżu i stałej pokrywy lodowej (rys. 3). Okres zamarzania rzeki stanowił ok. 60% całkowitego czasu zlodzenia. Na Warcie w Śremie, w strefie zmiany pradolinowego odcinka doliny w odcinek przełomowy, udział pokrywy lodowej wyniósł około 45% czasu trwania zjawisk kosztem skrócenia pozostałych jego faz.

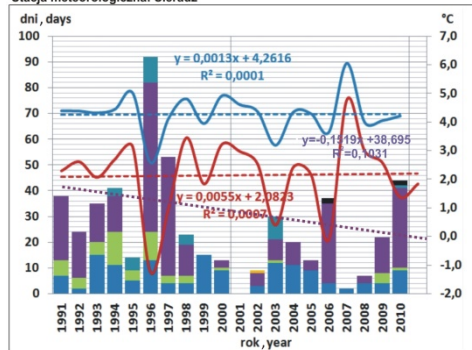
W odcinku przełomowym Warty w rejonie Poznania pokrywa lodowa, łącznie w analizowanym okresie, trwała krócej (w sumie 95 dni, średnio 5 dni w roku) w przeciwieństwie do przekrojów w Śremie (w sumie 270 dni, średnio 14 dni) i Nowej Wsi Podgórznej (w sumie 163 dni, średnio 8 dni w roku) – rysunek 3. Wśród zjawisk lodowych, rejestrowanych na Warcie w środkowym odcinku jej biegu, występował najczęściej śryż, średnio przez 22 dni (63,5%) w całym okresie obserwacji. Na Warcie w Śremie zanotowano, dość rzadko pojawiającą się na badanej rzece, krę lodową oraz zator lodowy, który wystąpił w dniach od 16 I do 18 I 2003 r. Omawiany odcinek biegu Warty jest predestynowany do występowania zatorów lodowych [JOKIEL, BARTNIK 2017].

W obrębie kolejnego, pradolinowego odcinka doliny (Pradolina Toruńsko-Eberswaldzka) – rysunek 1., w strukturze zjawisk lodowych na rzece dominującą składową był śryż (ok. 55% zjawisk) i pokrywa lodowa (ok. 40% zjawisk). W Skwierzynie pojawiła się na rzece, rzadko obserwowana w pozostałych posterunkach, kra. W całym 20-leciu obserwacji kra lodowa występowała w profilu Skwierzyna przez 32 dni, co stanowiło 4,4% wszystkich obserwowanych na tej stacji dni, w których występowały zjawiska lodowe. Na całej Warcie kra lodowa występowała łącznie przez 55 dni, średnio 3 dni w badanym okresie, co stanowiło 1,2% obserwacji. Na Warcie w Gorzowie Wielkopolskim struktura zjawisk lodowych była zbliżona do struktury zjawisk w rejonie Skwierzyny, jednak odnotowano nieznacznie większy udział liczby dni z lodem brzegowym kosztem czasu trwania pokrywy lodowej (rys. 3).

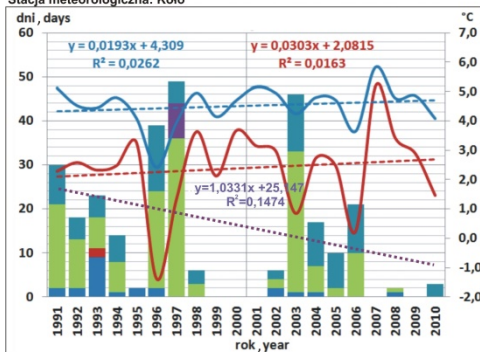
Wodowskaz: Bobry
Stacja meteorologiczna: Częstochowa



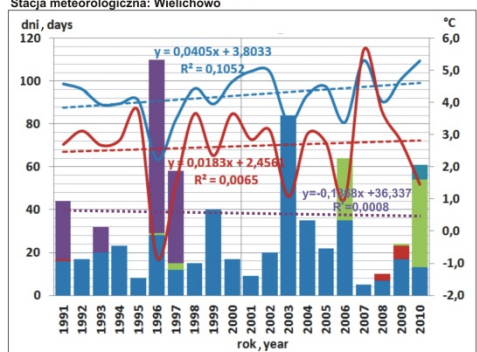
Wodowskaz: Sieradz
Stacja meteorologiczna: Sieradz



Wodowskaz: Uniejów
Stacja meteorologiczna: Koło



Wodowskaz: Nowa Wieś Podgórna
Stacja meteorologiczna: Wielichowo



1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1314

Rys. 4. Struktura zjawisk lodowych i czasu ich występowania w przekrojach wodowskazowych na Warcie na tle średniej temperatury powietrza i wody w półroczu zimowym (°C) w latach 1991–2010: 1 = śryż, 2 = kra, 3 = lód brzegowy, 4 = pokrywa lodowa, 5 = zator lodowy, 6 = lód brzegowy i śryż, 7 = lód brzegowy i kra, 8 = śryż i kra, 9 = zator śryżowy, 10 = średnia temperatura wody, 11 = średnia temperatura powietrza, 12 = trend liniowy średniej temperatury wody, 13 = trend liniowy średniej temperatury powietrza; źródło: wyniki własne

Analizując cały badany odcinek Warty pod kątem czasu trwania i struktury zjawisk lodowych w kolejnych latach badanego okresu, zarejestrowano istotne różnice między górnym odcinkiem, reprezentowanym przez posterunki Bobry, Sieradz i Uniejów, a pozostałymi odcinkami (rys. 4). Najmniej dni ze zjawiskami lodowymi wystąpiło na odcinku rzeki pomiędzy przekrojami Bobry i Uniejów (przeciętnie od 14 do 24 dni). Od Nowej Wsi Podgórnej średnia liczba dni ze zjawiskami wzrastała w kierunku ujścia i przekroczyła 30 dni (w okresie 1991–2000 zjawiska trwały średnio 36 dni), a w Skwierzynie nawet 35 dni. Podobnie było także w obu analizowanych dekadach, przy czym dłuższy czas trwania zjawisk na Warcie zaobserwowano w okresie 1991–2000, z wyjątkiem posterunków Bobry i Poznań, w których średnia liczba dni ze zjawiskami lodowymi wzrosła w drugim

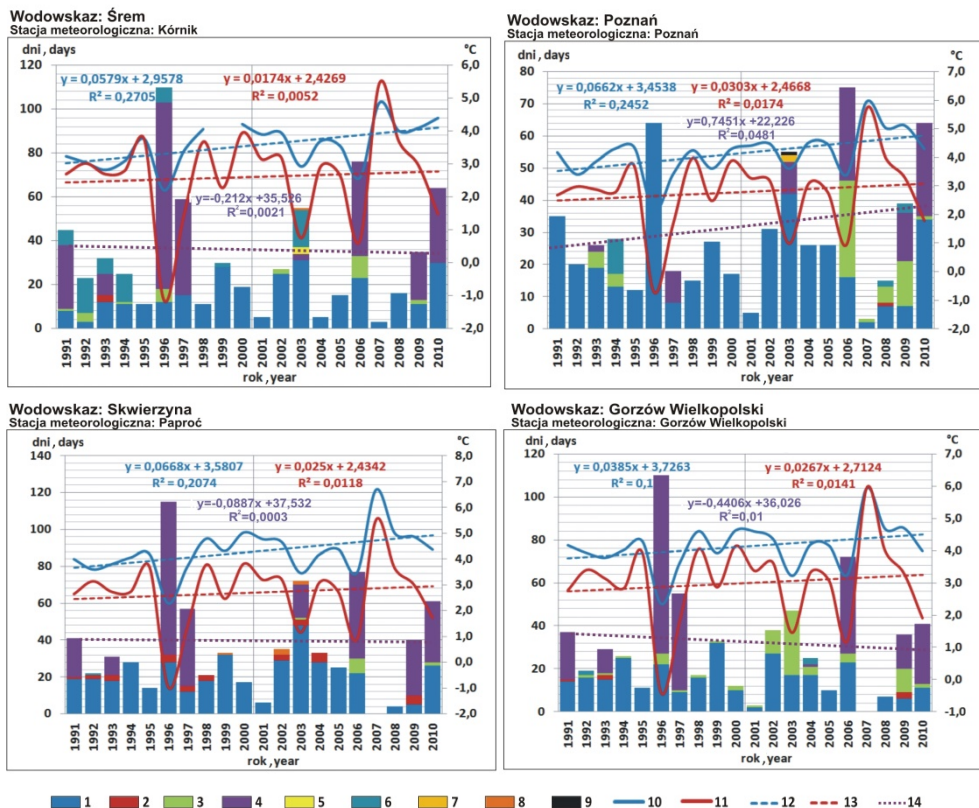


Fig. 4. The structure and duration of ice phenomena in water gauge cross-sections on the Warta River against the backdrop of average air and water temperature ($^{\circ}\text{C}$) in the cool half-year; in period 1991–2010; 1 = frazil ice, 2 = ice floe, 3 = stranded ice, 4 = ice cover, 5 = ice jam, 6 = stranded ice and frazil ice, 7 = stranded ice and ice floe, 8 = frazil ice and ice floe, 9 = frazil ice jam, 10 = the average water temperature, 11 = the average air temperature, 12 = linear trend of the average water temperature, 13 = linear trend of the average air temperature; source: own study

dziesięcioleciu badanego okresu. W górnym biegu rzeki, jak również w Poznaniu, często notowano brak pokrywy lodowej. Miało to miejsce zwłaszcza w pierwszym dziesięcioleciu analizowanego okresu, mimo że w tym czasie wystąpił szczególnie mroźny rok 1996, w którym na Warcie w większości posterunków zaobserwowano największą częstość występowania zjawisk lodowych o zróżnicowanej strukturze. Kolejnymi latami, które cechował długi czas trwania zjawisk lodowych, były 1997 (z wyjątkiem posterunków Bobry i Poznań), 2003 i 2010. Zaobserwowane zmiany nie uwidoczniły się jednak we wszystkich przekrojach (rys. 4).

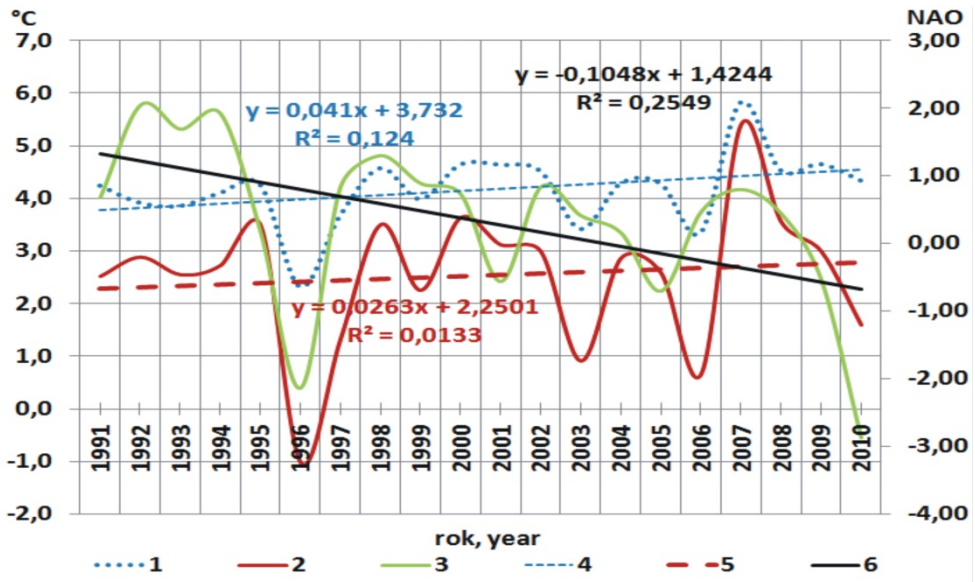
W badanym okresie dla Warty charakterystyczna była przewaga czasu trwania zjawisk lodowych z pierwszej fazy zamarzania rzeki (sryż, lód brzegowy) w stosunku do czasu trwania stałej pokrywy lodowej. Wyjątek stanowiły posterunki, na których okres występowania stałej pokrywy lodowej na rzece wydłużył się (Sie-

radz, Śrem, Skwierzyna, Gorzów Wlkp.) – rysunek 4. Jest to typowa sytuacja dla rzek nizinnych, w których faza rozbudowy pokrywy lodowej, ze względu na niewielkie przepływy i spadki, trwa najdłużej [GOŁEK 1957; GRZEŚ 1991].

DYSKUSJA

Na podstawie przeprowadzonej analizy można stwierdzić, że w okresie od 1991 do 2010 r. czas trwania zjawisk lodowych na Warcie skrócił się średnio o 7 dni (analiza danych ze wszystkich stacji wodowskazowych). Tendencja ta spowodowana była głównie wzrostem temperatury powietrza w półroczu zimowym, co determinowało podwyższenie temperatury wody w rzece (rys. 5).

Potwierdzają to wyniki badań świadczące o wysokim stopniu korelacji między temperaturą powietrza a temperaturą wody. Wykazano także istotność zmian



Rys. 5. Zmienność temperatury powietrza i wody w Warcie na tle zmienności wskaźnika Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO) w chłodnym półroczu roku hydrologicznego w latach 1991–2010; 1 = średnia temperatura wody, 2 = średnia temperatura powietrza, 3 = średni indeks Jonesa (NAO), 4 = trend liniowy średniej temperatury powietrza, 5 = trend liniowy średniej temperatury wody; uwaga: uwzględniono dane ze wszystkich stacji wodowskazowych na rzece; źródło: wyniki własne

Fig. 5. Variability of air and water temperature in the Warta River against the backdrop of phase variation of the North Atlantic Oscillation (NAO) using the Jones' index in the cool half-year of the hydrological year in period 1991–2010; 1 = the average water temperature, 2 = the average air temperature, 3 = the average Jones' index (NAO), 4 = linear trend of the average water temperature, 5 = linear trend of the average air temperature; note: data from all the water gauge stations on the Warta River have also been taken into consideration; source: own study

w trendach analizowanych parametrów. Analizując ogólny trend pojawiający się w rozkładzie temperatury powietrza i wody, stwierdzono ścisłą zależność tych dwóch parametrów, potwierdzającą ich bezpośredni wpływ na czas trwania zjawisk lodowych na rzece.

Podobne zależności można obserwować, analizując stopień regresji na poszczególnych stacjach. Zauważalna jest też wyraźna, istotna statystycznie, zależność rozkładu analizowanych zmiennych (tab. 3). W latach 1991–2010 średnia roczna temperatura wody w Warcie wzrosła w ciągu dwóch dziesięcioleci o $0,4^{\circ}\text{C}$, z jednoczesnym zarejestrowanym wzrostem średniej rocznej temperatury powietrza o $0,1^{\circ}\text{C}$. Przyrost procentowy pozytywnej fazy Oscylacji Północnoatlantyckiej (NAO), interpretowanej w pracy poprzez wskaźnik Jonesa, mógł mieć wpływ na podwyższenie temperatury powietrza i wody w zimowym półroczu roku hydrologicznego (rys. 5), co potwierdzają przeprowadzone analizy statystyczne. Zarówno współczynnik korelacji, jak i stopień regresji, obliczany dla zależności między rozkładem temperatury powietrza a przebiegiem Oscylacji Północnoatlantyckiej w różnych fazach, wykazują pewną istotność statystyczną. Jest ona znacznie wyższa, jeśli przyjmie się w analizie krótszy okres badań, a mianowicie od początku grudnia do końca lutego każdego sezonu zimowego w roku hydrologicznym (tab. 4).

Zaobserwowano także określoną zależność między zmiennością fazową Oscylacji Północnoatlantyckiej a poszczególnymi zmiennymi, także w dłuższym okresie nie jest ona jednak aż tak znacząca. W pracy, dokonując wyboru okresu badań,

Tabela 3. Wybrane charakterystyki i zestawienia statystyczne analizowanych parametrów

Table 3. The selected characteristics and statistical juxtapositions of the analyzed parameters

Okres Period	Wartość współczynnika na stacji hydrologicznej/ stacji meteorologicznej The value of the coefficient at the hydrological station / meteorological station							
	Gorzów Wlkp./ Gorzów Wlkp.	Skwie- rzyna/ Paproć	Poznań/ Poznań	Śrem/ Kórnik	Nowa Wiś Podgórna/ Wielicho- wo	Uniejów/ Koło	Sieradz/ Sieradz	Bobry/ Często- chowa
Współczynnik korelacji r (relacja temperatura powietrza z temperaturą wody) Correlation coefficient r (relation between air temperature and water temperature)								
XI–IV	0,95	0,88	0,86	0,76	0,72	0,89	0,91	0,95
XII–II	0,89	0,87	0,73	0,72	0,93	0,75	0,88	0,76
Współczynnik regresji R^2 (relacja liniowa temperatury powietrza z temperaturą wody) Regression coefficient R^2 (relation between air temperature and water temperature)								
XI–IV	0,89	0,78	0,75	0,27	0,52	0,79	0,82	0,90
XII–II	0,69	0,76	0,53	0,52	0,86	0,36	0,78	0,58

Objaśnienia: okres XI–IV = półroczje zimowe, okres XII–II = trzy miesiące półroczja zimowego.

Explanations: period XI–IV = winter half-year, period XII–II = three months of the winter half-year.

Źródło: opracowanie własne. Source: own study.

Tabela 4. Współczynnik korelacji i regresji dla relacji NAO z temperaturą powietrza i wody**Table 4.** The correlation and regression coefficient of the relation with NAO, and air and water temperatures

Okres Period	Współczynnik Coefficient	
	korelacji correlation	regresji regression
	Relacja NAO – temperatura powietrza Relation with NAO and air temperature	
XI–IV	0,39	0,15
XII–II	0,65	0,42
	Relacja NAO – temperatura wody Relation with NAO and water temperature	
XI–IV	0,17	0,14
XII–II	0,37	0,03

Objaśnienia jak pod tab. 3. Explanations as in Tab. 3.

Źródło: opracowanie własne. Source: own study.

sugerowano się terminami występowania zjawisk lodowych na Warcie, które pojawiały się już w okresie wcześniejszym, np. w końcu listopada, dlatego też do szczegółowych analiz wybrano okres dłuższy, czyli chłodne półrocze roku hydrologicznego. Duże wartości wskaźnika Jonesa wskazują na zwiększenie aktywności cyklonalnej i jej wpływ na złagodzenie zim na badanym obszarze. Wzrost wskaźnika pokrywa się ze wzrostem średniej temperatury powietrza w okresach zimowych (rys. 5), co ma z kolei wpływ na zmianę termiki wód Warty w całym badanym okresie. Dodatnia faza NAO przyczynia się zazwyczaj do wystąpienia anomalii termicznych w chłodnym półroczu roku hydrologicznego.

Przeprowadzone przez KORNAŚ [2014] badania zjawisk lodowych na Warcie w Poznaniu w okresie 1960–2014 wykazały wpływ czynników klimatycznych na skrócenie czasu ich trwania ze 118 dni do 75 dni. Istotne zmiany w tym zakresie miały miejsce po 1987 roku. GRAF [2015], badając cechy reżimu termicznego wód Warty w profilu Nowa Wieś Podgóra – Śrem – Poznań, wykazała, że w okresie 1991–2010 zarówno średnia roczna temperatura powietrza na stacji Poznań-Ławica, jak i temperatura wody w Warcie miały tendencję wzrostową. Wzrost średniej rocznej temperatury wody w Warcie w okresie 2001–2010 w stosunku do okresu 1991–2000 wyniósł 0,5–0,7°C.

Warunki atmosferyczne są determinantą występowania zjawisk lodowych, co potwierdziły wyniki analizy, świadczące o istotnym statystycznie związku między regionem klimatycznym a występowaniem zjawisk lodowych na Warcie. Najbardziej istotne powiązanie wykazano w przypadku takich zjawisk, jak śrżyż i lód brzegowy ($p < 0,01$), mniej istotne w odniesieniu do kry i pokrywy lodowej ($p < 0,05$), natomiast w pozostałych przypadkach nie stwierdzono istotnego statystycznie związku między zmiennymi, co mogło być spowodowane niewielką liczbą obserwacji, uniemożliwiających przeprowadzenie testu.

Analizując poszczególne parametry klimatyczne w wieloletniu i ich korelacje z częstością poszczególnych zjawisk lodowych, wykazano, że silnie pozytywna

relacja istnieje między występowaniem sryżu a średnią temperaturą powietrza w miesiącach zimowych i średnią temperaturą powietrza w styczniu ($r > 0,7$), natomiast silny ujemny związek ($r < -0,7$) potwierdzono między występowaniem sryżu a średnią długością trwania termicznej zimy i liczby dni z mrozem. Podobne tendencje, jednak o mniejszej sile współzależności, wykazano w przypadku kry oraz współwystępującej kry i sryżu (odpowiednio $0,5 < r < 0,7$ i $-0,7 < r < 0,5$), a jeszcze mniejsze w przypadku pokrywy lodowej (odpowiednio $0,2 < r < 0,5$ i $-0,5 < r < -0,2$). Wyniki te potwierdzają, że są to zjawiska występujące zazwyczaj podczas krótszych, ale mroźniejszych zim.

Odwrotną tendencję, co ma bezpośredni związek z fazowością zjawisk lodowych, zaobserwowano w przypadku lodu brzegowego, który występuje samodzielnie, jak i wraz ze sryżem. W tych przypadkach silnie ujemna korelacja ($r < -0,7$) odpowiada średniej temperaturze powietrza zimą i średniej temperaturze powietrza w styczniu, natomiast silnie dodatni związek odnosi się do średniej długości trwania termicznej zimy i liczby dni z mrozem. Potwierdza to fakt, że powstawanie zjawisk tego typu jest zazwyczaj długotrwałe. Nie wykazano natomiast istotnej statystycznie korelacji z czynnikami klimatycznymi w przypadku zatorów lodowych oraz współwystępującego lodu brzegowego i kry, co może wynikać między innymi z niewielkiej liczby obserwacji zjawisk o tym charakterze.

Istotnie statystycznie trendy skracania się czasu trwania pokrywy lodowej, podobnie jak na Warcie, stwierdzono również na jej dopływie, Prośnie [PTAK, NOWAK 2017], a także na Wiśle i Niemnie [ĆMIELEWSKI, GRZEŚ 2010]. GORACZKO [2013], badając przebieg zjawisk lodowych na Wiśle w rejonie Bydgoszczy w okresie 1947–2012, wykazał skrócenie czasu ich trwania po 1970 r. w wyniku wzrostu, w stosunku do przeciętnej, liczby zim o bardzo łagodnym przebiegu. Zmiany termiki wód rzecznych w sezonach zimowych i ich wpływ na skrócenie czasu występowania zjawisk lodowych potwierdzają także wyniki analiz przeprowadzonych przez ŁUKASZEWICZA [2017 a, b]. Badając przebieg zjawisk lodowych na rzekach Przymorza w okresie 1960–2010, autor ten wykazał, że w niektórych wypadkach wpływ czynników klimatycznych spowodował skrócenie czasu trwania zjawisk lodowych o prawie o połowę w latach 1991–2010 w stosunku do okresu 1960–1990. Podobne wyniki, dotyczące ujemnej tendencji zjawisk lodowych na rzekach Przymorza, uzyskali PTAK i CHOIŃSKI [2016].

Na poszczególnych odcinkach biegu Warty zaobserwowano również różnokierunkowe zmiany w czasie trwania zjawisk lodowych, wynikające z innych, poza klimatycznymi, przyczyn. Zmiana układu morfologicznego doliny Warty z równoleżnikowego na południkowy (przełomowy) mogła przyczynić się do wzrostu liczby dni z krą i zaturem lodowym. Potwierdzeniem są wyniki obserwacji zjawisk lodowych na rzece przeprowadzonych w badanym okresie w profilu Śrem (rys. 4–5) oraz dane o miejscach występowania zatorów lodowych gromadzone w ramach „Monitoringu lodowego na rzekach i jeziorach Polski” (źródło: Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu) [JOKIEL, BARTNIK 2017]. Najczęściej zatory na

Warcie identyfikowane są m.in. na odcinku Nowa Wieś Podgórna–Śrem–Poznań oraz w górnym biegu rzeki między przekrojami Bobry–Sieradz–Uniejów. Na Warcie w okresie 1991–2010 odnotowano 4 dni z zatorym lodowym i 5 dni z zatorym śryżowym, co stanowi łącznie 0,2% wszystkich obserwowanych zjawisk lodowych w tym okresie. Zatory lodowe wystąpiły w latach 2002 (1 dzień, na stacji w Bobrach) i 2003 (3 dni, na stacji w Śremie). Zatory śryżowe odnotowano w latach 2003 (1 dzień, na stacji w Poznaniu), 2006 (2 dni, na stacji w Sieradzu) i 2010 (2 dni, na stacji w Sieradzu).

Jak dowiodły wcześniejsze badania, rejestrowany wzrost antropopresji w dolinie Warty może prowadzić do zaburzenia cech reżimu termicznego rzeki [GORĄCZKO, PAWŁOWSKI 2014; GRAF 2015; KORNAŚ 2014]. Niekiedy zmiany te są na tyle istotne, że mogą wpływać na odwrócenie obserwowanego ogólnego trendu występowania zjawisk lodowych [PAWŁOWSKI i in. 2017].

Na Warcie w Poznaniu zaobserwowano w badanym okresie mniejszą częstość występowania trwałej pokrywy lodowej, przeciwnie niż w Nowej Wsi Podgórnjej i Śremie. Badania przeprowadzone przez GRAF [2015] wykazały, że temperatura wody w Warcie przekraczała w sezonie jesienno-zimowym wartość progową, wynoszącą 0,2°C, czyli wartość wskaźnika początku ochładzania i termicznego reżimu zimowego, w Nowej Wsi Podgórnjej i Śremie, najczęściej między 22 a 29 XII, natomiast w Poznaniu sytuacja ta była rejestrowana bardzo rzadko. W profilu Poznań zaobserwowano wzrost temperatury wód rzecznych w sezonie zimowym, co miało wpływ na przebieg zjawisk lodowych, głównie w zakresie zmniejszenia liczby dni ze stałą pokrywą (rys. 4). Pokrywa lodowa na Warcie w Poznaniu była także wcześniej zjawiskiem dość rzadkim, co potwierdzają wyniki analizy przeprowadzonej przez KORNAŚ [2014]. W okresie 1961–2010 pokrywa lodowa wystąpiła na rzece tylko 15 razy. Najdłużej (29 dni) utrzymywała się w 2006 i 2010 r., a podobnie długi czas jej występowania zarejestrowano w 1979 r. W 2010 r. pokrywa lodowa na rzece w rejonie Poznania pojawiła się dwukrotnie, co jest charakterystyczne dla reżimu lodowego rzek nizinnych [GOŁEK 1964]. W ujęciu dziesięciolecia najdłuższy czas trwania pokrywy lodowej na Warcie w Poznaniu miał miejsce w latach 2001–2010, podczas gdy w Nowej Wsi Podgórnjej (powyżej Poznania) w tym czasie nie zarejestrowano dni z pokrywą lodową. W okresie 1991–2000 pokrywa lodowa na rzece w profilu Poznań występowała bardzo rzadko (rys. 4–6). Skracanie czasu występowania pokrywy lodowej w Poznaniu jest obserwowane od dawna, przynajmniej od początku XX wieku [PACZOSKA 1937], a więc uzyskane dla tego profilu wyniki w analizowanym wieloleciu świadczą o utrzymywaniu się tego trendu. Zarejestrowane różnice można uznać za efekt wpływu czynników lokalnych, związanych z oddziaływaniem czynnika antropogenicznego. Aglomeracja poznańska w znaczący sposób wpływa na stosunki wodne i termikę wód Warty w jej w środkowym biegu [GRAF 2015]. Według RZGW [2007] jest to fragment zlewni Warty o drugiej po Koninie, Kole i Turku (kopalnie węgla brunatnego), najsilniejszej wypadkowej presji człowieka na stosunki wodne, która prze-

jawia się tu głównie poprzez specyfikę użytkowania terenu – wysoki wskaźnik urbanizacji, duży pobór wód powierzchniowych na cele komunalne i duże zrzuty ścieków o charakterze bytowym (tab. 1). Dopływ zanieczyszczeń z terenów miejskich i przemysłowych oraz użytkowanych rolniczo przyczynia się do wzrostu temperatury wody w rzece, a w konsekwencji do skrócenia czasu trwania zjawisk lodowych [CAISSIE 2006; TAKÁCS i in. 2014]. W sezonie zimowym czynnikami pogarszającymi jakość wód, a tym samym ograniczającymi występowanie zjawisk lodowych na Warcie w Poznaniu, może być również zjawisko tzw. miejskiej wyspy ciepła, jak również zasolenie wód powierzchniowych i podziemnych wywołane stosowaniem środków do odladzania dróg (najczęściej chlorku sodu). Odcinki rzek, na których notuje się krótszy czas trwania zjawisk lodowych lub ich brak, w porównaniu z sąsiednimi odcinkami, charakteryzują się zazwyczaj dużym zrzućtem ścieków. Znaczny wpływ na przebieg zjawisk lodowych na Warcie mogła mieć w badanym okresie również dostawa zasolonych wód kopalnianych do rzeki z rejonu eksploatacji węgla brunatnego (KWB Konin). W zlewni Warty zrzuty wód kopalnianych do rzeki z rejonu Konina stanowią ponad połowę ścieków rejestrowanych w zlewni [RZGW 2007].

Istotne zmiany w przebiegu zjawisk lodowych na Warcie związane są z oddziaływaniem zbiornika Jeziorsko, którego wpływ zaznaczył się na rzece zarówno powyżej, jak i poniżej jego lokalizacji. Na Warcie w Sieradzu, powyżej Jeziorska, zmniejszenie prędkości przepływu spowodowało wydłużenie czasu trwania zjawisk lodowych oraz wzrost prawdopodobieństwa występowania zatorów. Zauważalna zmiana w przebiegu zjawisk lodowych na Warcie w Uniejowie związana jest z rozpoczęciem eksploatacji zbiornika Jeziorsko w 1986 r. [GORĄCZKO, PAWŁOWSKI 2014]. Efektem jest przede wszystkim zmniejszenie częstości występowania zjawisk lodowych oraz prawie całkowity zanik pokrywy lodowej. Analiza zdarzeń lodowych występujących na Warcie w okresie 1991–2010, a więc po uzyskaniu pełnego zakresu piętrzenia w zbiorniku Jeziorsko w 1992 r., wykazała że w Uniejowie, w porównaniu z pozostałymi posterunkami, zarejestrowano na rzece najmniejszą liczbę dni ze zjawiskami oraz pokrywą lodową. Jest to jeden z nielicznych posterunków obserwacyjnych wzdłuż Warty, w którym dynamika zjawisk lodowych kształtuje się w sposób tak wyraźny pod wpływem czynników antropogenicznych. Znaczne zmiany powierzchni i objętości zbiornika Jeziorsko w cyklu rocznym zakłócają cykl zlodzenia, na co zwrócili uwagę GORĄCZKO i PAWŁOWSKI [2014]. Wpływ zbiornika na wzrost temperatury wód Warty oraz zmniejszenie liczby dni ze zjawiskami lodowymi nie są jednak jednoznaczne i stałe, co związane może być m.in. ze zmianami rzędnej piętrzenia i przepływu wody przez stopień wodny. W przypadku Uniejowa dodatkowym elementem, modyfikującym przebieg zjawisk lodowych na Warcie, jest dopływ do rzeki wód o podwyższonej temperaturze z tzw. Regionu Geotermii Uniejowskiej. Po uruchomieniu term wody geotermalne, przedostające się do Warty, mogą wpływać na warunki powstawania i czasu trwania zjawisk w rejonie ich zrzutu.

Obserwacje przebiegu zjawisk lodowych na Warcie wskazują na wzrost intensywności oddziaływań antropogenicznych w obrębie zlewni i doliny, które modyfikują strukturę i czas trwania zjawisk lodowych. Zjawisko to, zdaniem TAKÁCS i in. [2014], jest powszechne dla rzek przepływających przez tereny silnie zurbanizowane. W celu rozpoznania wpływu zanieczyszczeń wód Warty na jej reżim termiczno-lodowy należałoby podjąć szczegółowe badania w tym zakresie.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały zmienność w przebiegu i czasie trwania poszczególnych form zjawisk lodowych wraz z biegiem Warty w latach 1991–2010. Pierwsze zjawiska lodowe pojawiały się na rzece przeciętnie w trzeciej dekadzie grudnia, a ich zanik następował pod koniec lutego. Cechą charakterystyczną reżimu lodowego Warty było rzadkie występowanie w badanym okresie pełnego cyklu zlodzenia z wyraźną fazą zamarzania, zamarznięcia i rozmarzania. Zarejestrowano przewagę zjawisk lodowych z pierwszej fazy (zamarzania rzeki), dla której typowe są śryż i lód brzegowy, rzadziej przewagę zyskiwały dni ze stałą pokrywą lodową.

Wyniki analizy potwierdziły zależność przebiegu zjawisk lodowych na Warcie od temperatury powietrza i wody. Na tle dodatniej tendencji zmian średnich wartości temperatury powietrza i wody w zimowym sezonie roku hydrologicznego stwierdzono w rozpatrywanym okresie ujemny trend czasu trwania zjawisk lodowych na Warcie. Generalnie dłuższy czas trwania zjawisk lodowych na rzece zaobserwowano w latach 1991–2000, jedynie na posterunkach Bobry i Poznań średnia liczba dni ze zjawiskami lodowymi była większa w drugim dziesięcioleciu badanego okresu.

Stwierdzono zróżnicowanie struktury i czasu trwania zjawisk lodowych na Warcie między analizowanymi przekrojami. W górnym biegu rzeki, z wyjątkiem Sieradza, w strukturze zjawisk lodowych dominował lód brzegowy, a zmniejszył się udział pokrywy lodowej. W środkowym biegu Warty zwiększyła się liczba dni ze śryżem (faza zamarzania) oraz wydłużył się czas trwania stałej pokrywy lodowej, podobnie jak w biegu dolnym, w którym zanotowano wyraźne wydłużenie czasu jej trwania. Analiza wykazała, że zatory lodowe i śryżowe na Warcie stanowiły w badanym okresie łącznie 0,2% wszystkich obserwowanych zjawisk lodowych (występowały one tylko przez 9 dni w całym okresie obserwacji). Informacje o zatorach lodowych na rzece są istotne w kontekście identyfikacji i minimalizacji zagrożeń związanych z wystąpieniem powodzi zatorowych.

Zarejestrowane wzdłuż biegu rzeki różnice w dynamice i natężeniu występowania zjawisk lodowych uznano także za efekt wpływu warunków lokalnych, związanych z oddziaływaniem czynnika antropogenicznego. Na reżim termiczno-lodowy Warty silny wpływ mają czynniki związane z różnokierunkowym stopniem przeobrażenia oraz zagospodarowania zlewni i doliny rzecznej, do których

zaliczono: urbanizację (profile Poznań, Gorzów Wielkopolski), zmiany użytkowania terenu i morfologii koryta rzecznego (profile Nowa Wieś Podgórna, Śrem, Skwierzyna), oddziaływanie zbiornika retencyjnego Jeziorsko (profile Uniejów, Sieradz) oraz zanieczyszczenie wód (profile Bobry, Poznań, Gorzów Wlkp.). Wpływ zbiornika Jeziorsko na przebieg zjawisk lodowych powyżej zapory zaznaczył się zwiększeniem możliwości powstania i utrzymania się pokrywy lodowej na rzece, natomiast poniżej zapory – skróceniem czasu jej trwania. Dostawa do rzeki ścieków z miejskiej kanalizacji burzowej w większych miastach (profile Poznań i Gorzów Wielkopolski) może wpłynąć na wzrost temperatury wody, ograniczając powstawanie zjawisk lodowych na rzece, lub przyspieszyć ich zanik.

Uzyskane wyniki stanowią podstawę do analiz porównawczych cech reżimu termiczno-lodowego Warty prowadzonych w różnych okresach obserwacyjnych, jak również bazę danych do kontynuacji badań i efektywnego zarządzania ekosystemem wodnym.

BIBLIOGRAFIA

- ALLAN J.D., CASTILLO M.M. 2007. Stream ecology: Structure and function of running waters. 2nd ed. New York. Dordrecht. ISBN 978-1-4020-5582-9. [Dostęp 25.05.2017]. Dostępny w Internecie: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-5583-6>.
- BĄCZYK A., SUCHOŻEBRSKI J. 2016. Zmienność przebiegu zjawisk lodowych na Bugu w latach 1903–2012 [Variability of ice phenomena on the Bug River (1903–2012)]. Inżynieria Ekologiczna. Nr 49 s. 136–142.
- BELTAOS P., PROUSE T. 2009. River – ice hydrology in a shrinking cryosphere. Hydrological Processes. No. 23/1 s. 122–144.
- CAISSIE D. 2006. The thermal regime of rivers: A review. Freshwater Biology. No. 51 s. 1389–1406.
- ĆMIELEWSKI M., GRZEŚ M. 2010. Wieloletnia zmienność zlodzenia Wisły w Toruniu i Niemna w Smolnikach w XIX i XX wieku [Multiannual variability of the ice cover on Vistula in Toruń and Niemen in Smolniki in the 19th and 20th centuries]. Gospodarka Wodna. Nr 3 s. 112–115.
- EEA 2012. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012. An indicator-based report. [online]. EEA Report No 12/2012. ISBN 978-92-9213-346-7. [Dostęp 15.02.2017]. Dostępny w Internecie: <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-impacts-and-vulnerability-2012>
- GOŁEK J. 1957. Zjawiska lodowe na rzekach polskich [Ice phenomena on Polish rivers]. Prace PIHM. Nr 48 ss. 74.
- GOŁEK J. 1964. Zlodzenie rzek polskich [The ice cover of Polish rivers]. Prace PIHM. Nr 63. Warszawa. WKiŁ ss. 74.
- GORAĆZKO M. 2013. Zmienność przebiegu zjawisk lodowych na Wiśle w rejonie Bydgoszczy [Variability of ice phenomena on the Vistula River in the vicinity of Bydgoszcz]. Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska. Nr 62 s. 382–388.
- GORAĆZKO M., PAWŁOWSKI B. 2014. Przebieg zjawisk lodowych na Warcie w rejonie Uniejowa [Changing of ice phenomena on Warta River in vicinity of Uniejów]. Biuletyn Uniejowski. Nr 3 s. 23–33.
- GRAF R. 2015. Zmiany termiki wód Warty w profilu łączącym pradolinny i przełomowy odcinek doliny (Nowa Wieś Podgórna – Śrem – Poznań). W: Nowoczesne metody i rozwiązania w hydrologii i gospodarce wodnej [Variations of the thermal conditions of the Warta in the profile connecting the urstromtal and gorge sections of the valley (Nowa Wieś Podgórna – Śrem – Poznań)].

- nań)]. Monografie Komisji Hydrologicznej PTG. T. 3. Red. D. Absalon, M. Matysik, M. Ruman. Sosnowiec. Komisja Hydrologiczna PTG, PTG Oddział Katowice s. 177–194.
- GRAF R. 2018. Distribution properties of a measurement series of river water temperature at different time resolution levels (based on the example of the Lowland River Noteć, Poland). *Water*. No. 10(2), 203 s. 22.
- GRZEŚ M. 1991. Zatory i powódzie zatorowe na dolnej Wiśle – mechanizmy i warunki [Ice jams and floods on the Lower Vistula River. Mechanism and processes]. Warszawa. Wydaw. IGIPIZ PAN. Warszawa. ISBN 93-00-03450-1 ss. 186.
- ILNICKI P., FARAT R., GÓRECKI K., LEWANDOWSKI P. 2015. Long-term air temperature and precipitation variability in the Warta River catchment area. *Journal of Water and Land Development*. No. 27 p. 3–13. DOI 10.1515/jwld-2015-0019.
- JOKIEL P., BARTNIK A. 2017. Wezbrania i powódzie. W: *Hydrologia Polski [Swells and floods. In: Hydrology of Poland]*. Red. P. Jokiel, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka. Warszawa. Wydaw. Nauk. PWN s. 167–175.
- KONDRACKI J. 2009. *Geografia regionalna Polski [Regional geography of Poland]*. Warszawa. Wydaw. Nauk. PWN. Warszawa. ISBN 978-83-01-16022-7 ss. 431.
- KORNAŚ M. 2014. Ice phenomena in the Warta River in Poznań in 1961–2010. *Questiones Geographice*. No. 33(1) s. 51–59.
- ŁASZEWSKI M., JELEŃSKI P. 2013. Porównanie warunków termicznych wód rzek Raby i Świdra [A comparison of thermal conditions of the Raba River and the Świder River]. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*. Nr 61 s. 239–248.
- ŁUKASZEWICZ J.T. 2017a. Częstość i charakter występowania zjawisk lodowych w dolnym biegu rzeki Wieprzy w aspekcie zmian klimatycznych, ze szczególnym uwzględnieniem zmian temperatury powietrza. W: *Monografie. Badania i rozwój młodych naukowców w Polsce. Nauki przyrodnicze [The frequency and occurrence of ice phenomena in the lower reaches of the Wieprza River in the aspect of climatic changes, with particular emphasis on changes in air temperature]*. T. 2. Nr 5. Red. J. Nyćkowiak, J. Leśny. Poznań. Wydaw. Młodzi Naukowcy. ISBN 978-83-65677-82-2. Nr 5 s. 69–74.
- ŁUKASZEWICZ J.T. 2017b. Przebieg i charakter zjawisk lodowych na wybranych odcinakach rzek Przymorza o wysokim stopniu antropopresji na tle zmian klimatycznych zachodzących w strefie brzegowej Bałtyku [The course and the character of the ice phenomena in selected sections of Przymorze rivers with a high influence of anthropopressure in relation to the climate changes that occur in the coastal zone of the Baltic Sea]. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*. Nr 16(1) s. 93–113.
- MARSZELEWSKI W., PIUS B. 2016. Long-term changes in temperature of river waters in the transitional zone of the temperate climate: A case study of Polish rivers. *Hydrological Sciences Journal*. No 61(8) s. 1430–1442.
- NIEDŹWIEDŹ T. 2002. Relacje między NAO a wskaźnikami cyrkulacji nad Polską. W: *Oscylacja Północnego Atlantyku i jej rola w kształtowaniu zmienności warunków klimatycznych i hydrologicznych Polski [Relationships between NAO and circulation indicators over Poland. In: North Atlantic Oscillation and its role in shaping the variability of climatic and hydrological conditions in Poland]*. Red. A. Marsz, A. Staszyńska. Gdynia. Wydaw. Akad. Morska s. 87–97.
- NWS niedatowane. North Atlantic Oscillation (NAO) [online]. National Weather Service. [Dostęp 20.04.2017]. Dostępny w Internecie: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/>
- PACZOŚKA Z. 1937. Zamarzanie rzek w Polsce [Freezing of rivers in Poland]. *Badania Geograficzne*. Nr 18–19 s. 29–69.
- PAWŁOWSKI B. 2009. Long-term variability in the course of ice phenomena on the Vistula River in Toruń. *Bulletin of Geography: Physical Geography Series*. No 1 s. 91–102.

- PAWŁOWSKI B., GORĄCZKO M., SZCZERBIŃSKA A. 2017. Zjawiska lodowe na rzekach Polski. W: Hydrologia Polski [Ice phenomena on the rivers of Poland. In: Hydrology of Poland]. Red. P. Jokiel, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka. Warszawa. Wydaw. Nauk. PWN s. 195–200.
- PTAK M., CHOŃSKI A. 2016. Ice phenomena in rivers of the coastal zone (Southern Baltic) in the years 1956–2015. Baltic Coastal Zone. Journal of Ecology and Protection of the Coastline. No 20 s. 73–83.
- PTAK M., NOWAK B. 2017. Zmiany temperatury wody w Prośnie w latach 1965–2014 [Changes in water temperature in Proсна River in 1965–2014]. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 17. Z. 3 (59) s. 101–112.
- RZGW 2007. Charakterystyka Regionu Wodnego Warty i identyfikacja istotnych problemów gospodarki wodnej [Characteristics of the Warta Water Region and identification of significant water management problems] [online]. Pion Zasobów Wodnych. Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Poznaniu. [Dostęp 16.02.2017]. Dostępny w Internecie: https://circabc.europa.eu/webdav/CircaBC/env/wfd/Library/framework_directive/implementation_documents_1/information_consultation/poland/rwma-poznan/B-SWMI-PL-RWMA-Poznan-pre-consultation.pdf
- TAKÁCS K., NAGY B., KERN Z. 2014. Human impacts on river ice regime in the Carpathian Basin. Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly. Vol. 16 ss. 2.
- WEBB B.W., NOBILIS F. 2007. Long-term changes in river temperature and the influence of climatic and hydrological factors. Hydrological Sciences. No. 52 s. 74–85.
- WIEJACZKA Ł. 2007. Relacje pomiędzy temperaturą wody w rzece a temperaturą powietrza (na przykładzie rzeki Ropy) [Relationship between water temperature in the river and air temperatures (on the Ropa river as an example)]. Folia Geographica. Ser. Geographica – Physica. Vol. 37–38 s. 95–105.
- WOŁOZYN E. 2006. Wezbrania zimowe zatorowe i roztopowe. W: Vademecum ochrony przeciwpodwodzowej [Winter floods ice jam and snowmelt. In: Vademecum flood protection]. Gdańsk. KZGW s. 73–100.
- WOŚ A. 2010. Klimat Polski w drugiej połowie XX wieku [The climate of Poland in the second half of the XX century]. Poznań. Wydaw. Nauk. UAM. ISBN 978-83-232-2180-7 ss. 489.
- WRZESIŃSKI D. 2013. Entropia odpływu rzek w Polsce [Entropy of the outflow of rivers in Poland]. Poznań. Bogucki Wydaw. Naukowe. Poznań. ISBN 978-83-63400-81-1 ss. 188.

Renata GRAF, Jan T. ŁUKASZEWICZ, Kamil JAWGIEL

THE ANALYSIS OF THE STRUCTURE AND DURATION OF ICE PHENOMENA ON THE WARTA RIVER IN RELATION TO THERMIC CONDITIONS IN THE YEARS 1991–2010

Key words: *air temperature, ice cover, ice phenomena, the Warta River, water thermal conditions*

Summary

The article presents the results of the analysis of the structure and duration of ice phenomena on the Warta River. The course of ice phenomena has been described against the background of air and water temperature, and North Atlantic oscillation (NAO) changes including. The forms of ice phenomena, exist on the Warta River in particular cycles of its icing, were determined. The variability of the water temperature in winter and its impact on the number of days with ice phenomena on the river has been taken into consideration. The analysis of ice phenomena has taken into account the nature of the section of the river on which observations were made, the scale of anthropopressure affecting the transformation of the riverbed, the impact of urbanization in the zones of larger urban centers and the

influence of the Jeziorsko Reservoir. On the basis of the conducted research, a general tendency was determined for the variability of ice phenomena occurring on the river. Reasons for the differentiation of the structure of ice phenomena on a regional basis were determined. The results show in detail the connection between the course and frequency of ice phenomena and other hand thermal conditions and NAO phases.

Adres do korespondencji: dr hab. Renata Graf, prof. UAM, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego, Zakład Hydrologii i Gospodarki Wodnej, ul. Bogumiła Krygowskiego 10, 61-680 Poznań; e-mail: rengraf@amu.edu.pl