

Krzysztof KOCHANEK¹, Mateusz GRYGORUK²,
Dorota MIROSLAW-ŚWIĄTEK²

¹Polska Akademia Nauk

²Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

ZANIK ZJAWISK LODOWYCH W RZEKACH POŁUDNIOWEJ POLSKI

GRADUAL DISAPPEARANCE OF ICE PHENOMENA IN RIVERS OF SOUTHERN POLAND

Abstract

The higher winter average temperature and snowless winters resulted in observed degradation in ice phenomena in Polish rivers. Here we analyse to what extent the visible with the naked eye lack of ice in rivers comply with the monitoring results. The datasets for analysis base on the monitoring system of the Institute of the Meteorology and Water Management. The datasets of annual sums of days with ice phenomena were analysed in terms of their homogeneity by means of Pettitt's test, the Mann-Kendall trend test and slope Sen's test. Regardless the river size and regime and the location of the observation station, the Pettitt's test results suggest that the shift in time series was usually detected either just before or few years after the turn of the 21st century (1997-2006). The Mann-Kendall test results point that in the majority of the measurement sites the number of ice phenomena has been decreasing. Also the Sen's test clearly shows that the general number of ice phenomena gradually but consequently declines over the recent years. Interesting is that, that the decline in number of ice phenomena is generally faster in the mountain catchments rather than in the lowland parts of rivers.

Key words: ice phenomena, global warming, Poland, river, trends

1. WPROWADZENIE

Poza oczywistymi konsekwencjami globalnego ocieplenia, takimi jak wzrost temperatury na świecie, zmiany w strukturze opadów i związane z tym zmiany reżimu przepływu (Stern 2006), zmieniający się klimat ma również wpływ na zjawiska lodowe (śryż, lód brzegowy, pokrywa lodowa, kra, zator lodowy) występujące w wodach powierzchniowych w umiarkowanej i arktycznej strefie klimatycznej (Agafo-

nova i in., 2017, Borshch i in. 2001, Graf 2020). Zdecydowana większość badań prowadzonych w skali lokalnej wykazuje, że czas trwania zjawisk lodowych na rzekach, jeziorach i wodach przybrzeżnych maleje, a ich struktura przestrzenna i czasowa ulega zmianie (Beltaos i Burrell 2003, Magnuson i in. 2000, Ptak i Choiński 2017, Šarauškienė i Jurgelėnaitė 2008). W badaniu rosyjskich rzek na obszarze Eurazji, Smith (2013) wykazał ogólne zmniejszanie się pokrywy lodowej w latach 50-tych, zwiększanie się jej w latach 80. XX wieku, a następnie zmniejszanie w latach 90. XX wieku, co jest zgodne z innymi badaniami trendów temperatury na Syberii. Udokumentował on również zmienność międzyroczną i regionalną, wyrażającą się wcześniejszym występowaniem jesiennych zamarznięć w rzekach regionu Karelii i Koli, co prowadziło do wydłużenia czasu trwania zimowej pokrywy lodowej na większości tych rzek. Bardziej ekstremalne zjawiska ostatnich dziesięcioleci, w tym późne zamarzanie, wczesne topnienie lodu, krótsze okresy pokrywy lodowej (lub całkowity jej brak), przyczyniają się do rosnącego tempa utraty lodu w jeziorach półkuli północnej (Sharma i in., 2021).

Konsekwencje środowiskowe zmian dynamiki zjawisk lodowych mają kluczowe znaczenie dla inwersji temperatury wody i cyrkulacji tlenu w ekosystemach wodnych (Chambers i in., 1997). Procesy zachodzące pod lodem wpływają bezpośrednio na sezon bez lodu i są istotne dla rocznego obiegu energii i węgla w ekosystemach wodnych (Jansen i in., 2021). Berilsson i in. (2021) opisali, jak warunki pod lodem zmieniają przebieg procesów fizycznych w jeziorze i w jaki sposób może to wpływać na rozmieszczenie i metabolizm mikroorganizmów auto- i heterotroficznych. Ekonomiczne konsekwencje zjawisk lodowych w jeziorach i rzekach stanowią wyzwanie dla zimowego transportu i żeglugi. Jednak w zależności od regionu mogą być one także ważnym procesem zwiększającym transport przez rzeki i jeziora (np. Syberia). Niektórzy autorzy sugerują, że same zjawiska lodowe mogą być elementem inspirującym różne formy turystyki (Girjatowicz, 2015).

Dotychczasowe badania nad zjawiskami lodowymi w polskich rzekach pozwoliły na sformułowanie kilku istotnych stwierdzeń. Lokalne trendy czasu trwania zjawisk lodowych w północnej Polsce udokumentowane na kilku rzekach wykazały skrócenie czasu występowania zjawisk lodowych nawet o 7 dni na dekadę (Ptak i Choiński, 2017). Pawłowski (2015) wykazał skrócenie czasu trwania zjawisk lodowych z 88 do 53 dni, a pokrywy lodowej z 40 do 7 dni (w okresie 1882-2011). Istotną zależność między sezonową zmianą temperatury powietrza a zmiennością warunków termicznych wody, mającą bezpośredni wpływ na zmienność występowania lodu w rzekach na Przymorzu, udokumentowali Łukaszewicz i Graf (2020). Bączyk i Suchożebrski (2016) wykazali, że czas trwania zjawisk lodowych w stacjach pomiarowych wzdłuż rzeki Bug uległ znacznemu skróceniu w XX wieku i pierwszej dekadzie XXI wieku. Jednak analiza zjawisk lodowych na dużych rzekach objętych oddziaływaniem żeglugi śródlądowej (techniczne łamanie lodu) i jakości ich wód nie daje kompleksowego obrazu zmian zjawisk lodowych w czasie (Marszelewski i Pawłowski 2019). Podobnie, analiza zjawisk lodowych na rzekach spiętrzonych przez duże sztuczne zbiorniki, choć stanowi ważną dokumentację wpływu antropogenicznego, nie ujawnia wpływu zmian klimatu (zmiany temperatury powietrza i wody w sezonach zimowych) na czas trwania i zmienność w czasie zjawisk lodowych (Pawłowski 2015). Eksploatacja elektrowni wodnych również wpływa na zjawiska lodowe poprzez wydłużenie czasu występowania pokrywy lodowej w górnym biegu (w tym poważne zatopy lodowe) i znaczne skrócenie czasu trwania zjawisk lodowych w dolnym biegu rzeki (Takács i in. 2014).

Artykuł koncentruje się na wstępnej analizie trendów czasów trwania zjawisk lodowych w rzekach środkowej i południowej Polski. Uzyskano i przeanalizowano

dane ze 105 posterunków wodowskazowych (codzienne występowanie zjawisk lodowych w okresie 1951-2019). Zastosowano podstawowe analizy statystyczne w celu stwierdzenia, czy tendencja spadkowa czasu trwania zjawisk lodowych pozostaje uniwersalna w rzekach o różnych reżimach przepływu i różnej wielkości. Wnioski stanowią ważny punkt wyjścia do głębszej analizy prowadzącej do rozpoznania zmian zjawisk lodowych w skali kraju, z uwzględnieniem jak najszerszego zestawu danych i geograficznej lokalizacji posterunków wodowskazowych.

2. DANE

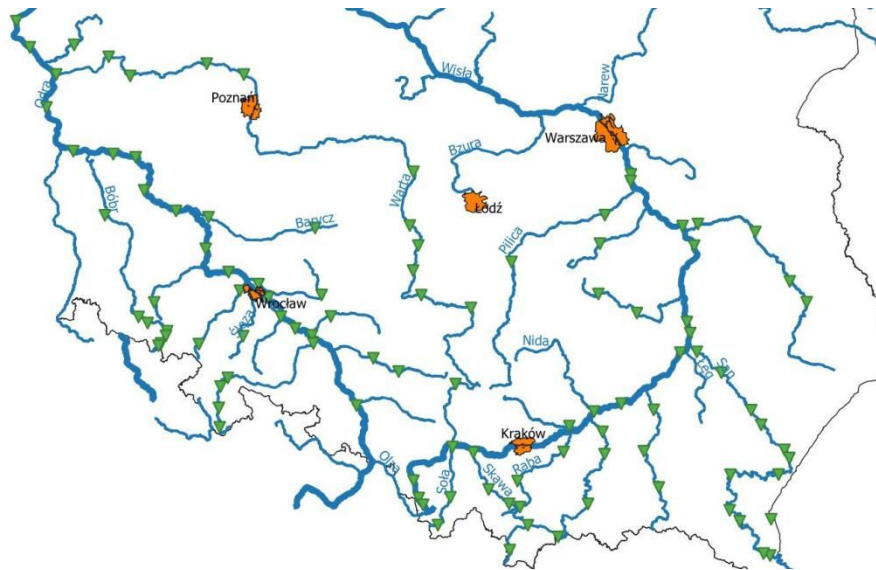
Zbiory danych wykorzystane do obliczeń bazują na informacjach gromadzonych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – PIB i obejmują zasadniczo okres od 1951 do 2019 r. W repozytorium IMGW– PIB znajdują się dzienne serie obserwacyjne z posterunków zlokalizowanych na różnych rzekach i potokach południowej Polski. Zakres czasowy dostępnych danych jest różny i rzadko obejmuje cały okres 1951-2019, zwykle ważniejsze posterunki na głównych rzekach są lepiej reprezentowane niż mniejsze.

Dane surowe IMGW– PIB zawierają następujące informacje: kod posterunku, nazwę rzeki lub jeziora, datę obserwacji (w kalendarzu hydrologicznym), grubość lodu (jeśli zaobserwowano), kod zjawiska lodowego (np. śryż, kra, lód brzegowy, pokrywa lodowa, zator lodowy itp.) oraz procent pokrycia cieką lodem. W zbiorach danych wyraźnie zaznaczono braki w pomiarach. W repozytorium nie ma danych dla północnej części kraju.

Do badań wybrano 105 stacji obserwacyjnych (rys. 1, tablica 1). Posterunki wykorzystane do badań są rozmieszczone równomiernie i znajdują się na większych rzekach południowej Polski. Rzeki te zostały wybrane w sposób, aby reprezentowały całe spektrum reżimu hydrologicznego w Polsce, tzn. występują tu szybko płynące rzeki górskie, takie jak Dunajec, oraz duże rzeki nizinne, takie jak Wisła czy Odra.

Dodatkowe kryterium wyboru opierało się na liczbie dni, w których zaobserwowano zjawiska lodowe (dowolnego typu). Miejsca, w których w całym okresie obserwacji zanotowano mniej niż 500 dni ze zjawiskami lodowymi, zostały wyłączone z analizy, ponieważ średnia roczna liczba obserwacji jest zbyt mała, aby przeprowadzić wiarygodną analizę statystyczną. Nawet po dokonaniu selekcji niektóre zestawy danych obserwacyjnych okazały się obejmować zbyt krótki okres uniemożliwiający przeprowadzenie wiarygodnej analizy trendów w kontekście zmian klimatu.

Ilość informacji ukryta w surowych zbiorach danych IMGW– PIB otwiera pole do licznych analiz zjawisk lodowych w południowej Polsce i będzie przedmiotem dalszych badań. W analizie przedstawiono wpływ zmian klimatu na zjawiska lodowe w południowej Polsce. Skoncentrowano się na jednym z aspektów ich zmienności w ostatnich latach, a mianowicie na zmienności liczby dni w roku, w których zaobserwowano zjawiska lodowe (dowolnego typu). Parametry zmienności pozwolą na wyciągnięcie ogólnych wniosków ilościowych dotyczących wyraźnie widocznego spadku rocznej liczby występowania zjawisk lodowych, jaki obserwowany jest ostatnio w polskich rzekach. Jednocześnie należy zauważyć, że dane IMGW– PIB stanowią jedyną informację o zjawiskach lodowych, na której bazuje niniejsza praca, zatem nie mamy możliwości zakwestionowania ich jakości, ani też ewentualnej korekty.



Rys. 1. Mapa rozmieszczenia posterunków wodowskazowych
 Fig. 1. The map of the location of the gauging stations

Posterunki wodowskazowe wykorzystane w analizie

Tablica 1

The gauging stations used in the analysis

Table 1

Numer	Kod posterunku	Posterunek wodowskazowy	Rzeka	Powierzchnia zlewni A [km ²]
1	151160140	Osetno	Barycz	4575
2	151170070	Odolanów	Barycz	159
3	150170200	Domaradz	Bogacica	224
4	150150080	Jelenia Góra	Bóbr	1048
5	150150100	Wojanów	Bóbr	536
6	150150120	Bukówka	Bóbr	58
7	150160010	Kamienna Góra	Bóbr	190
8	150150130	Błazkowa	Bóbr	104
9	150160060	Jugowice	Bystrzyca	121
10	151160190	Jarnołów	Bystrzyca	1719
11	151150070	Żagań	Czarna Wielka	899
12	149199989	Kojsówka	Dunajec	89
13	149200030	Nowy Targ	Dunajec	434
14	149200140	Sromowce Wyżne	Dunajec	1285
15	149200240	Nowy Sącz	Dunajec	4334
16	149200280	Zgłobice	Dunajec	5642
17	150200170	Żabno	Dunajec	6734
18	150160250	Białobrzezie	Iłża	177
19	151150170	Świerzawa	Kaczawa	136
20	150210090	Kunów	Kamienna	1109
21	151200100	Bzin	Kamienna	276
22	150169999	Sędziszów	Lesk	89

23	150180100	Staniszczce Wielkie	Mała Panew	1098
24	150180190	Krupski Młyn	Mała Panew	666
25	152140100	Dolsk	Myśla	729
26	150160170	Bystrzyca Kłodzka	Nysa Kłodzka	260
27	150160180	Kłodzko	Nysa Kłodzka	1080
28	150160190	Międzylesie	Nysa Kłodzka	50
29	150170140	Skorogoszcz	Nysa Kłodzka	4486
30	150160220	Bardo	Nysa Kłodzka	839
31	151150150	Nowasól	Odra	36794
32	151160130	Ścinawa	Odra	29568
33	152140020	Gozdowice	Odra	109762
34	152140050	Słubice	Odra	53459
35	152140130	Połęcko	Odra	47120
36	152150130	Cigacice	Odra	39851
37	150170090	Brzeg	Odra	18020
38	150170130	Ujście Nysy Kłodzkiej	Odra	4920
39	150180030	Koźle	Odra	9040
40	151160060	Głogów	Odra	36394
41	151160170	Brzeg Dolny	Odra	26428
42	151170030	Trestno	Odra	20381
43	151210210	Królewski Las	Odra	13290
44	152140010	Bielinek	Odra	111826
45	152140070	Kostrzyn Nad Odrą	Odra	108170
46	152150050	Nietków	Odra	42016
47	150170040	Oława	Oława	957
48	151190100	Sulejów-Kopalnia	Pilica	3921
49	151200120	Białobrzegi	Pilica	8660
50	150190190	Piwoń	Przemsza	155
51	149190310	Stróża	Raba	644
52	149190340	Rabka	Raba	92
53	149200170	Proszówki	Raba	1482
54	151200110	Słowików	Radomka	1008
55	149220030	Olchowce	San	2243
56	149220040	Dynów	San	2944
57	149220060	Lesko	San	1616
58	149220130	Zatwarnica	San	494
59	149220150	Dwernik	San	418
60	149220190	Przemyśl	San	3686
61	149229993	Sośnica	San	4637
62	149229994	Radymno	San	5877
63	150210210	Radomyśl	San	16806
64	150220030	Nisko	San	15561
65	150220070	Rzuchów	San	12163
66	150220090	Leżachów	San	8343
67	149190170	Zator	Skawa	1151
68	149190210	Sucha Beskidzka	Skawa	466

69	149190290	Jordanów	Skawa	97
70	149190100	Żywiec	Soła	784
71	149199998	Sól	Soła	55
72	150190160	Oświęcim	Soła	1358
73	149220170	Krościenko	Strwiąż	194
74	150200070	Biskupice	Szreniawa	690
75	151180100	Osjaków	Warta	4092
76	151180080	Sieradz	Warta	8150
77	151180110	Uniejów	Warta	9179
78	151180120	Burzenin	Warta	5425
79	151180130	Działoszyn	Warta	4093
80	151190060	Bobry	Warta	1805
81	152150040	Gorzów Wielkopolski	Warta	52363
82	152150110	Skwierzyna	Warta	32091
83	152160050	Wronki	Warta	30685
84	152160100	Oborniki	Warta	26803
85	152160140	Poznań-Mostrocha	Warta	25925
86	151170010	Krzyżanowice	Widawa	1665
87	151170100	Michalice	Widawa	530
88	150230040	Krasnystaw	Wieprz	3013
89	151220010	Kośmin	Wieprz	10255
90	151220090	Lubartów	Wieprz	6378
91	151230010	Trawniki	Wieprz	3549
92	149180100	Skoczów	Wisła	296
93	149180110	Ustroń-Oblaziec	Wisła	107
94	149180140	Wisła	Wisła	53
95	150200150	Karsy	Wisła	19808
96	150210020	Szczucin	Wisła	23847
97	150210170	Sandomierz	Wisła	31786
98	150210180	Annopol	Wisła	51472
99	150210190	Zawichost	Wisła	50625
100	151210050	Gusin	Wisła	81751
101	151210120	Dęblin	Wisła	68215
102	151210170	Puławy	Wisła	57203
103	149210040	Łabuzie	Wisłoka	2551
104	149210070	Żółków	Wisłoka	583
105	150210120	Mielec	Wisłoka	3893

3. METODY BADAŃ

3.1. Zmienność liczby dni z występowaniem zjawisk lodowych w ciągu roku

105 zestawów danych dotyczących rocznych sum dni ze zjawiskami lodowymi przeanalizowano pod kątem ich jednorodności za pomocą nieparametrycznego testu

Pettitta (Pettitt 1979). Test Pettitta służy do wykrywania przesunięcia tendencji centralnej szeregu czasowego i jako taki jest szeroko stosowany w hydrologii w analizie trendu (Kundzewicz i Robson 2004, Reeves i in. 2007, Beaulieu i in. 2012, Katz 2013, Mallakpour i Villarini 2016, Zhou i in. 2019). Hipoteza zerowa testu zakłada, że nie ma zmiany parametru lokalizacji w testowanych rozkładach wobec hipotezy alternatywnej, że zmiana w danych istnieje (Pohlert 2020). Jest on oparty na statystyce Manna-Whitneya, która pozwala wykryć, czy próbki przed i po zmianie (jeśli istnieje) reprezentują tę samą populację. W teście oblicza się wartość statystyki U , która przyjmuje najwyższą wartość w miejscu prawdopodobnej zmiany w serii. Szczegółowy opis tego testu wykracza poza zakres artykułu i można go znaleźć np. w oryginalnej pracy Pettitta (1979).

Następnie każdą ze 105 serii przetestowano z założonym poziomem istotności testem Manna-Kendalla (Mann 1945, Kendall 1975) w celu wyodrębnienia zbiorów danych o monotonicznym trendzie wzrostowym lub spadkowym liczby zjawisk lodowych w roku. Hipoteza zerowa w teście Manna-Kendalla zakłada, że w serii nie występuje monotoniczny trend, wobec hipotezy alternatywnej, że trend istnieje, przy czym wskazany trend może być dodatni, ujemny lub nie-zeroowy. Test bazuje na wartości tau Manna-Kendalla, która jest miarą monotonicznej zależności między zmiennymi losowymi i przyjmuje wartości od -1 do 1 włącznie, przy czym wartości ujemne wskazują ogólnie na trend malejący, a dodatnie na rosnący. Mimo mniejszej dokładności niż metody parametryczne (np. Mirosław-Świątek i in. 2020), test nieparametryczny Manna-Kendalla jest często stosowany przez hydrologów w analizie trendów w niestacjonarnych szeregach czasowych, gdyż nie wymaga założeń co do rozkładu prawdopodobieństwa serii (Esterby 1996, Clement i Thas 2008, Machiwal i in. 2012, Kisi i in. 2014, Zobrist i in. 2018, Wang i in. 2019, Liu i in. 2020).

Współczynnik kierunkowy szeregu czasowego liczby zjawisk lodowych w roku określono ilościowo za pomocą nieparametrycznej procedury zaproponowanej przez Sena (1968). Ujemna wartość współczynnika Sena wskazuje na negatywny trend w zbiorach danych, a jego wartość bezwzględna na wielkość spadku, z kolei wartość dodatnia współczynnika wskazuje na trend wzrostowy w liczbie zjawisk lodowych. Współczynnik równy lub bliski 0 informuje o braku trendu w szeregach czasowych. Dodatkowo poziomy istotności dla tau Manna-Kendalla dostarczają informacji o wiarygodności uzyskanych wartości współczynnika kierunkowego Sena.

4. WYNIKI

Opisane powyżej analizy przeprowadzono dla prób o liczebności większej lub równej 30, ponieważ mniejsze zbiory danych nie gwarantują uzyskania statystycznie wiarygodnych wyników. Ponadto uważa się, że 30 lat obserwacji jest wystarczające, aby dostarczyć rzetelnych informacji o zmianach, które mogą być kontynuowane w przyszłości i które mogły zostać wywołane przez zmiany klimatyczne lub działalność człowieka. Dlatego z analizy wyłączono następujące posterunki wodowskazowe: nr 18 Osjaków na rzece Warcie (29 obserwacji), nr 49 Sędziszów na rzece Bóbr (12 obs.), nr 63 Królewski Las na rzece Wiśle (24 obs.), nr 79 Sońnica (10 obs.) i nr 80 Radymno (12 obs.) oba na Sanie, nr 88 Mielec na Wisłocy (28 obs.), nr 89 Kojcówka na Dunajcu (12 obs.) i nr 103 Sól na Sole (18 obs.). Wyniki obliczeń przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Analiza statystyczna szeregów czasowych liczby zjawisk lodowych w roku. Z tabeli wyłączono stacje, na których obserwacje trwały krócej niż 30 lat

Table 2

Statistical analysis of the time series of annual number of the ice phenomena. The table does not contain stations with datasets shorter than 30 years

Nr	Rzeka	Stacja	Początek obserw.	Koniec obserw.	Test Pettitta U	Rok zmiany	Mann-Kendall τ	Współcz. Sena [1/rok]
1	Odra	Koźle	1980	2019	177	1995	0,164	0,200
2	Odra	Ujście Nysy Kłodzkiej	1980	2019	251	1997	-0,344	-0,578
3	Odra	Brzeg	1980	2018	114	2013	-0,100	-0,118
4	Odra	Oława	1961	2018	410	1987	-0,292	-0,423
5	Odra	Trestno	1980	2019	158	2013	-0,174	-0,434
6	Odra	Brzeg Dolny	1980	2017	207	1997	-0,387	-0,667
7	Odra	Ścinawa	1980	2019	155	1987	-0,135	-0,219
8	Odra	Głogów	1980	2019	174	2013	-0,246	-0,516
9	Odra	Nowa Sól	1980	2019	196	1997	-0,280	-0,558
10	Odra	Cigacice	1980	2019	241	2006	-0,383	-0,818
11	Odra	Nietków	1980	2019	163	2012	-0,233	-0,536
12	Odra	Połęcko	1980	2019	136	1987	-0,159	-0,341
13	Odra	Słubice	1980	2014	119	1987	-0,155	-0,448
14	Odra	Gozdowice	1980	2014	104	1987	-0,092	-0,231
15	Odra	Bielinek	1980	2014	122	1987	-0,112	-0,353
16	Warta	Bobry	1981	2019	127	1995	0,075	0,133
17	Warta	Działoszyn	1981	2015	121	1997	-0,220	-0,438
19	Warta	Burzenin	1981	2017	180	1999	-0,300	-0,667
20	Warta	Sieradz	1981	2015	132	1997	-0,169	-0,538
21	Warta	Uniejów	1981	2014	205	1997	-0,445	-1,105
22	Warta	Poznań-Most Rocha	1981	2015	142	2010	-0,248	-0,567
23	Warta	Oborniki	1981	2014	90	1987	-0,023	-0,063
24	Warta	Wronki	1981	2014	105	1987	-0,101	-0,227
25	Warta	Skwierzyna	1981	2014	109	1987	-0,199	-0,769
26	Warta	Gorzów Wielkopolski	1981	2014	112	1987	-0,186	-0,704
27	Warta	Kostrzyn nad Odrą	1981	2014	79	1987	-0,072	-0,250
28	Myśla	Dolsk	1981	2019	167	2004	-0,241	-0,385
29	Czerna	Żagań	1984	2017	149	2006	-0,276	-0,600
30	Barycz	Odolanów	1981	2019	176	2013	-0,289	-0,514
31	Barycz	Osetno	1981	2017	184	1997	-0,257	-0,821
32	Kaczawa	Świerzawa	1981	2017	145	1987	-0,270	-0,500
33	<i>Widawa</i>	<i>Michalice</i>	<i>1951</i>	<i>2000</i>	<i>320</i>	<i>1970</i>	<i>-0,087</i>	<i>-0,095</i>
34	Widawa	Krzyżanowice	1987	2018	144	1995	0,119	0,043
35	Bystrzyca	Jugowice	1981	2019	164	2001	0,157	0,000
36	Bystrzyca	Jarnołtów	1981	2019	169	2012	-0,202	-0,500
37	Ślęza	Białobrzegie	1981	2019	257	1997	-0,487	-1,364
38	Bogacica	Domaradz	1981	2016	170	2000	-0,331	-1,000
39	Mała Panew	Krupski Młyn	1980	2019	120	2006	-0,085	-0,108

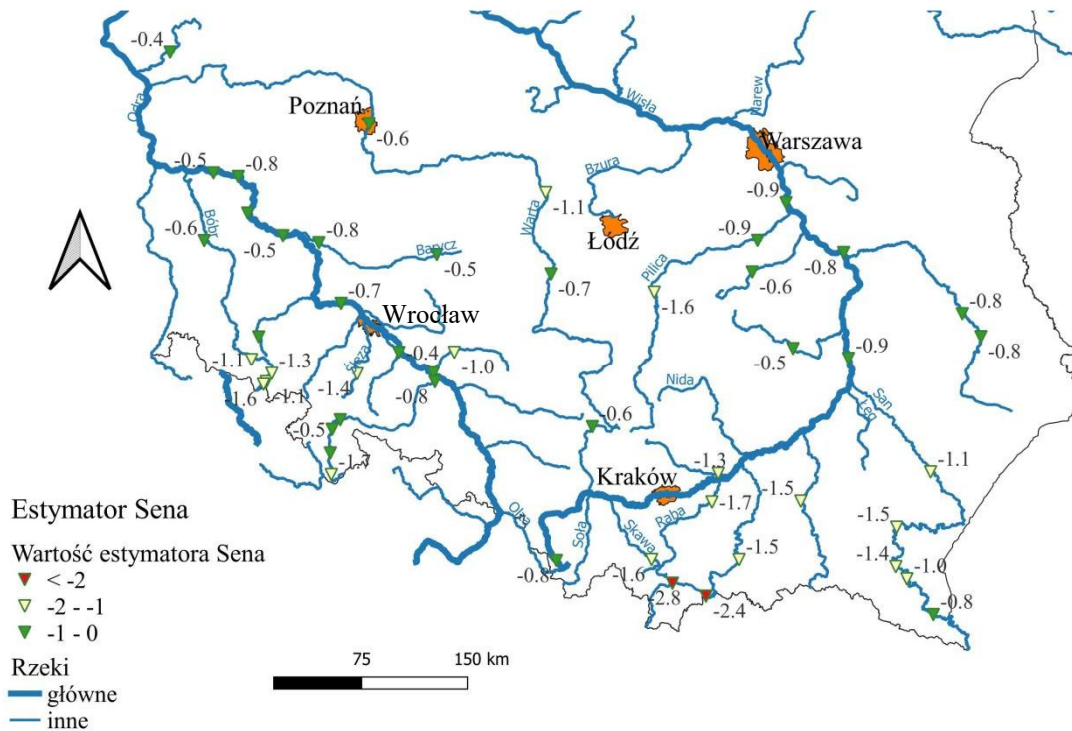
40	Mała Panew	Staniszczew Wielkie	1980	2017	99	2013	-0,097	-0,125
41	<i>Nysa Kłodzka</i>	<i>Międzylesie</i>	<i>1980</i>	<i>2018</i>	<i>293</i>	<i>2006</i>	<i>-0,405</i>	<i>-1,667</i>
42	<i>Nysa Kłodzka</i>	<i>Bystrzyca Kłodzka</i>	<i>1980</i>	<i>2019</i>	<i>175</i>	<i>2006</i>	<i>-0,244</i>	<i>-0,833</i>
43	<i>Nysa Kłodzka</i>	<i>Kłodzko</i>	<i>1951</i>	<i>2008</i>	<i>416</i>	<i>2006</i>	<i>-0,229</i>	<i>-0,500</i>
44	<i>Nysa Kłodzka</i>	<i>Bardo</i>	<i>1980</i>	<i>2019</i>	<i>193</i>	<i>2011</i>	<i>-0,271</i>	<i>-0,910</i>
45	<i>Nysa Kłodzka</i>	<i>Skorogoszcz</i>	<i>1980</i>	<i>2018</i>	<i>221</i>	<i>1997</i>	<i>-0,352</i>	<i>-0,800</i>
46	<i>Bóbr</i>	<i>Bukówka</i>	<i>1981</i>	<i>2012</i>	<i>184</i>	<i>1988</i>	<i>-0,450</i>	<i>-1,633</i>
47	<i>Bóbr</i>	<i>Błażkowa</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>277</i>	<i>2006</i>	<i>-0,422</i>	<i>-1,063</i>
48	<i>Bóbr</i>	<i>Kamienna Góra</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>192</i>	<i>1987</i>	<i>-0,338</i>	<i>-1,286</i>
50	<i>Bóbr</i>	<i>Wojanów</i>	<i>1981</i>	<i>2018</i>	<i>216</i>	<i>2006</i>	<i>-0,292</i>	<i>-1,071</i>
51	<i>Bóbr</i>	<i>Jelenia Góra</i>	<i>1981</i>	<i>2018</i>	<i>93</i>	<i>2012</i>	<i>-0,034</i>	<i>0,000</i>
52	<i>Wisła</i>	<i>Wisła</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>181</i>	<i>1991</i>	<i>-0,250</i>	<i>-0,750</i>
53	<i>Wisła</i>	<i>Ustroń-Oblaziec</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>162</i>	<i>1990</i>	<i>-0,123</i>	<i>-0,333</i>
54	<i>Wisła</i>	<i>Skoczów</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>147</i>	<i>1987</i>	<i>-0,162</i>	<i>-0,542</i>
55	<i>Wisła</i>	<i>Karsy</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>60</i>	<i>2002</i>	<i>0,018</i>	<i>0,000</i>
56	<i>Wisła</i>	<i>Szczucin</i>	<i>1981</i>	<i>2017</i>	<i>84</i>	<i>2013</i>	<i>-0,065</i>	<i>-0,142</i>
57	<i>Wisła</i>	<i>Sandomierz</i>	<i>1972</i>	<i>2019</i>	<i>219</i>	<i>1987</i>	<i>-0,184</i>	<i>-0,345</i>
58	<i>Wisła</i>	<i>Zawichost</i>	<i>1972</i>	<i>2019</i>	<i>108</i>	<i>2013</i>	<i>-0,004</i>	<i>0,000</i>
59	<i>Wisła</i>	<i>Annopol</i>	<i>1951</i>	<i>2007</i>	<i>757</i>	<i>1987</i>	<i>-0,416</i>	<i>-0,950</i>
60	<i>Wisła</i>	<i>Puławy</i>	<i>1970</i>	<i>2003</i>	<i>98</i>	<i>1987</i>	<i>-0,098</i>	<i>-0,692</i>
61	<i>Wisła</i>	<i>Dęblin</i>	<i>1951</i>	<i>2007</i>	<i>703</i>	<i>1987</i>	<i>-0,323</i>	<i>-0,750</i>
62	<i>Wisła</i>	<i>Gusin</i>	<i>1976</i>	<i>2016</i>	<i>277</i>	<i>2006</i>	<i>-0,436</i>	<i>-0,897</i>
64	<i>Pilica</i>	<i>Sulejów-Kopalnia</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>270</i>	<i>2006</i>	<i>-0,445</i>	<i>-1,588</i>
65	<i>Pilica</i>	<i>Białobrzegi</i>	<i>1968</i>	<i>2019</i>	<i>347</i>	<i>1987</i>	<i>-0,284</i>	<i>-0,877</i>
66	<i>Radomka</i>	<i>Słowików</i>	<i>1961</i>	<i>2014</i>	<i>356</i>	<i>1987</i>	<i>-0,292</i>	<i>-0,613</i>
67	<i>Wieprz</i>	<i>Krasnystaw</i>	<i>1981</i>	<i>2017</i>	<i>236</i>	<i>2006</i>	<i>-0,338</i>	<i>-0,800</i>
68	<i>Wieprz</i>	<i>Trawniki</i>	<i>1976</i>	<i>2017</i>	<i>188</i>	<i>2006</i>	<i>-0,264</i>	<i>-0,800</i>
69	<i>Wieprz</i>	<i>Lubartów</i>	<i>1981</i>	<i>2018</i>	<i>140</i>	<i>2006</i>	<i>-0,202</i>	<i>-0,615</i>
70	<i>Wieprz</i>	<i>Kośmin</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>104</i>	<i>2013</i>	<i>-0,111</i>	<i>-0,400</i>
71	<i>Kamienna</i>	<i>Bzin</i>	<i>1981</i>	<i>2014</i>	<i>61</i>	<i>1995</i>	<i>0,015</i>	<i>0,000</i>
72	<i>Kamienna</i>	<i>Kunów</i>	<i>1981</i>	<i>2014</i>	<i>138</i>	<i>1999</i>	<i>-0,243</i>	<i>-0,458</i>
73	<i>San</i>	<i>Dwernik</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>127</i>	<i>2006</i>	<i>-0,168</i>	<i>-0,560</i>
74	<i>San</i>	<i>Zatwarnica</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>193</i>	<i>2006</i>	<i>-0,258</i>	<i>-0,773</i>
75	<i>San</i>	<i>Lesko</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>300</i>	<i>2006</i>	<i>-0,398</i>	<i>-1,000</i>
76	<i>San</i>	<i>Olchowce</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>324</i>	<i>2006</i>	<i>-0,442</i>	<i>-1,424</i>
77	<i>San</i>	<i>Dynów</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>235</i>	<i>2006</i>	<i>-0,363</i>	<i>-1,500</i>
78	<i>San</i>	<i>Przemyśl</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>161</i>	<i>2006</i>	<i>-0,182</i>	<i>-0,577</i>
81	<i>San</i>	<i>Leżachów</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>183</i>	<i>2013</i>	<i>-0,286</i>	<i>-1,061</i>
82	<i>San</i>	<i>Rzuchów</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>143</i>	<i>2006</i>	<i>-0,189</i>	<i>-0,586</i>
83	<i>San</i>	<i>Nisko</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>114</i>	<i>1997</i>	<i>-0,151</i>	<i>-0,500</i>
84	<i>San</i>	<i>Radomyśl</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>155</i>	<i>2006</i>	<i>-0,213</i>	<i>-0,556</i>
85	<i>Strwiąż</i>	<i>Krościenko</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>162</i>	<i>2006</i>	<i>-0,189</i>	<i>-0,657</i>
86	<i>Wisłoka</i>	<i>Żółków</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>230</i>	<i>1994</i>	<i>0,112</i>	<i>0,103</i>
87	<i>Wisłoka</i>	<i>Łabuzie</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>304</i>	<i>2006</i>	<i>-0,467</i>	<i>-1,520</i>

90	<i>Dunajec</i>	<i>Nowy Targ</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>338</i>	<i>2006</i>	<i>-0,602</i>	<i>-2,786</i>
91	<i>Dunajec</i>	<i>Sromowce Wyżne</i>	<i>1981</i>	<i>2017</i>	<i>294</i>	<i>1992</i>	<i>-0,509</i>	<i>-2,404</i>
92	<i>Dunajec</i>	<i>Nowy Sącz</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>252</i>	<i>2006</i>	<i>-0,351</i>	<i>-1,478</i>
93	Dunajec	Zgłobice	1981	2019	154	1987	-0,204	-0,371
94	Dunajec	Żabno	1981	2019	130	2006	-0,113	-0,333
95	<i>Szreniawa</i>	<i>Biskupice</i>	<i>1981</i>	<i>2017</i>	<i>260</i>	<i>1997</i>	<i>-0,487</i>	<i>-1,345</i>
96	Raba	Rabka	1985	2019	138	2006	-0,221	-0,815
97	Raba	Stróża	1981	2019	137	2006	-0,133	-0,400
98	<i>Raba</i>	<i>Proszówki</i>	<i>1981</i>	<i>2017</i>	<i>256</i>	<i>2006</i>	<i>-0,442</i>	<i>-1,667</i>
99	<i>Skawa</i>	<i>Jordanów</i>	<i>1981</i>	<i>2019</i>	<i>232</i>	<i>2006</i>	<i>-0,353</i>	<i>-1,600</i>
100	Skawa	Sucha Beskidzka	1981	2019	140	2013	-0,118	-0,543
101	Skawa	Zator	1981	2018	98	1987	0,013	0,000
102	<i>Przemsza</i>	<i>Piwoń</i>	<i>1980</i>	<i>2018</i>	<i>194</i>	<i>1997</i>	<i>-0,258</i>	<i>-0,600</i>
104	Soła	Żywiec	1980	2019	177	2006	-0,216	-0,655
105	Soła	Oświęcim	1981	2018	126	1987	-0,098	-0,083

Tablica 2 wskazuje na dużą zmienność liczby zjawisk lodowych obserwowanych corocznie w rzekach południowej Polski. Kursywą zaznaczono postępowania z wynikami testu Pettitta charakteryzujące się poziomem istotności co najmniej $\alpha = 0,05$. Oznacza to, że choć zmiana w zestawach danych została wykryta we wszystkich postępowaniach, test Pettitta tylko dla 33 stacji (z 97 analizowanych) daje możliwość odrzucenia hipotezy H_0 w założonym przedziale ufności. Test ten wskazuje w którym okresie nastąpiła jedna zmiana, jednakże nie daje możliwości wykrycia wszystkich zmian (jeśli jest ich więcej niż jedna) i nie określa jak duże one są. Zatem ujednorodnienie ciągu wymagałoby większej ilości danych i dodatkowych analiz przekraczających zakres niniejszej pracy. Interesujące jest to, że niezależnie od wielkości i reżimu rzeki oraz lokalizacji postępowania, przesunięcie w szeregach czasowych było zwykle wykrywane w okresie zaczynającym się przed przełomem XX i XXI wieku i kończącym się kilka lat po nim (1997-2006). Okres ten zbiega się z obserwowanym wzrostem temperatur w Polsce, ale także z ogromnym, szybkim wzrostem gospodarczym kraju, który wpłynął także na politykę gospodarki wodnej w zlewniach.

Wyniki testu Manna-Kendalla dla przedziału istotności $\alpha = 0,05$ zaznaczono w tablicy 2 pogrubioną czcionką (rekordy spełniające zarówno test Manna-Kendala, jak i Pettitta zaznaczono pogrubioną kursywą). Wszystkie wartości współczynnika τ Manna-Kendala, z wyjątkiem ośmiu (nr 1 Koźle na Odrze, nr 16 Bobry na Warcie, nr 34 Krzyżanowice na Widawie, nr 35 Jugowice na Bystrzycy, nr 55 Karsy na rzece Wiśle, nr 71 Bzin na rzece Kamiennej, nr 86 Żółków na rzece Wisłoce i nr 101 Zator na rzece Skawie), wskazują na zmniejszającą się liczbę zjawisk lodowych w kolejnych latach obserwacji. Spośród wszystkich 97 analizowanych szeregów czasowych, 49 wykazuje monotoniczny (i ujemny) statystycznie istotny trend (P Manna-Kendala $< 0,05$) w liczbie dni ze zjawiskami lodowymi.

Informacje o trendzie liczby zjawisk lodowych uzupełniają wartości współczynnika kierunkowego Sena (tablica 2 i rys. 2). Wyrażają one medianę wzrostu lub spadku danej wartości w zbiorze danych w ciągu roku. Wyniki przedstawione w tablicy 2 i na mapie (rys. 2) wyraźnie pokazują, że ogólna liczba zjawisk lodowych w ostatnich latach stopniowo, ale konsekwentnie maleje. Należy zauważyć, że spadek liczby zjawisk lodowych jest na ogół szybszy w zlewniach górskich (czerwone i żółte trójkąty na mapie) niż w środkowych i nizinnych częściach rzek (zielone trójkąty).



Rys. 2. Mapa istotnych statystycznie wartości estymatora Sena
 Fig. 2. Map of statistically significant values of the Sen's slope

5. PODSUMOWANIE

Wstępna analiza danych dotyczących zjawisk lodowych w południowej Polsce wykazała duży wpływ zmian klimatycznych na zjawiska lodowe w umiarkowanej strefie klimatycznej. Zarówno zlewnia górską (szybsze warunki przepływu), jak i nizinna niemal w równym stopniu narażone są miarę upływu czasu na coraz mniejszą liczbę dni z lodem. Gwałtowna zmiana stwierdzona na przełomie wieków może wynikać nie tylko ze zmian klimatycznych, ale także z presji antropogenicznej będącej konsekwencją rozwoju gospodarczego Polski.

Stopniowe zanikanie lodu w rzekach bez wątpienia zaburza prawidłowość charakterystycznego dla naszej strefy klimatycznej cyklu hydrologicznego pozbawiając zlewnie chwilowej akumulacji wody, ale także zmienia warunki rozwoju fauny i flory wodnej.

Dane udostępniane w repozytoriach IMGW– PIB umożliwiają dalszą i głębszą analizę zjawisk lodowych w Polsce.

BIBLIOGRAFIA

- Agafonova, S.A., Frolova, N.L., Krylenko, I.N. et al. 2017, *Dangerous ice phenomena on the lowland rivers of European Russia*. Nat Hazards 88, 171–188. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2580-x>
- Bączyk, A., Suchożebrski, J., 2016. *Zmienność przebiegu zjawisk lodowych na Bugu w latach 1903–2012*. Inż. Ekolog. 49, 136–142, <https://doi.org/10.12912/23920629/64511>
- Beaulieu, C., Chen, J., and Sarmiento, J.L., 2012. *Change-point analysis as a tool to detect abrupt climate variations*. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 370 (1962), 1228–1249. doi:10.1098/rsta.2011.0383
- Beltaos, S., Burrell, B.C., 2003. *Climatic change and river ice breakup*. Canadian Journal of Civil Engineering 30, 145–155.

- Bertilsson, S., Burgin, A., Carey, C. C., Fey, S. B., Grossart, H.-P., Grubisic, L. M., Jones, I., Kirillin, G., Lennon, J., Shade, A., Smyth, R. et al., 2013. *The under-ice microbiome of seasonally frozen lakes*. *Limnology & Oceanography*, 58(6), 1998–2012.
- Borshch, S.V., Ginzburg, B.M. & Soldatova, I.I., 2001. *Modeling the Development of Ice Phenomena in Rivers as Applied to the Assessment of Probable Changes in Ice Conditions at Various Scenarios of the Future Climate*. *Water Resources* 28, 194–200. <https://doi.org/10.1023/A:1010387802874>.
- Chambers, P.A., Scrimgeour, G.J., Pietroniro, A., 1997. *Winter oxygen conditions in ice-covered rivers: the impact of pulp mill and municipal effluents*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54: 2796–2806.
- Changrang Zhou, Ronald van Nooijen, Alla Kolechkina & Markus Hrachowitz, 2019. *Comparative analysis of nonparametric change-point detectors commonly used in hydrology*, *Hydrological Sciences Journal*, 64:14, 1690-1710, DOI: 10.1080/02626667.2019.1669792
- Deepesh Machiwal, Madan Kumar Jha, Deepesh Machiwal, Madan Kumar Jha, 2012. *Efficacy of Time Series Tests: A Critical Assessment*, *Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice*, 10.1007/978-94-007-1861-6, (139-164)
- Esterby, S.R., 1996. *Review of methods for the detection and estimation of trends with emphasis on water quality applications*. *Hydrol. Process.*, 10: 127-149. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199602\)10:2<127::AID-HYP354>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199602)10:2<127::AID-HYP354>3.0.CO;2-8)
- Girjatowicz, J., 2015. *Ice phenomena as a tourism asset on the southern coast of the Baltic Sea*. *Tourism* 25, DOI: <https://doi.org/10.2478/tour-2014-0022>.
- Graf, R., 2020. *Estimation of the Dependence of Ice Phenomena Trends on Air and Water Temperature in River*. *Water* 12, 3494. <https://doi.org/10.3390/w12123494>.
- Iman Mallakpour & Gabriele Villarini, 2016. *A simulation study to examine the sensitivity of the Pettitt test to detect abrupt changes in mean*, *Hydrological Sciences Journal*, 61:2, 245-254, DOI: 10.1080/02626667.2015.1008482
- Jansen, J., MacIntyre, S., Barrett, D.C., Chin, Y.P., Cortés, A., Forrest, A.L., Hrycik, A.R., Martin, R., McMeans, B.C., Rautio M., Schwefel, R., 2021. *Winter Limnology: How do Hydrodynamics and Biogeochemistry Shape Ecosystems Under Ice?* *JGR Biogeosciences*, <https://doi.org/10.1029/2020JG006237>.
- Jaxk Reeves, Jien Chen, Xiaolan L. Wang, Robert Lund, and Qi Qi Lu, 2007. *A review and comparison of changepoint detection techniques for climate data*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46 (6), 900–915.
- Katz, R.W., 2013. *Statistical methods for nonstationary extremes*, Chapter 2, In: A. AghaKouchak, et al., eds. *Extremes in a changing climate: detection, analysis, and uncertainty*. 65. New York, NY: Springer, 15–37
- Kendall, M.G., 1975. *Rank Correlation Methods*, 4th edition, Charles Griffin, London.
- Kundzewicz, Z.W. and Robson, A.J., 2004. *Change detection in hydrological records, a review of the methodology*. *Hydrological Sciences Journal*, 49 (1), 7–19. doi:10.1623/hysj.49.1.7.53993
- Lieven Clement, Olivier Thas, 2008. *Nonparametric trend detection in river monitoring network data: a spatio-temporal approach*, *Environmetrics*, 10.1002/env.929, 20, 3, (283-297).
- Łukaszewicz, J.T., Graf, R., 2020. *The variability of ice phenomena on the rivers of the Baltic coastal zone in the Northern Poland*. *J. Hydrol. Hydromech.* 68. DOI: 10.2478/johh-2019-0025 1
- Magnuson, J. et al., 2000. *Historical Trends in Lake and River Ice Cover in the Northern Hemisphere*, *Science*, Vol. 289, 1743-1746,
- Mann, H.B., 1945. *Non-parametric tests against trend*, *Econometrica* 13:163-171.
- Marszelewski, W., Pawłowski, B., 2019. *Long-Term Changes in the Course of Ice Phenomena on the Oder River along the Polish-German Border*. *Water Resour Manage* 33, 5107-5120. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02417-2>
- Mirosław-Świątek D, Marcinkowski P, Kochanek K, Wassen MJ.,2020. *The impact of climate change on flow conditions and wetland ecosystems in the Lower Biebrza River (Poland)*. *PeerJ*. 2020 Sep 11;8:e9778. doi: 10.7717/peerj.9778. PMID: 32974093, PMCID: PMC7489244.
- Ozgun Kisi, Murat Ay, 2014. *Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey*, *Journal of Hydrology*, 10.1016/j.jhydrol.2014.03.005, 513, (362-375)
- Pawłowski, B., 2015. *Determinants of change in the duration of ice phenomena on the Vistula River in Toruń*. *J. Hydrol. Hydromech.* 63, 145–153. DOI: 10.1515/johh-2015-0017 145.
- Pettitt, A.N., 1979. *A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem*. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28: 126-135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Ptak, M., Choiński, A., 2016. *Ice phenomena in rivers of the coastal zone (southern Baltic) in the years 1956-2015*. *Baltic Coastal Zone* 20, 73-83.

- Šarauskienė, D., Jurgelėnaitė A., 2008. *Impact of Climate Change on River Ice Phenology in Lithuania*. Environmental Research, Engineering and Management, 46, 13-22.
- Sen, P.K., 1968. *Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau*, Journal of the American Statistical Association, 63:324, 1379-1389, DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
- Sharma, S., Richardson, D.C., Woolway, R.I., Imrit, M.A., Bouffard, D., Blagrove, K., Daly, J., Filazzola, A., Granin, N., Korhonen, J., Magnuson, J., Marszelewski, W., Matsuzaki, S.S., Perry, W., Robertson, D.M., Rudstam, L.G., Weyhenmeyer, G.A., Yao, H., 2021. *Loss of Ice Cover, Shifting Phenology, and More Extreme Events in Northern Hemisphere Lakes* JGR Biogeosciences, <https://doi.org/10.1029/2021JG006348>
- Shuci Liu, Danlu Guo, J. Angus Webb, Paul J. Wilson, Andrew W. Western, 2020. *A simulation-based approach to assess the power of trend detection in high- and low-frequency water quality records*, Environmental Monitoring and Assessment, 10.1007/s10661-020-08592-9, 192, 10, (2020)
- Smith, L., 2000. *Trends in Russian arctic river-ice formation and breakup, 1917 to 1994*. Physical Geography 21, 46-56.
- Stern, N., 2006. *Stern review: the economics of climate change*. United Kingdom.
- Takács, K., Nagy, B., Kern, Z., 2014. *Human impacts on river ice regime in the Carpathian Basin*. Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-981, 2014 EGU General Assembly 2014.
- Thorsten Pohlert, 2020. *Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection*, R Package.
- Yue, S., Pilon, P., and Cavadias, G., 2002. *Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series*. Journal of Hydrology, 259 (1-4), 254-271. doi:10.1016/S0022-1694(01)00594-7doi:10.1175/JAM2493.1
- Yuefeng Wang, Youpeng Xu, Hossein Tabari, Jie Wang, Qiang Wang, Song Song, Zunle Hu, 2019. *Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall in the Yangtze River Delta, eastern China*, Atmospheric Research, 10.1016/j.atmosres.2019.104673, (104673), (2019)
- Zobrist, J., Schoenenberger, U., Figura, S., Hug, S.J., 2018. *Long-term trends in Swiss rivers sampled continuously over 39 years reflect changes in geochemical processes and pollution*, Environmental Science and Pollution Research, 10.1007/s11356-018-1679-x, 25, 17, (16788-16809).

