



Sezonowe różnicowanie temperatury wody na przykładzie wybranych rzek nizinnych Mazowsza

Seasonal differentiation of water temperature on the example of lowland Mazovian rivers

Maksym Łaszewski 

Uniwersytet Warszawski

Wydział Geografii i Studiów Regionalnych

ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa

m.laszewski@uw.edu.pl

Zarys treści. Celem opracowania była ocena sezonowego różnicowania temperatury wody trzech rzek nizinnych, położonych w centralnej Polsce. Materiał empiryczny pozyskano z monitoringu temperatury wody, prowadzonego za pomocą cyfrowych rejestratorów w sześciu punktach pomiarowych w okresie od 1 maja 2015 r. do 30 kwietnia 2019 r. z 30 minutowym krokiem czasowym. Tło hydrometeorologiczne monitoringu, odniesione do wielolecia 1989–2019, określono na podstawie danych ze stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie oraz posterunków wodowskazowych. Uzyskane wyniki wskazują, że sezonowy przebieg temperatury wody Jeziorki, Świdra oraz Utraty był zgodny z przebiegiem temperatury powietrza; we wszystkich punktach pomiarowych przeciętnie najwyższą temperaturą wody odznaczył się lipiec, natomiast najniższą – styczeń. Maksymalne wartości temperatury wody, przekraczające 25°C, notowano od czerwca do sierpnia, natomiast minimalne (0,0°C) – od listopada do marca. Największą zmienność temperatury wody zanotowano wiosną, tj. w kwietniu i maju, natomiast najmniejszą w okresie zimowym, a zwłaszcza w styczniu. Na podstawie analizy rozkładu statystycznego oraz grupowania temperatury wody metodą aglomeracji zidentyfikowano w ciągu roku cztery okresy, charakteryzujące się odmiennymi cechami termicznymi. Wartości współczynników korelacji, opisujących związek temperatury wody i temperatury powietrza, wskazały na zróżnicowaną sezonowo zależność temperatury wody od warunków meteorologicznych. Związek ten był wyraźnie silniejszy w okresie wiosennego wzrostu i jesiennego spadku temperatury wody, natomiast słabszy w miesiącach zimowych i letnich.

Słowa kluczowe: temperatura wody, sezonowe różnicowanie, monitoring, cieki nizinne, Nizina Mazowiecka.

Keywords: water temperature, seasonal differentiation, monitoring, lowland watercourses, Mazovian Lowland, Poland.

Wstęp

Temperatura należy do najważniejszych parametrów charakteryzujących jakość wód płynących i wywiera istotny wpływ na szereg innych parametrów abiotycznych, m.in. rozpuszczalność tlenu, toksyczność substancji chemicznych oraz tempo procesów samooczyszczania (Poole i Berman, 2001; Caissie, 2006). W ostatnich latach szczególnie wyraźnie wyeksponowano również ekologiczne znaczenie temperatury wody, w związku z jej zasadniczym wpływem na cykle życiowe organizmów wodnych (Beschta i inni, 1987) – udokumentowano bowiem, iż maksymalne wartości temperatury wody wyznaczają granice występowania

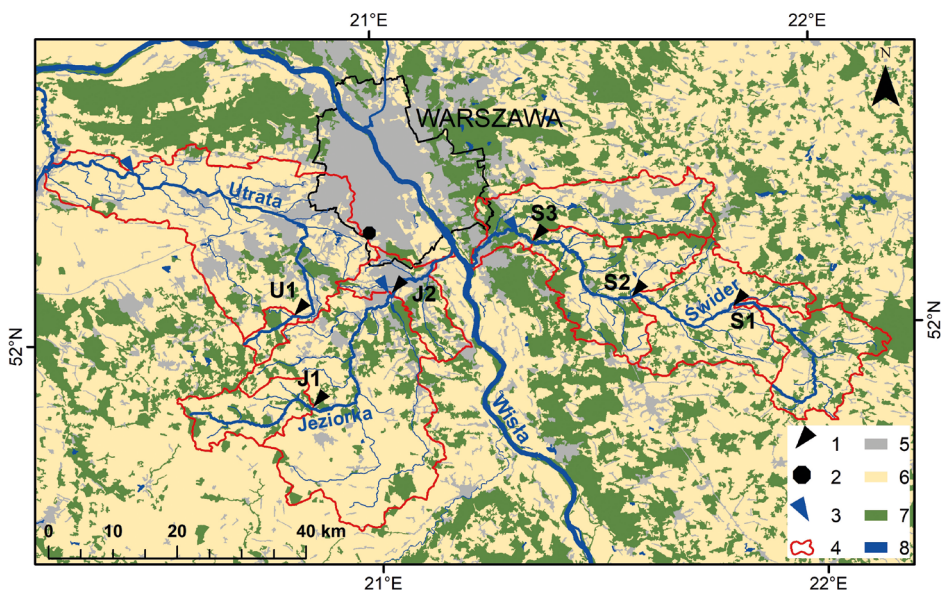
nia określonych gatunków ryb i bezkręgowców, zmienność sezonowa i dobowa warunkuje ich aktywność i wzrost, natomiast czas występowania określonych wartości temperatury w roku ma duże znaczenie w kontekście sukcesu rozrodczego oraz migracji (Selong i inni, 2001; Sloat i Osterback, 2013; Benjamin i inni, 2016). Jednocześnie, w porównaniu do pozostałych parametrów jakości wody, temperatura jest relatywnie prosta do obiektywnej kwantyfikacji czasowo-przestrzennej oraz łatwa do prognozowania (Webb i inni, 2008). Rozpoznanie warunków termicznych cieków, oprócz wymiernego aspektu poznawczego, powinno zatem należeć do priorytetowych działań instytucji ochrony środowiska oraz użytkowników rybackich cieków, szczególnie tych zamieszkiwanych przez cenne przyrodniczo bądź sportowo gatunki ryb (Malcolm i inni, 2008; Imholt i inni, 2013). Badania temperatury wody mają istotne znaczenie również w przypadku rzek obciążonych zanieczyszczeniami termicznymi, powodującymi liczne konsekwencje środowiskowe, m.in. zmiany cyklu fenologicznego organizmów oraz ekspansję gatunków obcych (Wałkuska i Wilczek, 2010).

Pomimo dużego znaczenia temperatury wody zagadnienia dotyczące termiki wód płynących były poruszane dotychczas w polskiej literaturze hydrologicznej stosunkowo rzadko (Marszelewski i Strzyżewska-Pietrucień, 2009). Większość prac koncentrowała się na problematyce transformacji ustroju termicznego rzek, wywołanej funkcjonowaniem zbiorników zaporowych, która została szczególnie dobrze udokumentowana w przypadku karpackich dopływów Wisły (m.in. Wiejaczka, 2011; Smółkiewicz i inni, 2014; Kędra i Wiejaczka, 2018). Odrębna grupa opracowań została poświęcona ogólnej charakterystyce parametrów ustroju termicznego wybranych cieków, istotnych z gospodarczego lub ekologicznego punktu widzenia, m.in. Warty (Graf, 2015), Raduni (Radtke i Dobosz, 2015), Proсны (Ptak i Nowak, 2017) oraz Szprotawy i Czernej Wielkiej (Ptak, 2017). Niewielka liczba prac dotyczyła zróżnicowania cech termicznych w większej skali przestrzennej; taką analizę przeprowadzono jedynie dla dorzecza Wisły (Oksiuta, 2010) oraz strumieni tatrzańskich (Żelazny i inni, 2018). Istotnym wątkiem badawczym były również długoterminowe tendencje zmian cech termicznych cieków, wyjaśniane wzrostem temperatury powietrza (Marszelewski i Pius, 2015; Ptak i inni, 2016), jak również zagadnienia związane z modelowaniem temperatury wody za pomocą modeli statystycznych i sztucznych sieci neuronowych (Piotrowski i inni, 2015; Graf i inni, 2019).

Analiza prac poświęconych temperaturze wód płynących w Polsce pozwala postawić dwa wnioski, mające decydujące znaczenie w sformułowaniu celu badawczego niniejszego opracowania. Przede wszystkim, większość z przytoczonych opracowań została oparta na danych empirycznych pochodzących z monitoringu IMGW-PIB, które nie uwzględniają wewnątrzdobowej zmienności temperatury wody (wykonywane są bowiem wyłącznie raz w ciągu doby o 06:00 UTC), a zatem uniemożliwiają jej pełną ocenę w ujęciu sezonowym. Ponadto, z uwagi na ograniczoną liczbę posterunków wodowskazowych, niewielkie cieki nizinne sporadycznie stanowiły obiekt takich badań, a opublikowane dotychczas prace bazowały głównie na krótkookresowych pomiarach ręcznych prowadzonych z wykorzystaniem przenośnych konduktometrów oraz tlenomierzy (Bartnik i inni, 2013; Rajwa-Kuligiewicz i inni, 2015). W związku z powyższym dokonano oceny sezonowego zróżnicowania warunków termicznych trzech niewielkich mazowieckich rzek nizinnych, wykorzystując w tym celu wysokorozdzielczą, czteroletnią serię pomiarową uzyskaną za pomocą cyfrowych rejestratorów temperatury wody. Szczegółowe cele badawcze opracowania objęły identyfikację sezonowych prawidłowości rozkładu temperatury wody w poszczególnych miesiącach roku hydrologicznego oraz określenie siły związku pomiędzy temperaturą wody i temperaturą powietrza.

Obszar badań

Monitoring temperatury wody prowadzono w zlewni Jeziorki, Świdra oraz Utraty, położonych w granicach województwa mazowieckiego, w okolicy Warszawy (ryc. 1). Zlewnie rozciągają się w obrębie polodowcowej Niziny Mazowieckiej oraz Niziny Południowopodlaskiej, zbudowanych z utworów gliniastych, piaszczystych oraz żwirowych. Warunki klimatyczne obszaru odznaczają się relatywnie niewielkim zróżnicowaniem przestrzennym, co jest efektem małych deniwelacji terenu (średnia wysokość bezwzględna waha się od 148 m n.p.m. do 175 m n.p.m.), braku barier orograficznych oraz względnie stabilnego kierunku napływu mas powietrza (Stopa-Boryczka i inni, 2012). Klimat ma tu charakter przejściowy; średnia roczna temperatura powietrza na stacji Warszawa-Okęcie, położonej centralnie w stosunku do zlewni, wyniosła w wieloleciu 1989–2019 8,9°C, natomiast przeciętna suma opadu – 545 mm. Według klasyfikacji I. Dynowskiej (1971), a także D. Wrzesińskiego (2017), badane rzeki odznaczają się ustrojem hydrologicznym śnieżnym (niwalnym) silnie wykształconym, który charakteryzuje się największymi zmianami odpływu w cyklu rocznym – od wysokiego wezbrania roztopowego na wiosnę po głęboką niżówkę letnio-jesienną – co stwierdzono chociażby w przypadku Utraty (Somorowska i Łaszewski, 2017). Jak wykazała jednak I. Piętka (2009), w ostatnich latach następuje zmniejszenie znaczenia zasilania śnieżnego, co może być utożsamiane ze zmianą struktury opadów w miesiącach zimowych (Michalska, 2011).



Ryc. 1. Lokalizacja punktów monitoringu temperatury wody na tle pokrycia terenu

1 – punkt pomiarowy, 2 – stacja meteorologiczna, 3 – posterunek wodowskazowy, 4 – granica zlewni, 5 – obszary antropogeniczne, 6 – obszary rolnicze, 7 – obszary leśne, 8 – wody i obszary zabagnione
Location of water temperature measurement sites on the background of land cover

Opracowanie własne na podstawie Mapy Podziału Hydrograficznego Polski z 2010 r. oraz CORINE Land Cover 2018.
Author's own elaboration based on the 2010 Digital Hydrographic Map of Poland and CORINE Land Cover 2018.

Materiały

Pomiary temperatury wody prowadzono przy pomocy cyfrowych rejestratorów HOBO U22–001 (Onset Computer Corporation, USA) o dokładności 0,2°C, które zlokalizowano w sześciu punktach pomiarowych – dwóch w rzece Jeziorce, trzech w rzece Świder oraz jednym w rzece Utracie. Punkty rozmieszczono tak, aby objąć monitoringiem zlewnie o zróżnicowanej powierzchni, spadku oraz parametrach koryta (tab. 1); jednocześnie wykluczono bezpośrednie wpływy antropogeniczne, takie jak rzuty wód ze zbiorników oraz oczyszczalni ścieków. Przed rozmieszczeniem urządzeń w terenie ich dokładność sprawdzono za pomocą metody „ice bath”, opisaną szczegółowo przez J. Dunham i innych (2005). Różnice pomiędzy wskazaniem rejestratorów w 0,0°C wyniosły jedynie 0,07°C. Poprawność wskazań czujników weryfikowano również regularnie za pomocą elektronicznego termometru o dokładności 0,1°C; maksymalne różnice temperatury między pomiarami ręcznymi i automatycznymi osiągnęły 0,1°C.

Rejestratory zainstalowano w perforowanych rurach z PVC, które przykręcono do betonowych obciążników ustawionych na dnie koryta. Takie rozwiązanie zapewniało stabilizację czujników podczas wezbrań oraz ochronę przed bezpośrednim promieniowaniem słonecznym i rumowiskiem dennym. Rejestratory umieszczono każdorazowo tuż poniżej przemiałów lub bystrzy na głębokości ok. 40–60 cm w celu wykluczenia pojawienia się gradientu termicznego w przekroju poprzecznym. Pomiary prowadzono przez okres czterech lat, od 1 maja 2015 do 30 kwietnia 2019 r. z 30-minutową rozdzielczością czasową.

Tabela 1. Charakterystyka punktów objętych pomiarami temperatury wody
Detailed characteristics of the water temperature measurement sites

Rzeka	Punkt pomiarowy	Powierzchnia zlewni (km ²)	Odległość od źródeł (km)	Średni spadek zlewni (m/km)	Współczynnik szerokość: głębokość	Udział obszarów antropogenicznych (%)	Udział obszarów rolniczych (%)	Udział obszarów leśnych (%)
Jeziorca	J1	137,8	23,5	7,7	10,0	1,2	75,0	23,3
Jeziorca	J2	854,0	57,0	4,2	11,7	8,1	72,6	18,7
Świder	S1	219,5	32,3	5,1	12,0	4,8	66,7	28,3
Świder	S2	550,0	51,0	3,8	13,3	4,6	70,3	25,0
Świder	S3	853,3	79,3	3,6	13,8	5,4	67,1	27,3
Utrata	U1	35,6	10,3	9,6	14,0	3,8	60,1	36,2

Opracowanie własne na podstawie Mapy Podziału Hydrograficznego Polski z 2010 r., numerycznego modelu terenu SRTM, CORINE Land Cover 2018 oraz pomiarów szerokości i głębokości koryta.
Author's own elaboration based on the 2010 Digital Hydrographic Map of Poland, SRTM Digital Terrain Model, CORINE Land Cover 2018 and measurements of widths and depths of channels.

Należy dodać, iż uzyskiwane z rejestratorów dane były na bieżąco poddawane weryfikacji, mającej na celu wykrycie nieprawidłowych wartości będących efektem chwilowej ekspozycji czujników temperatury wody na warunki atmosferyczne. Przypadki takie były związane z odczytem danych, wiążącym się z wyciągnięciem czujnika z wody. Błędne wartości (łącznie kilkanaście przypadków) zostały usunięte i zastąpione wartościami interpolowanymi na podstawie dwóch sąsiednich pomiarów.

Ocenę tła hydrometeorologicznego podczas prowadzonego monitoringu temperatury wody przeprowadzono na podstawie średnich, maksymalnych i minimalnych miesięcznych wartości temperatury powietrza, miesięcznych sum opadów atmosferycznych oraz średnich miesięcznych wartości natężenia przepływu Jeziorka, Świdra i Utraty z lat 2015–2019, które odniesiono do wartości średnich dla poszczególnych miesięcy z wielolecia 1989–2019. Temperaturę powietrza oraz sumy opadów atmosferycznych pozyskano ze stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie (IMGW-PIB), natomiast dane dotyczące natężenia przepływu z posterunków wodowskazowych w Piasecznie (Jeziorka), Wólce Młudzkiej (Świder) oraz Krubicach (Utrata).

Metody badań

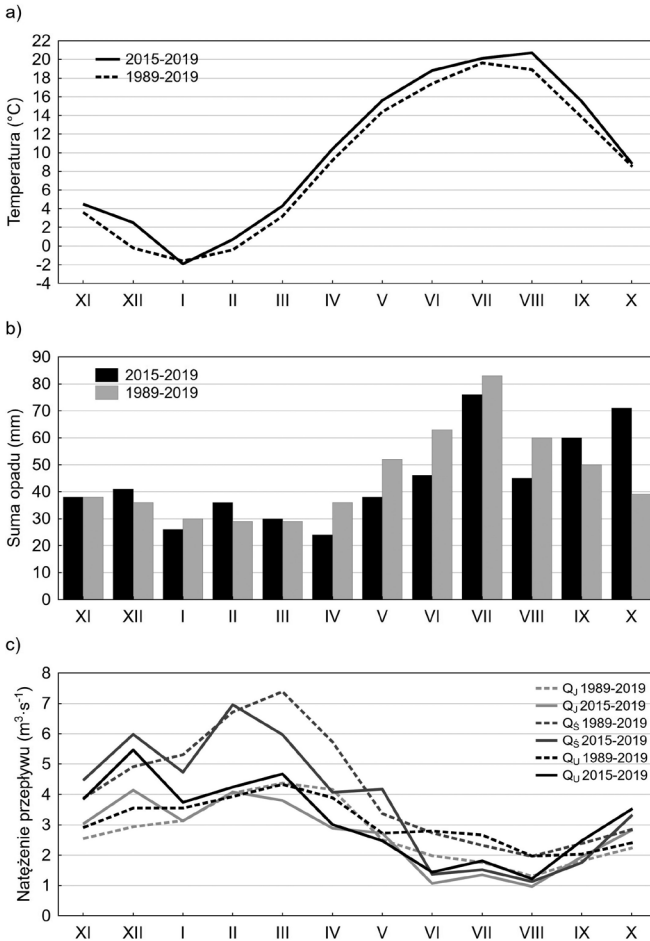
Na podstawie zweryfikowanych wartości 30-minutowych obliczono średnie, maksymalne oraz minimalne miesięczne wartości temperatury wody, które przedstawiono na tle odpowiednich miesięcznych wartości temperatury powietrza. W celu identyfikacji cech sezonowego zróżnicowania temperatury wody badanych cieków za pomocą wykresów pudełkowych zaprezentowano rozkład statystyczny 30-minutowych wartości temperatury wody, analogicznie jak w opracowaniu A. Bartnika (2017) oraz A. Halaś i innych (2019). W ten sposób dla wszystkich punktów pomiarowych określono średnią, medianę, wartości ekstremalne oraz rozstęp ćwiartkowy temperatury wody w każdym miesiącu roku hydrologicznego. Obliczono również miary zmienności temperatury wody – średni zakres doby oraz odchylenie standardowe, których miesięczny przebieg zaprezentowano w postaci graficznej. Podobieństwo warunków termicznych w poszczególnych miesiącach oceniono natomiast za pomocą metody grupowania, wykorzystując w tym celu hierarchiczną metodę aglomeracji Warda, przyjmującą jako miarę podobieństwa odległość euklidesową.

Wpływ warunków meteorologicznych na temperaturę wody określono na podstawie analizy korelacji pomiędzy temperaturą wody i temperaturą powietrza. Tym samym dla średnich dobowych wartości temperatury wody ze wszystkich punktów pomiarowych i średnich dobowych wartości temperatury powietrza ze stacji meteorologicznej Warszawa-Okęcie, zagregowanych w ujęciu miesięcznym oraz rocznym, obliczono współczynnik korelacji liniowej Pearsona. Jako próg istotności statystycznej przyjęto $p < 0,05$, a analizę korelacji, podobnie jak grupowanie, przeprowadzono w programie Statistica 13.0.

Tło hydrometeorologiczne

Okres objęty pomiarami temperatury wody okazał się względnie ciepły oraz suchy (ryc. 2). W niemal wszystkich miesiącach zanotowano bowiem wyższe niż średnia wartości temperatury powietrza, nawet o $2,7^{\circ}\text{C}$ w grudniu; jedynie w styczniu średnia temperatura

była o $0,3^{\circ}\text{C}$ niższa od normy. W odróżnieniu od wielolecia 1989–2019 najcieplejszym miesiącem w badanym okresie był sierpień, w którym średnia temperatura wyniosła $20,7^{\circ}\text{C}$ i była wyższa od średniej wieloletniej temperatury sierpnia aż o $1,8^{\circ}\text{C}$, natomiast najchłodniejszym miesiącem, podobnie jak w wieloleciu 1989–2019, był styczeń. Najwyższa absolutna temperatura powietrza na stacji Warszawa-Okęcie została zmierzona 8 sierpnia 2015 r. i wyniosła $36,6^{\circ}\text{C}$, natomiast najniższa – 7 stycznia 2017 r. ($-19,3^{\circ}\text{C}$). W miesiącach wiosennych i letnich (zwłaszcza w kwietniu, maju, czerwcu oraz sierpniu) zmierzono niższe sumy opadów od średniej wartości z wielolecia, natomiast w większości miesięcy jesienno-zimowych sumy opadów były zbliżone do średniej (listopad) bądź nieznacznie od niej wyższe (luty, wrzesień, październik). Zmienność natężenia przepływu badanych rzek w latach 2015–2019 bezpośrednio nawiązywała do zmienności warunków meteorologicznych. Najwyższe wartości natężenia przepływu obserwowano w miesiącach jesienno-zimowych (zwłaszcza w październiku, listopadzie oraz grudniu), natomiast w miesiącach letnich, przede wszystkim w czerwcu, lipcu oraz sierpniu, zaobserwowano deficyt odpływu w stosunku do wielolecia 1989–2019 (ryc. 2).



Ryc. 2. Średnie miesięczne wartości temperatury powietrza (a), miesięczne sumy opadu (b) oraz średnie miesięczne natężenie przepływu Jeziorki (Q_J), Świdra (Q_S) oraz Utraty (Q_U) (c) w latach 2015–2019 na tle wielolecia 1989–2019. Brak danych dla Q_J z roku 1999 oraz Q_U z lat 2000–2007

Mean monthly air temperature values (a), monthly precipitation totals (b), and mean monthly streamflow rates of Jeziorka (Q_J), Świder (Q_S) and Utrata (Q_U) (c) in 2015–2019 on the background of the years 1989–2019. Data for Q_J from 1999 and for Q_U from 2000–2007 are lacking. Opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB.

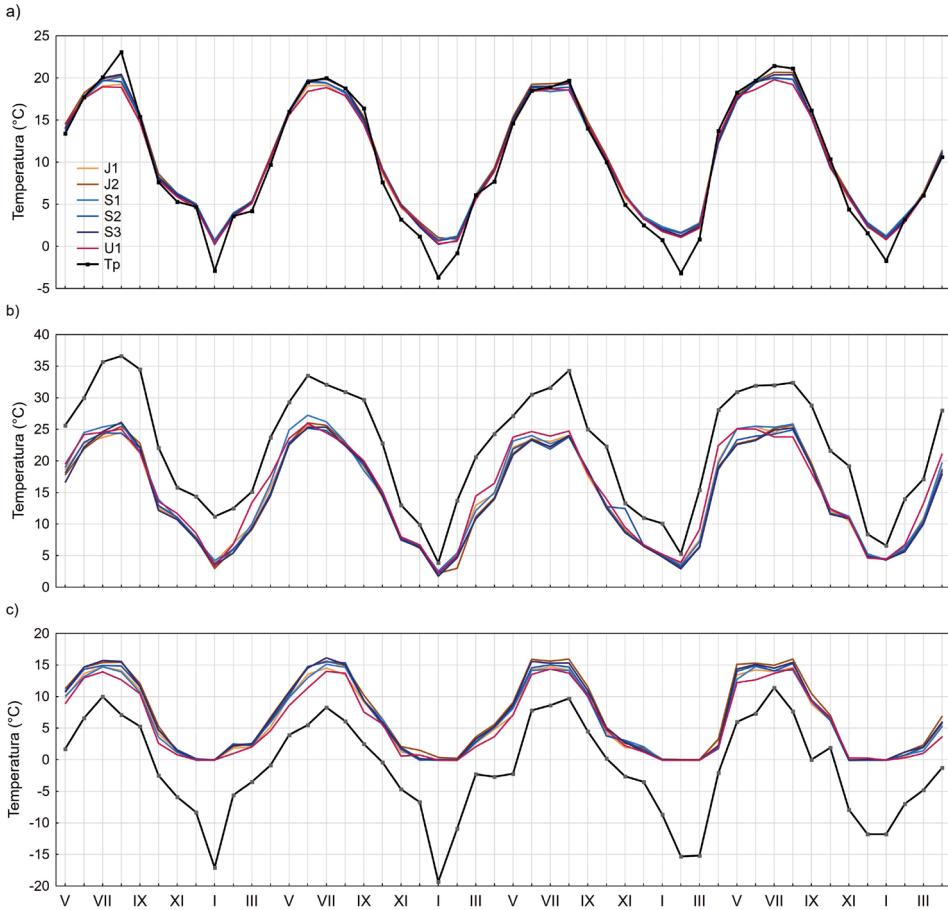
Author's own elaboration based on data from IMGW-PIB.

Sezonowe zróżnicowanie temperatury wody

W przypadku Jeziorki, Świdra oraz Utraty w latach 2015–2019 stwierdzono sinusoidalny przebieg średnich, maksymalnych oraz minimalnych miesięcznych wartości temperatury wody (ryc. 3). Najwyższą średnią miesięczną temperaturę wody w badanym okresie zanotowano w lipcu 2018 r., kiedy wyniosła od 19,8°C do 20,7°C. Najniższa średnia miesięczna temperatura wody wystąpiła z kolei w styczniu 2016 r., osiągając w poszczególnych punktach pomiarowych od 0,2°C do 0,8°C, choć bardzo zbliżone wartości zanotowano również w styczniu 2017 r., kiedy wyniosły od 0,2°C do 1,0°C. W zależności od pory roku średnia temperatura wody osiągała różne wartości w stosunku do temperatury powietrza (ryc. 3a). W miesiącach letnich, szczególnie od czerwca do sierpnia, temperatura wody była średnio niższa od temperatury powietrza, natomiast w październiku bądź listopadzie relacja ta ulegała z reguły odwróceniu, by w miesiącach zimowych osiągać wartości średnio wyższe niż temperatura powietrza. W maju następowało ponowne wyrównanie średnich wartości i temperatura wody osiągała później przeciętnie niższe wartości niż temperatura powietrza. Największe odchylenie średnich miesięcznych wartości temperatury wody od wartości temperatury powietrza obserwowano w miesiącach zimowych (zwłaszcza w styczniu), kiedy osiągnęło ponad 4°C, a także podczas najcieplejszych miesięcy półroczna letniego, przede wszystkim w sierpniu 2015 r. (ryc. 3a).

Rozkład statystyczny 30-minutowych wartości temperatury wody, zagregowanych w ujęciu miesięcznym potwierdza, iż warunki termiczne badanych cieków charakteryzowały się wyraźnym zróżnicowaniem sezonowym (ryc. 4). We wszystkich punktach pomiarowych najwyższą średnią temperaturę wody odnotowano w lipcu, w którym osiągnęła od 19,1°C w punktach J1 i U1 do 20,0°C w punkcie J2. Najniższą średnią miesięczną temperaturą odznaczył się z kolei styczeń, kiedy wyniosła od 0,8°C w punktach S3 i U1 do 1,2°C w punktach J1, S1 oraz S2. W punktach reprezentujących dolny bieg rzek (J2 i S3) średnia temperatura wody była niższa w miesiącach zimowych niż w górnym biegu (J1, S1, U1), zwłaszcza w styczniu, lutym i marcu, natomiast wyższa od lipca do września. Absolutne minimalne wartości temperatury wody najczęściej obserwowano we wspomnianym styczniu, na co wskazuje asymetria rozkładu statystycznego wartości temperatury wody w tym miesiącu, choć najwcześniej minimalną temperaturę wody wynoszącą 0,0°C zmierzono we wszystkich punktach pomiarowych już 30 listopada, natomiast najpóźniej – aż 19 marca. Maksymalne wartości temperatury w badanym okresie wyniosły od 25,2°C w punkcie S2 do 27,2°C w punkcie S1. W większości punktów pomiarowych maksimum temperatury wody zanotowano w badanym okresie 25 (U1) bądź 26 czerwca 2016 r. (J2, S1, S2), za wyjątkiem górnego biegu Jeziorki (J1), w którym maksymalna temperatura wody została zmierzona 1 sierpnia 2018 r., a także dolnego biegu Świdra, gdzie zanotowano ją 9 sierpnia 2015 r. Największą zmiennością warunków termicznych odznaczył się kwiecień, kiedy zakres temperatury wody wyniósł od 15,8°C do 20,4°C – miesiąc ten charakteryzował się również największym rozstępem ćwiartkowym. Najmniejszą zmiennością w ciągu roku charakteryzował się z kolei styczeń, kiedy zakres temperatury osiągnął jedynie od 4,8°C do 5,3°C. Warto zauważyć również, że zmienność temperatury wody we wrześniu oraz listopadzie była z reguły większa niż w lipcu oraz sierpniu (ryc. 4).

Najniższe wartości średniego zakresu dobowego zanotowano we wszystkich punktach pomiarowych w styczniu, kiedy osiągnęły od 0,3°C do 0,6°C – wówczas stwierdzono również najniższe wartości odchylenia standardowego temperatury wody (ryc. 5). Niskie



Ryc. 3. Przebieg średnich (a), maksymalnych (b) oraz minimalnych (c) miesięcznych wartości temperatury wody we wszystkich punktach pomiarowych na tle odpowiadających wartości temperatury powietrza ze stacji Warszawa-Okęcie w latach 2015–2019

The course of mean (a), maximum (b), and minimum (c) monthly values of water temperature at all measuring points on the background of corresponding air temperature values from the Warszawa-Okęcie meteorological station in 2015–2019



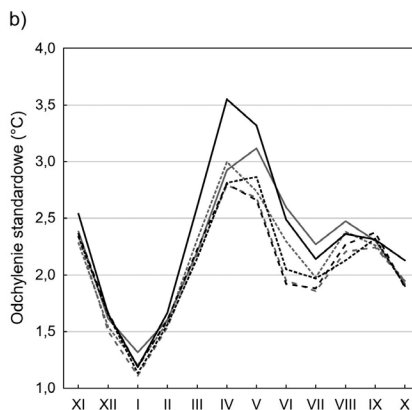
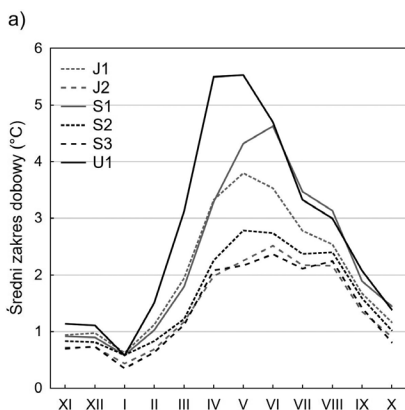
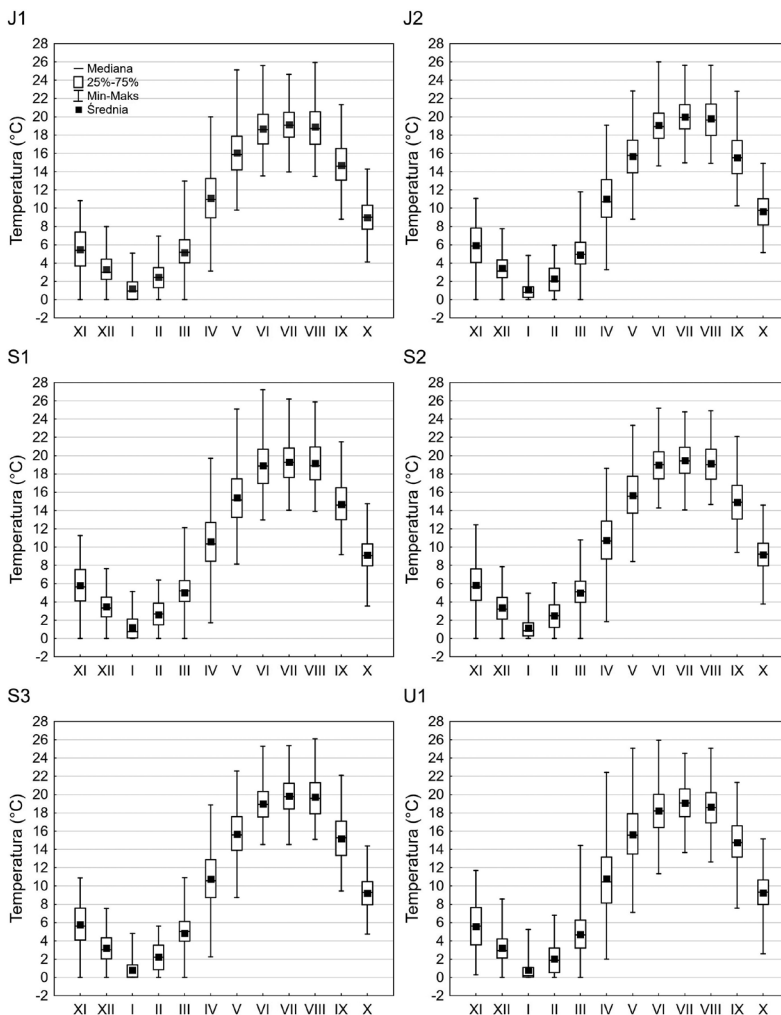
Ryc. 4. Rozkład statystyczny 30-minutowych wartości temperatury wody dla wszystkich punktów pomiarowych w poszczególnych miesiącach dla lat 2015–2019

Statistical distribution of 30-minute water-temperature values for all measurement sites in different months of the years 2015–2019



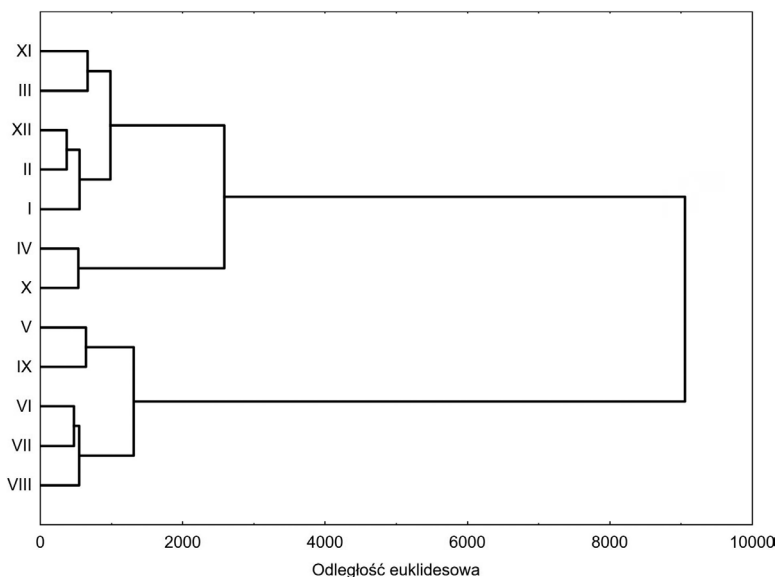
Ryc. 5. Miesięczny przebieg średniego zakresu dobowego (a) oraz odchylenia standardowego (b) temperatury wody dla wszystkich punktów pomiarowych na podstawie zagregowanych danych z lat 2015–2019

Monthly course of the mean daily range (a) and standard deviation of water temperature (b) at the measurement sites on the basis of aggregated data from 2015–2019



wartości średniego zakresu dobowego zanotowano również w grudniu i lutym, kiedy nie przekroczyły $1,1^{\circ}\text{C}$. Największe dobowe wahania temperatury zaobserwowano z kolei w miesiącach wiosennych, a zatem w kwietniu, maju oraz czerwcu, kiedy osiągnęły średnio od $2,4^{\circ}\text{C}$ w punkcie S3 do $5,5^{\circ}\text{C}$ w punkcie U1. W miesiącach tych zanotowano także najwyższe wartości odchylenia standardowego, podobnie jak w listopadzie (ryc. 5), kiedy następuje wyraźny spadek temperatury wody. Sezonowa zmienność temperatury wody była również zróżnicowana przestrzennie – największą odznaczyły się punkty reprezentujące zlewnie o mniejszej powierzchni, na czele z U1, natomiast bardziej wyrównany przebieg parametrów zmienności charakteryzował zlewnie większe, m.in. J2 i S3. W tych ostatnich zaobserwowano również nieco późniejsze występowanie maksimum zmienności temperatury wody w stosunku do punktów J1 oraz U1, które zmierzono tam w czerwcu.

Aglomeracja 30-minutowych wartości temperatury wody w ujęciu miesięcznym pozwoliła wyróżnić dwie główne grupy miesięcy (ryc. 6). Pierwszą z nich stanowią miesiące półroczia letniego, a zatem maj, czerwiec, lipiec, sierpień oraz wrzesień, w których temperatura we wszystkich punktach pomiarowych przekraczała 20°C , a średnia miesięczna temperatura wody była niższa lub zbliżona do odpowiadającej jej średniej miesięcznej wartości temperatury powietrza. Drugą grupę stanowią z kolei miesiące chłodniejsze, począwszy od listopada aż do kwietnia, odznaczające się zdecydowanie niższymi wartościami temperatury średniej oraz minimalnej. W grupie tej na uwagę zasługuje również wydzielenie dwóch podgrup, składających się z par miesięcy marzec/listopad oraz kwiecień/październik, reprezentujących miesiące przejściowe, odznaczające się dynamicznym wzrostem lub spadkiem temperatury wody.



Ryc. 6. Grupowanie 30-minutowych wartości temperatury wody rzek nizinnych, zagregowanych w ujęciu miesięcznym

Grouping of the 30-minute water temperature data of lowland rivers, aggregated in monthly timescale

Związek temperatury wody i temperatury powietrza

Współczynniki korelacji liniowej, opisujące związek średnich dobowych wartości temperatury wody i temperatury powietrza w latach 2015–2019, osiągnęły dla wszystkich punktów pomiarowych zbliżone wartości, wynoszące 0,95–0,96. Ich wartości obliczone dla poszczególnych miesięcy okazały się z kolei zróżnicowane, wskazując na sezonowe zmiany siły zależności temperatury wody i temperatury powietrza (tab. 2). Relatywnie wyższe wartości współczynników korelacji zanotowano w miesiącach półrocza letniego, a także w listopadzie i kwietniu, niższe natomiast w miesiącach zimowych, od grudnia do marca. Najsilniejszy związek spośród wszystkich miesięcy stwierdzono we wszystkich punktach pomiarowych w listopadzie, kiedy współczynniki korelacji przyjmowały wartości od 0,87 w punkcie S3 do 0,93 w punkcie U1, choć bardzo zbliżone wartości uzyskano również w maju, kiedy osiągnęły od 0,85 w punkcie S3 do 0,92 w punktach J1 i U1. Najłabszy związek zanotowano z kolei w styczniu, kiedy współczynniki korelacji przyjęły wartości od 0,56 w punkcie S3 do 0,74 w punkcie J1. Należy zauważyć, że począwszy od czerwca aż do sierpnia siła związku temperatury wody i temperatury powietrza była niższa niż w miesiącach przejściowych, tj. w maju, wrześniu oraz listopadzie. Stwierdzono także przestrzenne zróżnicowanie sezonowych zmian siły związków – wartości współczynników korelacji były na ogół wyższe w punktach pomiarowych, zamykających zlewnie o mniejszej powierzchni, a zatem w górnym biegu cieków (J1, S1, U1). Wartości współczynników korelacji w tych punktach były także mniej zróżnicowane w poszczególnych miesiącach niż w zlewniach odznaczających się większą powierzchnią (J2, S2, S3).

Tabela 2. Wartości współczynników korelacji opisujących związek pomiędzy średnią dobową temperaturą wody i powietrza dla wszystkich punktów pomiarowych w latach 2015–2019. Wszystkie współczynniki korelacji są istotne statystycznie na poziomie $p < 0,05$

Correlation coefficients between daily mean water and air temperatures for all of the measurement sites for the years 2015–2019. All coefficients were statistically significant at $p < 0.05$

Punkt pomiarowy	Rzeka	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI-X
J1	Jeziorka	0,92	0,86	0,74	0,80	0,82	0,85	0,92	0,81	0,86	0,81	0,87	0,81	0,96
J2	Jeziorka	0,89	0,74	0,60	0,71	0,74	0,78	0,87	0,76	0,81	0,80	0,84	0,76	0,95
S1	Świder	0,90	0,76	0,67	0,80	0,79	0,80	0,90	0,78	0,79	0,80	0,83	0,79	0,95
S2	Świder	0,89	0,74	0,71	0,77	0,77	0,78	0,89	0,75	0,81	0,78	0,83	0,78	0,95
S3	Świder	0,87	0,71	0,56	0,73	0,73	0,78	0,85	0,76	0,80	0,79	0,81	0,75	0,95
U1	Utrata	0,93	0,85	0,66	0,77	0,78	0,88	0,92	0,82	0,84	0,78	0,86	0,84	0,95

Dyskusja

Analizowany w pracy okres, obejmujący cztery lata hydrologiczne od 2015 do 2019 r., można uznać za reprezentatywny, bowiem odznaczył się on dużą zmiennością warunków meteorologicznych oraz hydrologicznych. Lato 2015 r. zapisało się jako bardzo ciepłe i skrajnie suche, co skutkowało pojawieniem się suszy hydrologicznej w centralnej Polsce (Somorowska i Łaszewski, 2017), natomiast lato i jesień 2017 r. były bardzo wilgotne – suma opadu w półroczu letnim 2017 r. przekroczyła ponad dwukrotnie normę dla wielo-

lecia (1989–2019). W konsekwencji w 2015 r. na wielu posterunkach wodowskazowych w sierpniu i wrześniu zanotowano absolutne minima natężenia przepływu (Van Lanen i inni, 2016), natomiast w 2017 r. odpływ rzeczny był zdecydowanie wyższy, co przełożyło się na relatywnie większą bezwładność termiczną cieków. W półroczach zimowych regularnie notowano bardzo niskie wartości temperatury powietrza, osiągające -15°C , co w połączeniu z brakiem zachmurzenia nocą skutkowało rozwojem zjawisk lodowych w postaci lodu brzegowego, śryżu oraz pokrywy lodowej, zwłaszcza w styczniu 2016 i 2017 r.

Sezonowe różnicowanie temperatury Jeziorki, Świdra oraz Utraty można określić jako typowe dla rzek strefy klimatu umiarkowanego, które odznaczają się sinusoidalnym przebiegiem średnich, maksymalnych oraz minimalnych wartości temperatury wody naśladującym przebieg lokalnej temperatury powietrza (Brown i inni, 2010; Ptak i Nowak, 2017). Podobnie jak w przypadku dolnej Wisły (Marszelewski i Strzyżewska-Pietrucień, 2009), Raduni (Radtke i Dobosz, 2015), a także Czernej Wielkiej oraz Szprotawy (Ptak, 2017), najniższe średnie, maksymalne oraz minimalne miesięczne wartości temperatury wody wystąpiły w badanych rzekach w styczniu bądź lutym, natomiast najwyższe w okresie letnim, od czerwca do sierpnia, kiedy zaobserwowano najwyższe wartości temperatury powietrza oraz największe natężenie krótkofalowego promieniowania słonecznego, uważanego zgodnie za nadrzędny element bilansu cieplnego wód płynących (Benyahya i inni, 2012; Dugdale i inni, 2018). Charakterystyczną cechą ustroju termicznego badanych rzek było również regularne pojawianie się temperatury wody oscylującej wokół $0,0^{\circ}\text{C}$, przy czym warto zauważyć, że wyłącznie w styczniu absolutne minimalne wartości pojawiały się powtarzalnie w ciągu badanego okresu.

W obliczu ekstremalnie wysokich wartości temperatury powietrza i jednocześnie niskich wartości natężenia przepływu w latach 2015–2019 maksymalne wartości temperatury wody, które osiągnęły $25\text{--}26^{\circ}\text{C}$, można uznać za górną granicę zakresu temperatury wody niewielkich rzek nizinnych. Jedynie w górnym biegu Świdra (S1) w 2016 r. zmierzono wartość przekraczającą 27°C ; należy podkreślić jednak, że koryto rzeki powyżej punktu pomiarowego jest uregulowane i całkowicie pozbawione drzew, które zapewniają osłonięcie lustra wody przed promieniowaniem słonecznym. Warto dodać, że maksymalne wartości temperatury wody wystąpiły w ciągu analizowanego okresu w czerwcu bądź sierpniu, pomimo, iż to w lipcu we wszystkich punktach pomiarowych temperatura wody była średnio najwyższa. Okres ten nie jest przypadkowy – w drugiej i trzeciej dekadzie czerwca kąt padania promieni słonecznych jest największy, co prowadzi do intensywnego nagrzewania wody. W sierpniu decydujący wpływ na pojawianie się maksymalnych wartości temperatury mają z kolei występujące wówczas długotrwałe fale upałów (takie jak w roku 2015 oraz 2018).

Analiza przebiegu miesięcznych wartości temperatury wody, jej rozkładu statystycznego oraz grupowania temperatury wody metodą aglomeracji umożliwiła wyróżnienie czterech okresów w ciągu roku hydrologicznego, odznaczających się zbliżonymi wartościami temperatury wody. Pierwszy z nich stanowią miesiące zimowe, od grudnia do lutego, kiedy temperatura wody waha się zazwyczaj pomiędzy 0°C a $4\text{--}6^{\circ}\text{C}$, a na jej wyrównany przebieg ma wpływ relatywnie mniejszy udział strumieni radiacyjnych w bilansie cieplnym, udokumentowany uprzednio przez B.W. Webba i Y. Zhanga (1999), a także obecność zjawisk lodowych, uniemożliwiających wymianę ciepła między wodą i atmosferą. Następnie, wraz ze wzrostem temperatury powietrza oraz coraz większym natężeniem promieniowania słonecznego w marcu i kwietniu następuje szybki wzrost temperatury wody, początkowo do ok. $10\text{--}12^{\circ}\text{C}$, a następnie do ponad 20°C . Późną wiosną i latem, a zatem

od maja do września, temperatura wody ulega stabilizacji i utrzymuje się z reguły w zakresie 15–25°C. W tym okresie wzrostowi temperatury wody na skutek intensywnej radiacji zapobiega zacienienie brzegowe (Broadmeadow i inni, 2011; Ptak, 2017), a także buforujący wpływ wód podziemnych (Kaandorp i inni, 2019). Kolejno, w październiku następuje pierwszy gwałtowny spadek temperatury wody, związany z silnym wypromieniowaniem ciepła podczas bezchmurnych nocy, natomiast z reguły w listopadzie ma miejsce drugi spadek temperatury wody do około 4–5°C, prowadzący do przejścia w warunki zimowe.

Współczynniki korelacji liniowej, opisujące siłę związku między temperaturą wody i temperaturą powietrza, przyjęły dla badanego okresu wysokie wartości, świadczące o nadrzędnym wpływie warunków meteorologicznych na kształtowanie temperatury wody. Były one bardzo zbliżone do wartości obliczonych przez Ł. Wiejczkę (2007) dla górskiej rzeki Ropy (0,90–0,95), a także do wartości dla nizinnej Szprotawy (0,94) oraz Czernej Wielkiej (0,91) (Ptak, 2017). Przebieg wartości współczynników korelacji w poszczególnych miesiącach okazał się również zbliżony do przebiegu przedstawionego przez Ł. Wiejczkę (2007) dla rzeki Ropy. Najsilniejszy związek wspomnianych dwóch zmiennych był obserwowany w okresach przejściowych, w których temperatura wody jest podatna na wpływy atmosferyczne (a zatem w kwietniu/maju, oraz wrześniu/październiku), natomiast w okresie zimowym oraz letnim związek temperatury wody i powietrza był relatywnie słabszy. Przyczyną opisanej prawidłowości latem jest moderujący wpływ zacienienia brzegowego, jak również proces ewaporacji, skutkujący intensywną utratą energii cieplnej przez wodę w okresie wysokich wartości temperatury powietrza, a w konsekwencji zaburzający liniowy związek badanych zmiennych, co przedstawił O. Mohseni i H.G. Stefan (1999). Zimą niższe wartości korelacji są efektem zachmurzenia, które jest wówczas przeciętnie większe niż latem (Żmudzka, 2007) i jednocześnie istotnie modyfikuje przebieg radiacyjnych strumieni ciepła (Evans i inni, 1998), a także większej bezwładności cieplnej, związanej z wyższym natężeniem przepływu (Poole i Berman, 2001). Dodatkowo, w przeciwieństwie do temperatury powietrza, temperatura wody nigdy nie spada poniżej 0,0°C. Warto zauważyć również, że wartości współczynników korelacji w ciągu roku hydrologicznego w opracowaniu Ł. Wiejczki (2007) okazały się wyższe niż w przypadku badanych rzek nizinnych, co może być efektem odmiennych uwarunkowań abiotycznych – rzeki górskie są z reguły płytsze niż rzeki nizinne, co powoduje większą podatność ich temperatury wody na atmosferyczne strumienie ciepła, a w konsekwencji silniejszy związek z temperaturą powietrza (O’Driscoll i DeWalle, 2006).

Interesujący wydaje się fakt, iż przebieg zmienności temperatury wody, opisywany przez średni zakres dobowy oraz odchylenie standardowe, nawiązywał do przebiegu siły związków między temperaturą wody i temperaturą powietrza. Podobnie jak w przypadku wartości współczynników korelacji, największą zmienność temperatury wody w ciągu roku hydrologicznego zanotowano bowiem w miesiącach wiosennych, tj. kwietniu, maju oraz czerwcu, kiedy była ona wyraźnie większa niż w miesiącach letnich. Występowanie największych wahań temperatury w tych miesiącach jest związane z cyklem rozwojowym drzew, krzewów i bylin, które są wówczas dopiero w fazie wzrostu i rozwoju liści, nie zapewniając jeszcze pełnego osłonięcia lustra wody przed promieniowaniem słonecznym (Łaszewski, 2018). Dodatkowo, w okresie tym często pojawiają się blokady cyrkulacji strefowej (Degirmendżić i Kożuchowski, 2017), powodujące południkowy napływ mas powietrza naprzemiennie z północy oraz południa Europy, a w rezultacie znaczne wahania temperatury wody (Graf i Wrzesiński, 2019).

Podsumowanie

Analiza statystyczna danych pomiarowych umożliwiła określenie podstawowych cech sezonowego zróżnicowania temperatury wody wybranych rzek Mazowsza. Przedstawione w pracy prawidłowości mogą charakteryzować również inne ciekły nizinne strefy klimatu umiarkowanego przejściowego, odznaczające się zbliżonymi parametrami abiotycznymi.

1. Temperatura wody Jezioriki, Świdra oraz Utraty w latach 2015–2019 naśladowała przebieg temperatury powietrza. We wszystkich punktach pomiarowych przeciętnie najwyższą temperaturą wody odznaczył się lipiec, natomiast najniższą – styczeń. Maksymalne wartości temperatury wody, przekraczające 25°C, notowano od czerwca do sierpnia, natomiast minimalne (0,0°C) od listopada do marca. Roczny przebieg temperatury wody badanych rzek odznaczał się dwoma okresami względnej stabilizacji warunków termicznych (zimą i latem), oraz dwoma okresami przejściowymi (wiosną i jesienią), charakteryzującymi się dynamicznymi zmianami temperatury wody. Stwierdzono również przestrzenne zróżnicowanie sezonowych zmian temperatury wody – w punktach pomiarowych reprezentujących dolny bieg rzek temperatura wody była średnio niższa w miesiącach zimowych niż w biegu górnym, natomiast wyższa w okresie najcieplejszym, od lipca do września.
2. Zmienność temperatury wody badanych rzek była największa w miesiącach wiosennych, przede wszystkim w kwietniu i maju, natomiast najmniejsza w miesiącach zimowych, na czele ze styczniem. W dolnym biegu cieków zmienność temperatury wody była przeciętnie mniejsza niż w biegu górnym, a wartości miar zmienności temperatury wody w poszczególnych miesiącach okazały się zdecydowanie mniej zróżnicowane.
3. Wartości współczynników korelacji liniowej wskazują na silną zależność temperatury wody badanych rzek nizinnych od warunków meteorologicznych. Udokumentowano również sezonowe zmiany siły związku temperatury wody i temperatury powietrza, która była większa w okresie jesiennego spadku i wiosennego wzrostu temperatury wody, natomiast mniejsza w miesiącach zimowych i letnich. Wartości współczynników korelacji były zdecydowanie wyższe i jednocześnie mniej zróżnicowane w górnym biegu rzek.

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródeł, są opracowaniami własnymi autora artykułu.

Badania zostały sfinansowane ze środków Uniwersytetu Warszawskiego (DSM nr 501/86-DSM-110600 i 501-D119–86–0115500–05). Autor dziękuje Recenzentom za cenne uwagi i sugestie.

Piśmiennictwo

- Bartnik A., 2017, *Mała rzeka w dużym mieście*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Bartnik A., Moniewski P., Tomalski P., 2013, *Seasonality of the basic physical and chemical characteristics of water flowing through the cascades of small reservoirs*, *Limnological Review*, 13, 2, s. 63–71. <https://doi.org/10.2478/limre-2013-0007>

- Benjamin J.R., Heltzel J.M., Dunham J.B., Heck M., Banish N., 2016, *Thermal Regimes, Nonnative Trout, and Their Influences on Native Bull Trout in the Upper Klamath River Basin, Oregon*, Transactions of the American Fisheries Society, 145, 6, s. 1318–1330. <https://doi.org/10.1080/00028487.2016.1219677>
- Benyahya L., Caissie D., Satish M.G., El-Jabi N., 2012, *Long-wave radiation and heat flux estimates within a small tributary in Catamaran Brook (New Brunswick, Canada)*, Hydrological Processes, 26, 4, s. 475–484. <https://doi.org/10.1002/hyp.8141>
- Beschta R.L., Bilby R.E., Brown G.W., Holtby L.B., Hofstra T.D., 1987, *Stream Temperatures and Aquatic Habitat: Fisheries and Forestry Interactions*, [w:] E.O. Salo, T.W. Cundy (red.), *Stream-side Management: Forestry and Fishery Interactions*, University of Washington, Washington, s. 191–232.
- Broadmeadow S.B., Jones J.G., Langford T.E.L., Shaw P.J., Nisbet T.R., 2011, *The influence of riparian shade on lowland stream water temperatures in southern England and their viability for brown trout*, River Research and Applications, 27, 2, s. 226–237. <https://doi.org/10.1002/rra.1354>
- Brown L.E., Cooper L., Holden J., Ramchunder J., 2010, *A comparison of stream water temperature regimes from open and afforested moorland, Yorkshire Dales, northern England*, Hydrological Processes, 24, 22, s. 3206–3218, <https://doi.org/10.1002/hyp.7746>
- Caissie D., 2006, *The thermal regime of rivers: a review*, Freshwater Biology, 51, 8, s. 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>
- Degirmendžić J., Kożuchowski K., 2017, *Makrocyrkulacyjne uwarunkowania długotrwałych fal termicznych w Polsce*, Przegląd Geofizyczny, 62, 1–2, s. 3–28.
- Dugdale S.J., Malcolm I.A., Kantola K., Hannah D.M., 2018, *Stream temperature under contrasting riparian forest cover: Understanding thermal dynamics and heat exchange processes*, Science of The Total Environment, 610–611, s. 1375–1389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.198>
- Dunham J., Chandler G., Rieman B., Martin D., 2005, *Measuring Stream Temperature with Digital Data Loggers: A User's Guide*, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-150WWW.
- Dynowska I., 1971, *Typy reżimów rzecznych w Polsce*, Zeszyty Naukowe UJ, Prace Geograficzne, 28.
- Evans E.C., McGregor G.R., Petts G.E., 1998, *River energy budgets with special reference to river bed processes*, Hydrological Processes, 12, 4, s. 575–595. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19980330\)12:4<575::AID-HYP595>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19980330)12:4<575::AID-HYP595>3.0.CO;2-Y)
- Graf R., 2015, *Zmiany termiki wód Warty w profilu łączącym pradolinny i przełomowy odcinek doliny (Nowa Wieś Podgórna-Śrem-Poznań)*, [w:] D. Absalon, M. Matysik, M. Ruman (red.), *Nowoczesne metody i rozwiązania w hydrologii i gospodarce*, Komisja Hydrologiczna PTG, Katowice, s. 177–194.
- Graf R., Wrzesiński D., 2019, *Relationship between Water Temperature of Polish Rivers and Large-Scale Atmospheric Circulation*, Water, 11, 8, 1690. <https://doi.org/10.3390/w11081690>
- Graf R., Zhu S., Sivakumar B., 2019, *Forecasting river water temperature time series using a wavelet–neural network hybrid modelling approach*, Journal of Hydrology, 578, 124115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124115>
- Halaś A., Czarnecka K., Piasecki K., Łaszewski M., 2019, *Przestrzenne i sezonowe zróżnicowanie wybranych parametrów jakości wody w zlewni zurbanizowanej na przykładzie Potoku Służewieckiego*, Przegląd Geograficzny, 91, 1, s. 121–138, <https://doi.org/10.7163/PrzG.2019.1.6>
- Imholt C., Soulsby C., Malcolm I.A., Gibbins C.N., 2013, *Influence of contrasting riparian forest cover on stream temperature dynamics in salmonid spawning and nursery streams*, Ecohydrology, 6, 3, s. 380–392. <https://doi.org/10.1002/eco.1291>

- Kaandorp V.P., Doornenbal P.J., Kooi H., Broers H.P., de Louw P.G.B., 2019, *Temperature buffering by groundwater in ecologically valuable lowland streams under current and future climate conditions*, Journal of Hydrology X, 3, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100031>
- Kędra M., Wiejaczka Ł., 2018, *Climatic and dam-induced impacts on river water temperature: Assessment and management implications*, Science of The Total Environment, 626, s. 1474–1483. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.044>
- Łaszewski M., 2018, *Diurnal Water Temperature Dynamics in Lowland Rivers: a Case Study from Central Poland*, Journal of Water and Land Development, 36, 1, s. 89–97. <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0009>
- Malcolm I., Soulsby C., Hannah D.M., Bacon P.J., Youngson A.F., Tetzlaff D., 2008, *The influence of riparian woodland on stream temperatures: implications for the performance of juvenile salmonids*, Hydrological Processes, 22, 7, s. 968–979. <https://doi.org/10.1002/hyp.6996>
- Marszelewski W., Pius B., 2015, *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, 61, 8, s. 1430–1442, <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1040800>
- Marszelewski W., Strzyżewska-Pietrucień I., 2009, *Temperatura wody dolnej Wisły i jej wieloletnie zmiany*, [w:] A.T. Jankowski, D. Absalon, R. Machowski, M. Ruman (red.), *Przeobrażenia stosunków wodnych w warunkach zmieniającego się środowiska*, Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, Sosnowiec, s. 197–210.
- Michalska B., 2011, *Tendencje zmian temperatury powietrza w Polsce*, Prace i Studia Geograficzne, 47, s. 67–75.
- Mohseni O., Stefan H.G., 1999, *Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation*, Journal of Hydrology, 218, 3–4, s. 128–141. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00034-7)
- O'Driscoll M.A., DeWalle D.R., 2006, *Stream–air temperature relations to classify stream–ground water interactions in a karst setting, central Pennsylvania, USA*, Journal of Hydrology, 329, 1–2, s. 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.010>
- Oksiuta M., 2010, *Basic parameters of the thermal regime of rivers in the Vistula river catchment*, Miscellanea Geographica, 14, 1, s. 185–192. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0017>
- Piętka I., 2009, *Wieloletnia zmienność wiosennego odpływu rzek polskich*, Prace i Studia Geograficzne, 43, s. 81–95.
- Piotrowski A.P., Napiórkowski M.J., Napiórkowski J.J., Osuch M., 2015, *Comparing various artificial neural network types for water temperature prediction in rivers*, Journal of Hydrology, 529, 1, s. 302–315. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.07.044>
- Poole G.C., Berman C.H., 2001, *An ecological perspective on in-stream temperature: natural heat dynamics and mechanisms of human-caused thermal degradation*, Environmental Management, 27, 6, s. 787–802. <https://doi.org/10.1007/s002670010188>
- Ptak M., Choiński A., Kirviel J., 2016, *Long-term water temperature fluctuations in coastal rivers (southern Baltic) in Poland*, Bulletin of Geography. Physical Geography Series, 11, s. 35–42. <https://doi.org/10.1515/bgeo-2016-0013>
- Ptak M., 2017, *Wpływ zalesienia zlewni na temperaturę wody w rzece*, Leśne Prace Badawcze, 78, 3, s. 251–256. <https://doi.org/10.1515/frp-2017-0028>
- Ptak M., Nowak B., 2017, *Zmiany temperatury wody w Prośnie w latach 1965–2014*, Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 17, 3, s. 101–112.
- Radtke G., Dobosz S., 2015, *Charakterystyka termiczna wód Raduni zasilającej ośrodek hodowli ryb łososiowatych w Rutkach*, Komunikaty Rybackie, 137, 4, s. 1–5.

- Rajwa-Kuligiewicz A., Białik R.J., Rowiński P.M., 2015, *Dissolved oxygen and water temperature dynamics in lowland rivers over various timescales*, Journal of Hydrology and Hydromechanics, 63, 4, s. 353–363. <https://doi.org/10.1515/johh-2015-0041>
- Selong J.H., McMahon T.E., Zale A.V., Barrows F.T., 2001, *Effect of Temperature on Growth and Survival of Bull Trout, with Application of an Improved Method for Determining Thermal Tolerance in Fishes*, Transactions of the American Fisheries Society, 130, s. 1026–1037. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(2001\)130<1026:EOTOGA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(2001)130<1026:EOTOGA>2.0.CO;2)
- Sloat M.R., Osterback A.K., 2013, *Maximum stream temperature and the occurrence, abundance, and behavior of steelhead trout (Oncorhynchus mykiss) in a southern California stream*, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 70, s. 64–73. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2012-0228>
- Smółkiewicz W., Wiejaczka Ł., Soja R., 2014, *Ocena zasięgu oddziaływania zbiornika Klimkówka na termikę rzeki Ropy*, Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 16, s. 59–64.
- Somorowska U., Łaszewski M., 2017, *Human-Influenced Streamflow during Extreme Drought: Identifying Driving Forces, Modifiers, and Impacts in an Urbanized Catchment in Central Poland*, Water and Environment Journal, 31, 3, s. 345–352. <https://doi.org/10.1111/wej.12249>
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Grabowska K., Dobrowolska M., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J., Grzęda M., 2012, *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce. Z badań klimatu Mazowsza (z uwzględnieniem większych miast)*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.
- Van Lanen H.A.J., Laaha G., Kingston D.G., Gauster T., Ionita M., Vidal J.P., Vlnas R., Tallaksen L.M., Stahl K., Hannaford J., Delus C., Fendekova M., Mediero L., Prudhomme C., Rets E., Romanowicz R.J., Gailliez S., Wong W.K., Adler M.J., Blauhut V., Caillouet L., Chelcea S., Frolova N., Gudmundsson L., Hanel M., Haslinger K., Kireeva M., Osuch M., Sauquet E., Stagge J.H., Van Loon A.F., 2016, *Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case*, Hydrological Processes, 30, 17, s. 3097–3104. <https://doi.org/10.1002/hyp.10838>
- Wałkuska G., Wilczek A., 2010, *Influence of Discharged Heated Water on Aquatic Ecosystem Fauna*, Polish Journal of Environmental Studies, 19, 3, s. 547–552.
- Webb B.W., Hannah D.M., Dan Moore R., Brown L.E., Nobilis F., 2008, *Recent advances in stream and river temperature research*, Hydrological Processes, 22, 7, s. 902–918. <https://doi.org/10.1002/hyp.6994>
- Webb B.W., Zhang Y., 1999, *Water temperatures and heat budgets in Dorset chalk water courses*, Hydrological Processes, 13, 3, s. 309–321. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990228\)13:3<309::AID-HYP740>3.0.CO;2-7](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990228)13:3<309::AID-HYP740>3.0.CO;2-7)
- Wiejaczka Ł., 2007, *Relacje pomiędzy temperaturą wody w rzece a temperaturą powietrza (na przykładzie rzeki Ropy)*, Folia Geographica. Series Geographica Physica, 37–38, s. 95–105.
- Wiejaczka Ł., 2011, *Wpływ zbiornika retencyjnego na relacje między temperaturą wody w rzece a temperaturą powietrza*, Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska, 53, 3, s. 183–195.
- Wrzesiński D., 2017, *Typologia reżimu odpływu rzek w Polsce w podejściu nadzorowanym i nienadzorowanym*, Badania Fizjograficzne, 8, Seria A – Geografia Fizyczna, 68, s. 253–264.
- Żmudzka E., 2007, *Zmienność zachmurzenia nad Polską i jej uwarunkowania cyrkulacyjne (1951–2000)*, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.

Summary

Thermal regime has a critical impact on the lotic environment, as maximum temperature determines the boundaries of the occurrence of aquatic species, seasonal and diurnal water temperature variations affect their bioenergetics, while the timing of specific water temperature values during the year is important in the context of spawning and migrations. However, despite the great importance of water temperature studies in the context of environmental management and fisheries, as well as the development of accurate measurement techniques, such investigations have received relatively limited attention in Poland.

The current study attempted to examine the seasonal differentiation of water temperature in lowland rivers. For this purpose, water temperature was recorded from the 1st of May 2015 to the 30th of April 2019 with a temporal resolution of 30-minutes. Digital temperature recorders used to make the measurements were distributed across six sites in Jeziorka, Świder and Utrata catchments located on the Mazovian Lowland and the Southern Podlachia Lowland near Warsaw. The hydrometeorological background of the water temperature monitoring was determined on the basis of data from the Warszawa-Okęcie station and water gauging stations. On the basis of the measurement data, mean, maximum, and minimum monthly water temperatures were calculated and presented on the background of the appropriate air temperature data, while statistical distribution of the 30-minute water temperature, aggregated in a monthly timescale, was presented on the box and whiskers plots. The Ward method was used to group months similar in terms of their thermal conditions, while the Pearson correlation coefficient was applied to evaluate the strength of the relationship between water and air temperature.

The results indicate that the seasonal course of water temperature follows the course of air temperature, with the highest mean monthly water temperatures recorded in July, while the lowest in January. Statistical distribution analysis of water temperature in individual months and its grouping by the Ward method allowed to identify two periods characterized by relatively stable thermal conditions and two periods of dynamic changes of water temperature. In contrast to the maximum values of water temperature, which were observed in the summer as a result of intensive solar radiation and low streamflow rates, the greatest variability of water temperature, as indicated by reference to mean daily range and standard deviation, was found in the spring months, i.e. in April and May, while the lowest in winter, from December to February. The relationship between daily mean water temperature and air temperature, established with the use of the Pearson correlation coefficient on a monthly basis, was clearly stronger during the spring increase and the autumn fall of the water temperature, which can be linked with greater vulnerability to atmospheric heat fluxes. A definitely weaker relationship was found in the winter and summer months, when greater importance can be attached to other drivers of stream temperature, like the presence of ice cover, cloudiness, riparian shading, and groundwater inflows.