

METODY OKREŚLANIA ZWIĄZKÓW TEMPERATURY WODY RZECZNEJ I TEMPERATURY POWIETRZA NA PRZYKŁADZIE RZEKI ŚWIDER

Maksym Łaszewski

Methods of estimating stream water temperature and air temperature relationships – the Świder River case study

Abstract: Due to the high significance of water temperature to lotic ecosystems, this paper presents the methods of estimating relationships between water temperature and air temperature on the example of the Świder River. Statistical relationships were determined using logistic and linear regression models for daily, weekly and monthly average temperatures, as well as for daily maximum and average weekly maximum temperatures. The data were obtained as a result of field measurements, conducted in the hydrological years 2012 and 2013. A strong non-linear relationship was found between water and air temperature, as indicated by the obtained coefficients of determination and the RMSE of logistic models. Despite the non-linear nature of this relationship, the appropriate selection of measurement data allows the efficient use of linear models. A comparison of fit measures of the models based on microclimatic data (Wólka Mładzka) and meteorological station data (Warszawa-Okęcie) revealed no significant differences in their quality. The results may have practical application for the fisheries management and the protection of the ecosystem of the Świder River.

Keywords: water temperature, hydrometeorology, logistic model, linear model

Zarys treści: Celem opracowania jest przedstawienie metod określania związków temperatury wody rzecznej i temperatury powietrza na przykładzie nizinnej rzeki Świder. Zależności statystyczne ustalono w odniesieniu do średniej dobowej, tygodniowej, miesięcznej, a także

maksymalnej dobowej i średniej maksymalnej tygodniowej temperatury wody oraz powietrza za pomocą logistycznych i liniowych modeli regresji. Dane uzyskano z własnych pomiarów terenowych, prowadzonych w latach hydrologicznych 2012 i 2013. Stwierdzono silny, nieliniowy związek między temperaturą wody i powietrza, na co wskazują uzyskane wartości współczynników determinacji i pierwiastków średnich błędów kwadratowych modeli logistycznych. Potwierdzono także, że pomimo nieliniowego charakteru zależności odpowiednia selekcja danych pomiarowych umożliwia skuteczne stosowanie modeli liniowych. Porównanie miar dopasowania modeli na podstawie danych mikroklimatycznych (Otwock-Wólka Mładzka) oraz danych ze stacji meteorologicznej (Warszawa-Okęcie) nie wykazało istotnych różnic siły związków regresyjnych. Wyniki badań mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w gospodarce rybacko-wędkarskiej oraz ochronie ekosystemu rzeki Świder.

Słowa kluczowe: temperatura wody, hydrometeorologia, model logistyczny, model liniowy

Wprowadzenie

Temperatura odgrywa zasadniczą rolę w kształtowaniu i funkcjonowaniu ekosystemów lotycznych (Allan, Castillo 2007). Ustrój termiczny reguluje niemal wszystkie procesy życiowe organizmów wodnych, między innymi wzrost, odżywianie i migracje, odpowiada także za ich przeżywalność oraz rozmieszczenie (Coutant 1976; Sweeney 1984; Olden, Naiman 2010). Warunki termiczne mają w rezultacie wymierne znaczenie ekonomiczne, przede wszystkim z punktu widzenia nowoczesnej gospodarki rybacko-wędkarskiej (Łaszewski, Jeleński 2013). W związku z tym kluczowe wydaje się opracowanie prostych narzędzi, umożliwiających modelowanie temperatury wód płynących, a tym samym racjonalne zarządzanie ekosystemami wodnymi (Pilgrim i in. 1998).

Zagadnienie modelowania temperatury wód płynących zostało szeroko przedstawione w literaturze (m.in. Deas, Lowney 2000; Benyahya i in. 2007). Powszechnie wykorzystywane są dwa typy modeli: genetyczne oraz statystyczne. Pierwsze z nich, oparte na fizycznym opisie procesu wymiany ciepła między powierzchnią wody a atmosferą i podłożem (Sinokrot, Stefan 1993), wymagają dokładnych danych meteorologicznych, dotyczących między innymi natężenia promieniowania słonecznego, prędkości wiatru oraz wilgotności względnej; uwzględniany jest także stopień zacielenia lustra wody i gradient termiczny osadów dennych (Younus i in. 2000). Modele genetyczne pozwalają na dokładną symulację temperatury wody w profilu podłużnym cieków, są przez to licznie wykorzystywane w prognozowaniu zmian temperatury na skutek zrzutów wód podgrzanych, deforestacji bądź modyfikacji przepływu (Caissie 2006). Alternatywnie modele statystyczne opierają się z reguły na związkach regresyjnych temperatury wody z temperaturą powietrza, umożliwiając względnie prostą estymację średniej czy też maksymalnej temperatury wody w konkretnym przekroju poprzecznym cieków (Smith 1981; Caissie i in. 2001; Neu-

mann i in. 2003; Webb i in. 2003). Ze względu na stosunkowo łatwą dostępność i dobrą prognozowalność temperatury powietrza modele statystyczne powszechnie stosuje się w predykcji zmian temperatury wody w obliczu zmian klimatu (Lagergaard Pedersen, Sand-Jensen 2007).

Celem artykułu jest przedstawienie metod określania statystycznych zależności między temperaturą wody dolnego Świdra i temperaturą powietrza. Zbadano związek między średnią dobową, tygodniową i miesięczną temperaturą wody i odpowiednią temperaturą powietrza a także, ze względu na znaczenie ekstremalnych wartości temperatury dla gospodarki rybacko-wędkarskiej, związek między maksymalną dobową i średnią maksymalną tygodniową temperaturą wody i powietrza. Zależności opisano za pomocą logistycznych i liniowych modeli regresyjnych. Porównano również siłę związków regresyjnych opartych na wartościach temperatury powietrza, pochodzących z własnych pomiarów terenowych oraz ze stacji meteorologicznej IMGW-PIB.

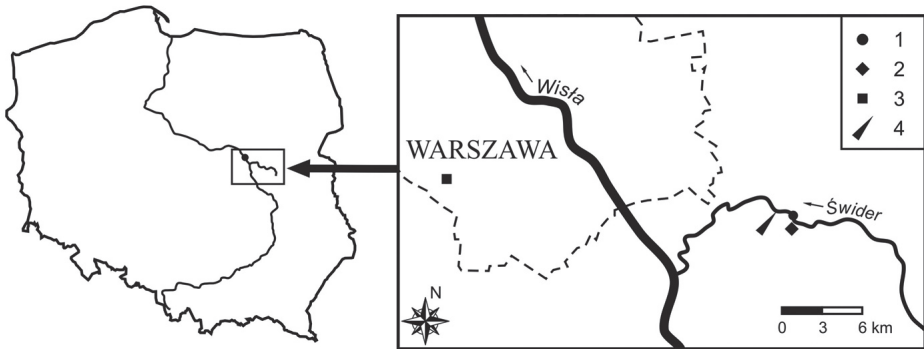
Charakterystyka obszaru badań

Świder jest niewielkim nizinnym dopływem środkowej Wisły, o długości 99,9 km i powierzchni zlewni 1160,7 km². Przepływ średni rzeki w latach 1960–1999 wynosił 4,35 m³·s⁻¹. W celu ochrony walorów przyrodniczych i krajobrazowych Świdra w 1978 r. powołano rezerwat, obejmujący zasięgiem 41 km środkowego i dolnego biegu rzeki. W badaniach Borzęckiej i współautorów (2002) stwierdzono w Świdrze obecność 22 gatunków ryb i kręgloustych, należących do wszystkich grup rozrodczych występujących w Polsce. W ostatnich dziesięciu latach w ichtiofaunie rzeki pojawiły się także cenne z przyrodniczego punktu widzenia ryby łososiowate. Dolny bieg Świdra odgrywa ponadto rolę tarliska ryb reofilnych wstępujących z Wisły (Cios, Stępiak 2011).

W opracowaniu wykorzystano ciąg danych empirycznych obejmujący dwa pełne lata hydrologiczne – od 1 listopada 2011 r. do 31 października 2013 r. Pomiarów temperatury wody i powietrza prowadzono w dzielnicy Otwocka – Wólce Mładzkiej (ryc. 1). W tych okolicach Świder odznacza się krętym, miejscami meandrującym korytem o szerokości 10–15 m i głębokości 50–70 cm. Występują tam liczne bystrza, lustro wody jest znacznie ocienione przez roślinność nadbrzeżną oraz wysokie skarpy.

Metody badań i źródła danych

Temperaturę wody i powietrza rejestrowano za pomocą urządzeń Onset HOBO Data Logger (odpowiednio U22-001 i U23-004). Rejestrator temperatury wody umieszczono w głównym nurcie Świdra w Wólce Mładzkiej, rejestrator temperatury



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań i punktów pomiarowych

Objaśnienia: 1 – rejestrator temperatury wody, 2 – rejestrator temperatury powietrza w Wólce Młądzkiej, 3 – stacja meteorologiczna Warszawa-Okęcie, 4 – posterunek wodowskazowy Wólka Młądzka

Fig. 1. Location of the study area and measurement profiles

Explanations: 1 – water temperature data logger, 2 – air temperature data logger in Wólka Młądzka, 3 – meteorological station Warszawa-Okęcie, 4 – gauging station Wólka Młądzka

powietrza zlokalizowano na posesji (108 m n.p.m.) w odległości 120 m od miejsca pomiarów temperatury wody i 25 m od brzegu rzeki. Czujnik umieszczono na standardowej wysokości 2 m nad powierzchnią gruntu w specjalnej osłonie antyradiacyjnej. Dokładność pomiarowa urządzeń wynosiła $0,2^{\circ}\text{C}$, a interwał czasowy między pomiarami 30 minut. Przed zamontowaniem w terenie rejestratory zostały skalibrowane, różnice między ich wskazaniami nie przekraczały $0,1^{\circ}\text{C}$. W opracowaniu wykorzystano dodatkowo wartości temperatury średniej dobowej i maksymalnej dobowej ze stacji meteorologicznej IMGW-PIB. Wybrano lotniskową stację Warszawa-Okęcie, położoną w granicach Warszawy (106 m n.p.m.), około 27 km na zachód od Wólki Młądzkiej. Dane pobrano z serwisu NOAA Global Surface Summary Data.

Związki między temperaturą wody i powietrza opisano logistycznym modelem regresji, aproksymującym zależność funkcją S-kształtną (Mohseni i in. 1998). Model ten dobrze odzwierciedla zachowanie temperatury wody podczas ujemnej oraz wysokiej (powyżej 25°C) temperatury powietrza. Temperatura wody nie spada bowiem poniżej $0,0^{\circ}\text{C}$ nawet w okresie długotrwałych mrozów, a w przypadku wysokiej temperatury powietrza nie przyrasta liniowo ze względu na intensywną utratę energii cieplnej w procesach ewaporacji i emisji promieniowania długofalowego (Neumann i in. 2003). Model ma postać (Caissie i in. 2001):

$$T_w = \frac{\mu}{1 + e^{\alpha(\beta - T_p)}}$$

gdzie:

T_w – temperatura wody,

μ – parametr określający najwyższą estymowaną temperaturę wody,

α – parametr określający nachylenie funkcji,

β – parametr określający temperaturę powietrza w punkcie przegięcia funkcji,

T_p – temperatura powietrza.

W pracy zastosowano także liniowy model regresji, opisujący zależność między temperaturą wody i powietrza za pomocą funkcji liniowej (Smith 1981; Pilgrim i in. 1998):

$$T_w = A T_p + B$$

gdzie:

T_w – temperatura wody,

T_p – temperatura powietrza,

A i B – stałe równania.

Średnie dobowe wartości temperatury wody oraz powietrza obliczono na podstawie 48 wartości półgodzinnych. Odpowiednio średnie tygodniowe obliczono na podstawie 7 wartości średnich dobowych, średnie miesięczne również na podstawie średnich dobowych. Analogicznie średnią tygodniową temperaturę maksymalną wyznaczono na podstawie 7 wartości maksymalnych dobowych. W przypadku modelu liniowego wyeliminowano wszystkie pomiary osłabiające związek temperatury wody i powietrza – średnie dobowe, tygodniowe bądź miesięczne oraz maksymalne dobowe lub tygodniowe wartości temperatury powietrza niższe od $0,0^{\circ}\text{C}$ (Mohseni, Stefan 1999). Nie uwzględniono także przypadków ze średnią dobową oraz tygodniową temperaturą wody równą $0,0^{\circ}\text{C}$; taka wartość świadczy bowiem o obecności pokrywy lodowej uniemożliwiającej wymianę ciepła na granicy wody i atmosfery (Mohseni i in. 1998). Ze względu na szczególną postać zależności między średnimi miesięcznymi wartościami temperatury wody i powietrza opisano ją wyłącznie za pomocą modelu liniowego.

Parametry równań regresyjnych wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów w pakiecie statystycznym MiniTab 16. Dopasowanie obydwu modeli regresyjnych zweryfikowano na podstawie wartości współczynników determinacji R^2 oraz pierwiastków średnich błędów kwadratowych (ang. RMSE). Współczynniki determinacji określono wzorem:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (T_s - T_{sr,o})^2}{\sum_{t=1}^n (T_o - T_{sr,o})^2}$$

gdzie:

T_s – temperatura symulowana,

$T_{sr,o}$ – temperatura średnia z wartości obserwowanych,

T_o – temperatura obserwowana.

RMSE obliczono według wzoru danego przez Morrill i in. (2005):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (T_o - T_s)^2}{n-4}}$$

gdzie:

T_o – temperatura obserwowana,

T_s – temperatura symulowana,

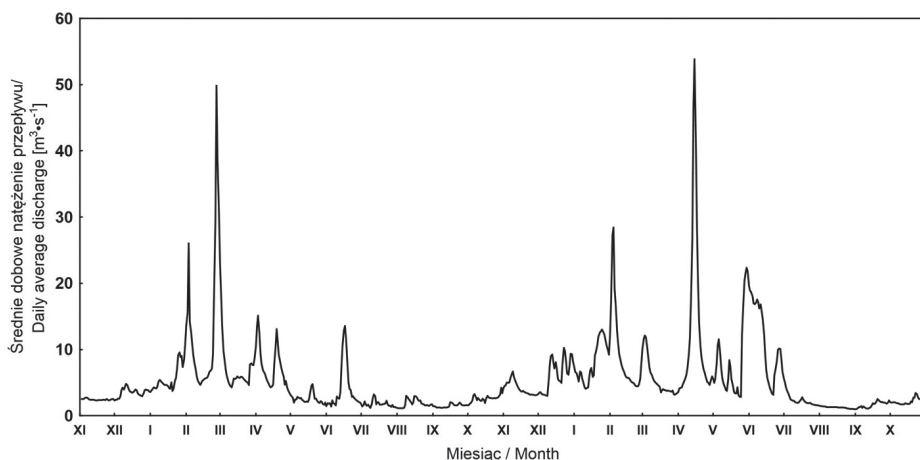
n – liczba pomiarów.

Przepływy charakterystyczne rzeki Świder w latach 2012 i 2013 obliczono na podstawie godzinnych wartości natężenia przepływu z posterunku wodowskazowego Otwock-Wólka Mładzka, należącego do IMGW-PIB. Posterunek ten znajduje się ok. 3 km poniżej miejsca rejestracji temperatury wody i powietrza; na odcinku tym jednak Świder nie przyjmuje znaczących dopływów.

Tło hydrometeorologiczne

Temperatura wody Świdra w okresie badawczym odznaczyła się typowym przebiegiem sinusoidalnym. Średnia roczna temperatura wody w 2012 r. wyniosła 10,0°C, a w 2013 r. 9,4°C. Maksymalna temperatura wody zanotowana w tym okresie to 25,4°C, minimalna 0,0°C, amplituda osiągnęła w rezultacie 25,4°C. Średnia roczna temperatura powietrza w Wólce Mładzkiej w 2012 r. wyniosła 8,6°C, rok 2013 był natomiast wyraźnie chłodniejszy – średnia roczna osiągnęła 8,0°C. Najniższa zanotowana temperatura powietrza w okresie badawczym wyniosła -26,4°C, a najwyższa 36,4°C (8 sierpnia 2013 r. – w tym dniu zostały pobite historyczne rekordy temperatury maksymalnej na wielu stacjach meteorologicznych w Polsce). Uwzględnione dwa lata odznaczały się zatem znacznym zróżnicowaniem warunków termicznych.

Przepływ Świdra w okresie badawczym także charakteryzował się dużą zmiennością. Minimalny zaobserwowany przepływ wyniósł $0,75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, maksymalny $67,3 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Odpływ ze zlewni w 2013 r. był znacznie wyższy niż w roku 2012; średni przepływ roczny wyniósł wtedy $6,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, podczas gdy w roku 2012 jedynie $4,4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Przebieg i wahania przepływu w okresie badawczym dobrze odzwierciedlają śnieżny ustrój hydrologiczny Świdra. Największe wezbrania wystąpiły w półroczu zimowym i miały genezę roztopową, półroczu letnie odznaczały się przeważnie niewielkimi wartościami natężenia przepływu; w okresach tych często występowały niżówki (ryc. 2).

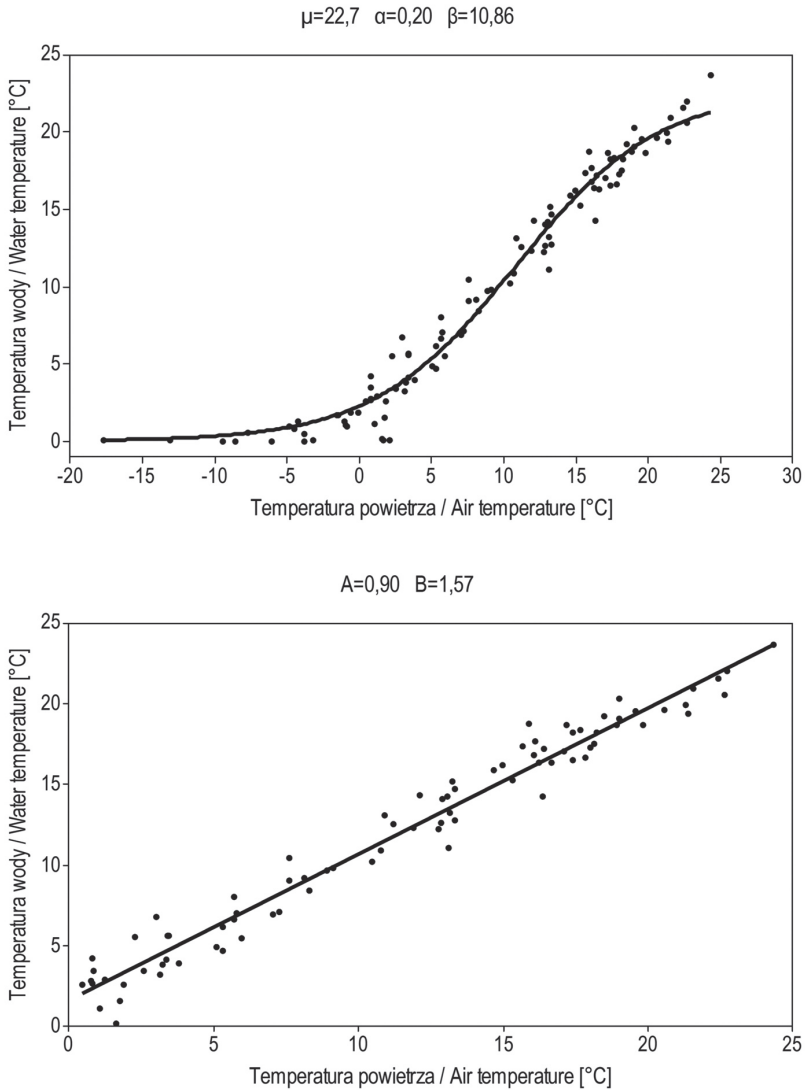


Ryc. 2. Średnie dobowe natężenie przepływu Świdra w przekroju wodowskazowym Otwock-Wólka Mładzka w latach hydrologicznych 2012 i 2013

Fig. 2. Daily average discharge of the Świder River at the Otwock-Wólka Mładzka gauging station in hydrological years 2012 and 2013

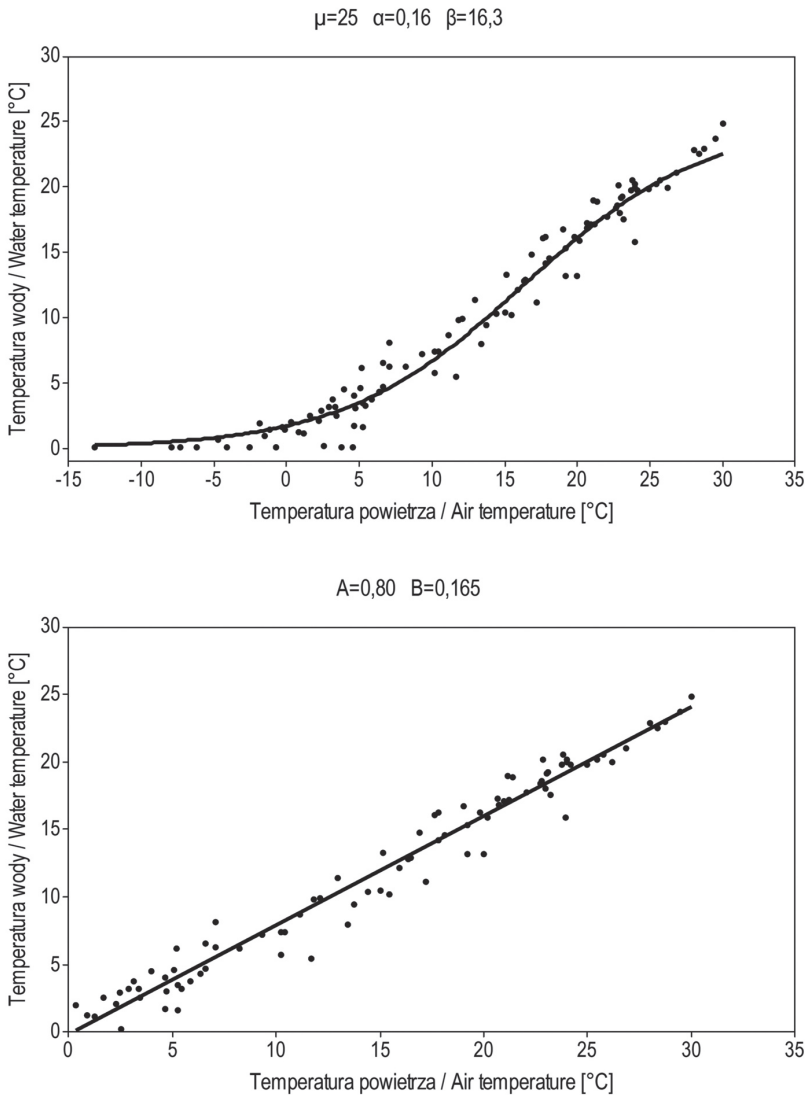
Wyniki i dyskusja

Wśród zależności aproksymowanych modelami logistycznymi najsilniejszy związek stwierdzono w przypadku średniej tygodniowej oraz średniej maksymalnej tygodniowej temperatury wody i powietrza (ryc. 3 i 4). Współczynniki determinacji osiągnęły w obydwu przypadkach 0,94, wartości pierwiastków średnich błędów kwadratowych odpowiednio $1,2^\circ\text{C}$ i $1,3^\circ\text{C}$ (tab. 1). Najsłabsze okazały się związki średniej dobowej oraz maksymalnej dobowej temperatury wody i powietrza (ryc. 5 i 6), w przypadku których współczynniki determinacji oraz RMSE wyniosły odpowiednio 0,92 i $1,8^\circ\text{C}$



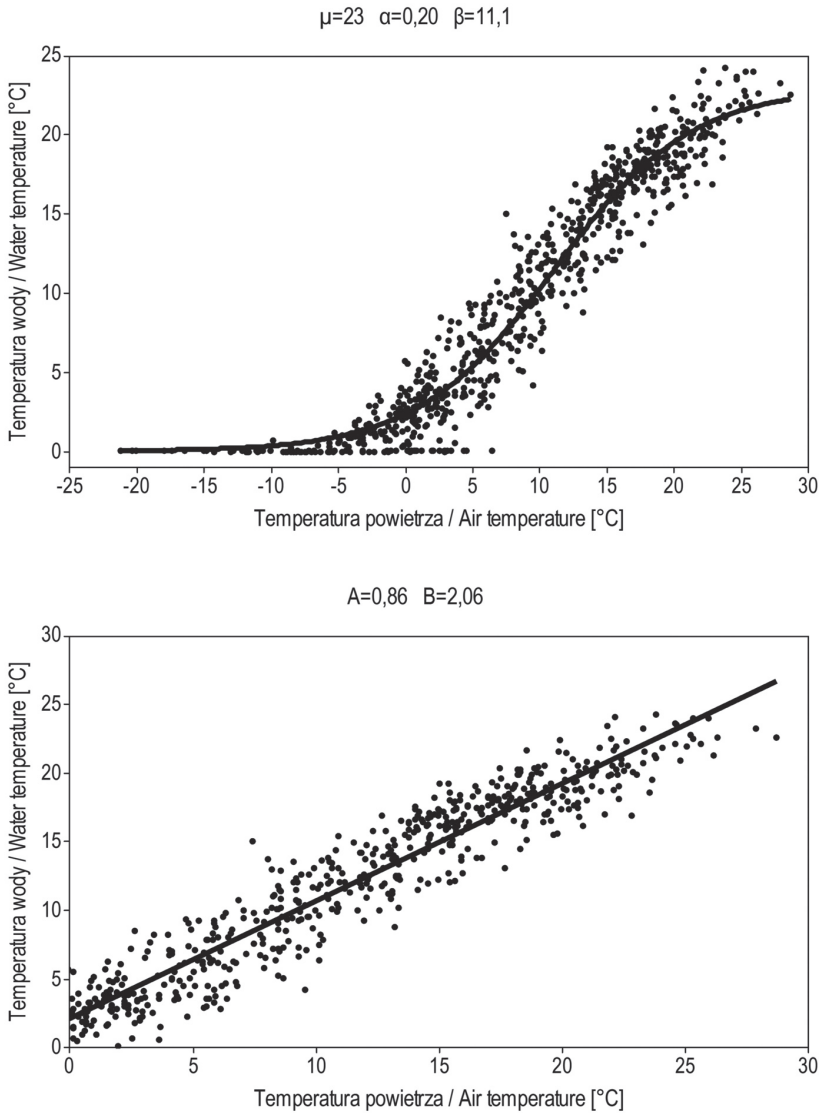
Ryc. 3. Związek między średnią tygodniową temperaturą wody Świdra i średnią tygodniową temperaturą powietrza w Wólce Mładzkiej opisany modelem logistycznym (u góry) i liniowym (u dołu)

Fig. 3. Relationship between average weekly water temperature in Świdra River and average weekly air temperature in Wólka Mładzka approximated by logistic (up) and linear (down) function



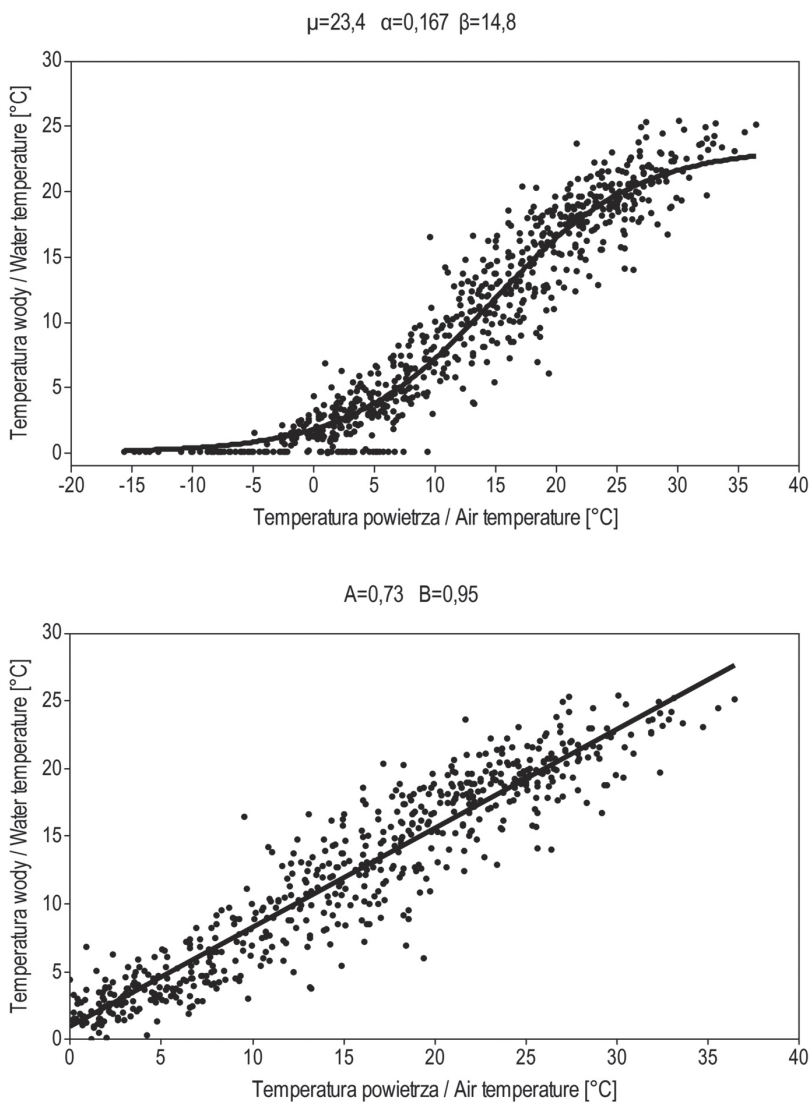
Ryc. 4. Związek między średnią maksymalną tygodniową temperaturą wody Świdra i średnią maksymalną tygodniową temperaturą powietrza w Wólce Mładzkiej opisany modelem logistycznym (u góry) i liniowym (u dołu)

Fig. 4. Relationship between average weekly maximum water temperature in Świdra River and average weekly maximum air temperature in Wólka Mładzka approximated by logistic (up) and linear (down) function



Ryc. 5. Związek między średnią dobową temperaturą wody Świdra i średnią dobową temperaturą powietrza w Wólce Mładzkiej opisany modelem logistycznym (u góry) i liniowym (u dołu)

Fig. 5. Relationship between average daily water temperature in Świdra River and average daily air temperature in Wólka Mładzka approximated by logistic (up) and linear (down) function



Rys. 6. Związek między maksymalną dobową temperaturą wody Świdra i maksymalną dobową temperaturą powietrza w Wólce Mładzkiej opisany modelem logistycznym (u góry) i liniowym (u dołu)

Fig. 6. Relationship between maximum daily water temperature in Świdra River and maximum daily air temperature in Wólka Mładzka approximated by logistic (up) and linear (down) function

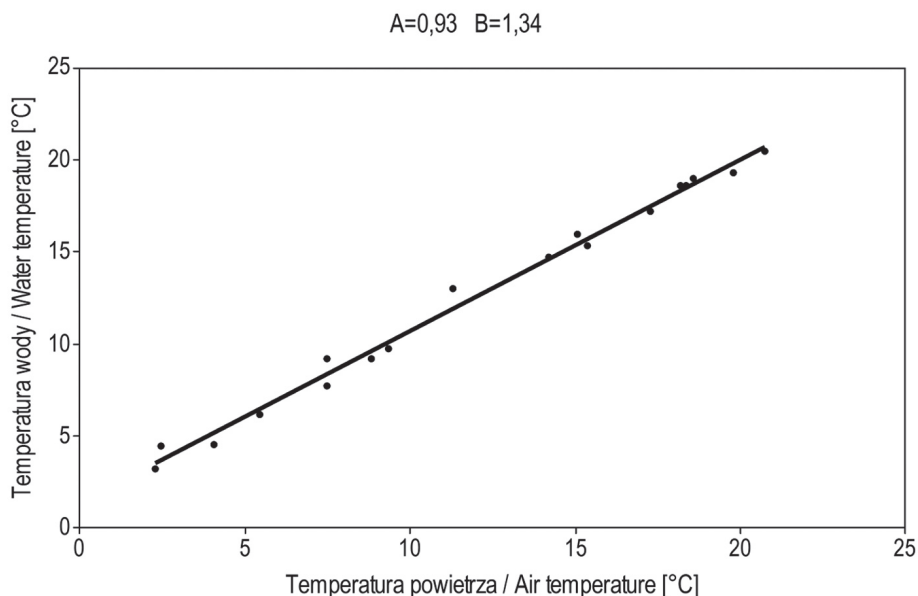
Tab. 1. Współczynniki determinacji i pierwiastki średnich błędów kwadratowych modeli logistycznych i liniowych opisujących zależności między temperaturą wody Świdra i temperaturą powietrza

Table 1. The coefficients of determination and root mean square errors for the logistic and linear models defining relationships between water temperature in the Świdra River and air temperature

Stacja temperatury powietrza/ Air temperature station	Model logistyczny/Logistic model		Model liniowy/Linear model			
	R ²	RMSE	liczba par danych/ number of data pairs	R ²	RMSE	liczba par danych/ number of data pairs
Temperatura średnia dobowa/Average daily temperature						
Wólka Mładzka	0,92	1,8	731	0,91	1,9	573
Warszawa-Okęcie	0,91	1,9	731	0,90	2,1	573
Temperatura maksymalna dobowa/Maximum daily temperature						
Wólka Mładzka	0,90	2,2	718	0,89	2,3	601
Warszawa-Okęcie	0,90	2,2	718	0,88	2,5	614
Temperatura średnia tygodniowa/Average weekly temperature						
Wólka Mładzka	0,94	1,2	104	0,97	1,1	82
Warszawa-Okęcie	0,93	1,2	104	0,96	1,2	83
Temperatura średnia maksymalna tygodniowa/Average weekly maximum temperature						
Wólka Mładzka	0,94	1,3	102	0,96	1,3	86
Warszawa-Okęcie	0,94	1,4	102	0,96	1,4	86
Temperatura średnia miesięczna/Average monthly temperature						
Wólka Mładzka	–	–	–	0,99	0,5	18
Warszawa-Okęcie	–	–	–	0,99	0,5	18

oraz 0,90 i 2,2°C (tab. 1). Różnice między wartościami współczynników determinacji charakteryzujących modele oparte na danych z Wólki Młądzkiej i Warszawy-Okęcia nie przekroczyły 0,01, między wartościami RMSE natomiast 0,1°C (tab. 1).

Pośród modeli liniowych najsilniejszy okazał się związek średniej miesięcznej temperatury (ryc. 7), najslabszy zaś związek maksymalnej dobowej temperatury (ryc. 6). Świadczą o tym zarówno współczynniki determinacji, jak i wartości RMSE, które w przypadku średnich miesięcznych wyniosły odpowiednio 0,99 i 0,5°C, a maksymalnych dobowych 0,89 i 2,1°C (tab.1). Dobrym dopasowaniem odznaczyły się także modele zidentyfikowane dla wartości średnich tygodniowych i średnich maksymalnych tygodniowych (ryc. 3 i 4). Podobnie jak w przypadku modeli logistycznych uzyskane wartości RMSE modeli liniowych były nieznacznie wyższe w przypadku związków opartych na danych z punktu pomiarowego w Otwocku-Wólce Młądzkiej. Maksymalna różnica osiągnęła 0,2°C, w przypadku wartości współczynników determinacji było to natomiast jedynie 0,01 (tab. 1).



Ryc. 7. Związek między średnią miesięczną temperaturą wody Świdra i średnią miesięczną temperaturą powietrza w Wólce Młądzkiej opisany modelem liniowym

Fig. 7. Relationship between the average monthly water temperature in the Świdra River and the average monthly air temperature in Wólka Młądzka approximated by a linear function

Analiza miar jakości modeli logistycznych i liniowych pozwala stwierdzić względnie wysokie ich dopasowanie. Dla porównania Caissie i współautorzy (2001) otrzymali RMSE równy $1,93^{\circ}\text{C}$, stosując model logistyczny wiążący średnią maksymalną tygodniową temperaturą wody kanadyjskiej rzeki Catamaran Brook z odpowiednią temperaturą powietrza. W przypadku temperatury maksymalnej dobowej rozrzut odpowiadających sobie wartości był natomiast zbyt duży, aby zależność miała istotne znaczenie statystyczne. Pilgrim i współautorzy (1998) z kolei, badając związki temperatury wody 39 strumieni w Minnesocie w Stanach Zjednoczonych z temperaturą powietrza za pomocą regresji liniowej, obliczyli maksymalne współczynniki determinacji równe 0,830, 0,963 i 0,991 odpowiednio dla wartości średnich dobowych, średnich tygodniowych i średnich miesięcznych. Webb i współautorzy (2003), określając zależności liniowe między temperaturą czterech rzek w angielskiej zlewni Exe i temperaturą powietrza, stwierdzili maksymalny współczynnik determinacji 0,915 w przypadku średnich dobowych, 0,893 – w przypadku wartości maksymalnych dobowych, oraz 0,949 – w przypadku średnich tygodniowych. Również Morrill i współautorzy (2005), opisując zależności między średnią tygodniową temperaturą wody i powietrza dla 22 rzek położonych w Europie i Stanach Zjednoczonych, otrzymali minimalny RMSE modeli logistycznych równy $1,47^{\circ}\text{C}$, modeli liniowych natomiast – $1,54^{\circ}\text{C}$. Wartości miar dopasowania modeli dla dolnego Świdra są zatem lepsze bądź zbliżone do miar uzyskanych przez wspomnianych autorów. Może to być związane z dużą dokładnością zastosowanych danych wejściowych do modeli. Potwierdzono również, że siła związków logistycznych i liniowych jest wyższa w przypadku wartości średnich tygodniowych oraz średnich maksymalnych tygodniowych niż wartości średnich dobowych bądź maksymalnych dobowych.

Porównanie współczynników determinacji i pierwiastków średnich błędów kwadratowych modeli na podstawie danych z Wólki Młądzkiej i Warszawy-Okęcia wykazało brak istotnego zróżnicowania siły tych związków; wartości RMSE osiągnęły zbliżone wartości, których różnica w przypadku modeli logistycznych nie przekroczyła $0,1^{\circ}\text{C}$, liniowych natomiast $0,2^{\circ}\text{C}$, współczynniki determinacji były niemal identyczne.

Podsumowanie

Uzyskane wyniki wskazują, że związek temperatury wody dolnego Świdra z temperaturą powietrza ma wyraźnie nieliniową postać, dobrze opisywaną modelem regresji logistycznej, czyli funkcją S-kształtną. Bez wątplenia największy wpływ na jego nieliniowość ma zachowanie temperatury wody podczas ujemnych wartości temperatury powietrza. Jest to widoczne zarówno w przypadku związków między średnią dobową oraz średnią tygodniową temperaturą wody i powietrza, jak i związków między mak-

symalną dobową oraz średnią maksymalną tygodniową temperaturą wody i powietrza. Dzięki odpowiedniej selekcji danych pomiarowych wspomniane zależności mogą być aproksymowane również modelami liniowymi. Potwierdzają to wysokie wartości współczynników determinacji oraz pierwiastków średnich błędów kwadratowych dla opracowanych modeli liniowych, zbliżone do odpowiednich miar obliczonych dla modeli logistycznych. Mimo podobnego dopasowania modele logistyczne wydają się jednak bardziej użyteczne do celów praktycznych, umożliwiają bowiem estymację temperatury wody w szerszym zakresie temperatury powietrza. Wykazano także, że dane z okolicznych stacji meteorologicznych mogą być z powodzeniem wykorzystywane w celu identyfikacji parametrów modeli regresyjnych. Należy pamiętać, aby stacje takie odznaczały się zbliżonym dominującym kierunkiem napływu mas powietrza, wysokością bezwzględą oraz warunkami termiczno-wilgotnościowymi.

Przedstawione modele statystyczne mogą znaleźć praktyczne zastosowanie w gospodarce rybacko-wędkarskiej. Symulowane wartości temperatury wody mogą posłużyć m.in. do szacowania czasu inkubacji ikry, tempa wzrostu oraz przeżywalności ryb, szczególnie z rodziny łososiowatych (Armour 1991). Dotyczy to nie tylko rzeki Świder, ale także innych cieków nizinnych o zbliżonych parametrach przyrodniczych. Wprowadzenie takich narzędzi wymaga jednak ścisłej współpracy użytkowników rybackich oraz ośrodków naukowo-badawczych.

Podziękowania

Autor pragnie podziękować dr hab. Urszuli Somorowskiej, prof. UW za merytoryczne rady i wsparcie podczas prowadzonych badań oraz dr. Stanisławowi Ciosowi za cenne wskazówki podczas przygotowywania pracy. Autor wyraża także wdzięczność Janinie Kołakowskiej za umożliwienie instalacji czujnika pomiarowego na jej prywatnej posesji.

Literatura

- Allan J.D., Castillo M.M., 2007, *Stream Ecology. Structure and Function of Running Waters*, Springer, Dordrecht.
- Armour C.L., 1991, *Guidance for evaluating and recommending temperature regimes to protect fish*, U.S. Fish and Wildlife Service Instream Flow Information Paper, 28, Biological Report, 90, Washington, D.C.
- Benyahya L., Caissie D., St-Hilaire A., Ouarda T.B.J.M., Bobee B., 2007, *A Review of Statistical Water Temperature Models*, Canadian Water Resources Journal, 32, 179–192.
- Borzeczka I., Buras P., Gasiński Z., 2002, *Charakterystyka zespołów i zasobów ryb w dorzeczu Świdra*, Instytut Rybactwa Śródlądowego, Zakład Rybactwa Rzecznego w Żabieńcu, Żabieniec.
- Caissie D., El-Jabi N., Satish M.G., 2001, *Modelling of maximum daily water temperatures in a small stream using air temperatures*, Journal of Hydrology, 251, 14–28.

- Caissie D., 2006, *The thermal regime of rivers: a review*, *Freshwater Biology*, 51, 1389–1406.
- Cios S., Stępnik T., 2011, *Jak jazzy na Świdrze niszczą ichtiofaunę*, *Przegląd Rybacki*, 35, 26–28.
- Coutant C., 1976, *Thermal effects on fish ecology*, [w:] J.R. Pfafflin, E.N. Ziegler (red.), *Encyclopedia of Environmental Science and Engineering*, Gordon and Breach Publishers, New York, 891–896.
- Deas M.L., Lowney C.L., 2000, *Water temperature Modeling Review*, Central Valley, California Water Modeling Forum.
- Lagergaard Pedersen N., Sand-Jensen K., 2007, *Temperature in lowland Danish streams: Contemporary patterns, empirical models and future scenarios*, *Hydrological Processes*, 21, 348–358.
- Łaszewski M., Jeleński P., 2013, *Porównanie warunków termicznych wód rzek Raby i Świdra*, *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 22, 239–248.
- Mohseni O., Stefan H.G., 1999, *Stream temperature/air temperature relationship: A physical interpretation*, *Journal of Hydrology*, 218, 128–141.
- Mohseni O., Stefan H.G., Erickson T.R., 1998, *A nonlinear regression model for weekly stream temperatures*, *Water Resources Research*, 34, 2685–2692.
- Morrill J., Bales R., Conklin M., 2005, *Estimating Stream Temperature from Air Temperature: Implications for Future Water Quality*, *Journal of Environmental Engineering*, 131, 139–146.
- Neumann D.W., Rajagopalan B., Zagona E.A., 2003, *Regression Model for Daily Maximum Stream Temperature*, *Journal of Environmental Engineering*, 7, 667–674.
- Olden J.D., Naiman R.J., 2010, *Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: Modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity*, *Freshwater Biology*, 55, 86–107.
- Pilgrim J.M., Fang X., Stefan H.G., 1998, *Stream temperature correlations with air temperature in Minnesota: Implications for climate warming*, *Journal of the American Water Resources Association*, 34, 1109–1121.
- Sinokrot B.A., Stefan H.G., 1993, *Stream temperature dynamics: Measurements and modeling*, *Water Resources Research*, 29, 2299–2312.
- Smith K., 1981, *The prediction of river water temperature*, *Hydrological Sciences – Bulletin – des Sciences Hydrologiques*, 26, 19–32.
- Sweeney B.W., 1984, *Factors influencing life-history patterns of aquatic insects*, [w:] V.H. Resh, D.M. Rosenberg (red.), *The ecology of aquatic insects*, Praeger Publishers, New York, 56–100.
- Younus M., Hondzo M., Engel B.A., 2000, *Stream Temperature Dynamics in Upland Agricultural Watersheds*, *Journal of Environmental Engineering*, 126, 518–526.
- Webb B.W., Clack P.D., Walling D.E., 2003, *Water – air temperature relationships in Devon river system and the role of flow*, *Hydrological Processes*, 17, 3069–3084.

Maksym Łaszewski
Uniwersytet Warszawski
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa
e-mail: m.laszewski@student.uw.edu.pl