

Jerzy Wira, Mariusz Ptak

## ZMIANY ZASOBÓW CIEPŁA DWÓCH WYBRANYCH JEZIOR POLIMIKTYCZNYCH JAKO EFEKT ZMIAN KLIMATYCZNYCH

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono zmienność zasobów ciepła dwóch polimiktycznych jeziora: Łebsko i Gardno zlokalizowanych w północnej Polsce. W oparciu o średnie miesięczne i średnie roczne wartości temperatury powietrza oraz temperatury wód jeziornych w okresie 1961-2010, możliwe było określenia wielkości ciepła akumulowanego przez masy wodne obu jezior. Jak wykazała to przeprowadzona analiza temperatura wody jeziora Łebsko i Gardno cechowała się wzrostem o  $0,28 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{dec}^{-1}$ . Wzrost temperatury wody jako kluczowy czynnik, przyczynił się do wzrostu zasobów ciepła obu jezior. Średnie zasoby ciepła w analizowanym wieloleciu określono na  $1,52 \text{ kcal}\cdot\text{cm}^{-2}$  w przypadku Łebska i  $1,16 \text{ kcal}\cdot\text{cm}^{-2}$  w przypadku Gardna.

**Słowa kluczowe:** zmiany klimatyczne, temperatura, zasoby ciepła,

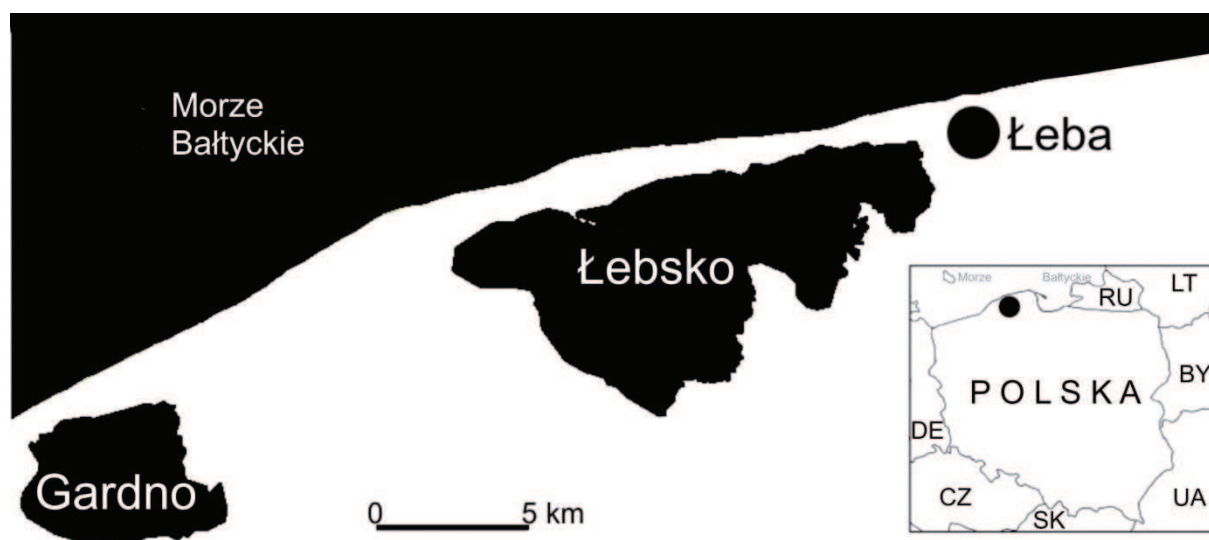
### WPROWADZENIE

Dobrym wskaźnikiem obserwowanych zmian środowiska przyrodniczego są wody śródlądowe. Woda z uwagi na swoje właściwości stosunkowo szybko reaguje na czynniki (naturalne jak i antropogeniczne) mogące zmieniać jej chemiczne i fizyczne cechy. Do tych ostatnich można zaliczyć m.in. termikę. W światowej literaturze limnologicznej problematyka związana z temperaturą wody doczekała się szerokiego zbioru opracowań [Robertson i Ragotzkie 1990, Livingstone i Dokulil 2001, Edmundson i Mazumder 2002, Gerten i Adrian 2002, Straile i in. 2003, Jansen i Hesslein 2004, Wilhelm i Adrian 2008, Novikmec i in. 2013, itd.]. Dotyczą one różnych wątków nawiązujących do tej tematyki, a jednym z wiodących jest zmiana temperatury wód jeziornych w świetle zmian klimatycznych. Obserwowany globalny wzrost temperatury powietrza ma wpływ na zmianę reżimu termicznego jezior, szczególnie powierzchniowej warstwy wody. W bezpośrednim i ścisłym związku z temperaturą wody jest ilość ciepła jaka jest zakumulowana w jeziorze. Eceternia i in. [2010] zauważają, że wśród limnologów wzrasta zainteresowanie jeziorami płytkimi, które są najbardziej liczne. W powyższym świetle jako istotne należy uznać każdorazowe wzbogacenie wiedzy, dotyczącej zmian temperatury wód jeziornych jak i odpowiadające im zmiany zasobów ciepła. Jako cenny należy uznać zestawienie takich danych dla jezior znajdujących się pod ochroną, do których można zaliczyć te analizowane w pracy. Jezioro Łebsko i Gardno znajdują się na terenie Słowińskiego Parku Narodowego, który zlokalizowany jest w północnej Polsce [ryc.1]. Jeziora te należą do jednych z największych w Polsce, przy powierzchni równej odpowiednio: 7020,0 ha i 2337,5 ha. Oba jeziora nie są stratyfikowane a ich głębokości wynoszą w przypadku Łebska; maksymalna 6,3 m, średnia: 1,6 m oraz dla Gardna; maksymalna 2,6 m i średnia 1,3 m. Jeziora z uwagi na swoje parametry morfometryczne nie są stratyfikowane. Objętość mis jeziornych to odpowiednio 117.5 mln m<sup>3</sup> i 30.9 mln m<sup>3</sup>.

Celem pracy jest analiza zmian zasobów ciepła na przykładzie dwóch przykładowych polimiktycznych jezior w Polsce w nieanalizowanych dotychczas wieloleciu 1961-2010.

prof. dr hab. inż. Jerzy Wira - Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

dr Mariusz Ptak - Zakład Hydrologii i Gospodarki Wodnej, Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu



Ryc.1. Lokalizacja obiektów badań.

## MATERIAŁY I METODY

W pracy wykorzystano dane dotyczące temperatury wód jeziornych prowadzonych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMiGW) dla jeziora Łebsko oraz Gardno w latach 1961-2010. Temperatury wody powierzchniowej są mierzone punktowo na głębokości 0,4 m o godzinie 7:00 (GMT +1). Z kolei analizując temperaturę powietrza wykorzystano dane dla stacji Łeba w tym samym wieloleciu. Rozpatrując temperaturę powietrza uwzględniono układ roku hydrologicznego (zaczynającego się w listopadzie), uzyskując w ten sposób jednolity materiał porównawczy w stosunku do temperatury wody. Zebrane dane poddano analizie statystycznej wykorzystując w tym celu program Microsoft Excel (dokonując analizy regresji liniowej). Z kolei w programie Statistica 10, wykonano analizę istotności trendów liniowych testem t-studenta. Przyjęto poziom  $p=0,05$ .

Zasoby ciepła obliczono zgodnie z założeniami przyjętymi przez Choińskiego [2007]:

$$q_w = t \cdot c \cdot \rho \cdot v \text{ [cal]} \quad (1)$$

gdzie:

$q_w$  - zasób ciepła w masie wody

$t$  - średnia temperatura wody w warstwie o objętości  $v$

$c$  - ciepło właściwe wody

$\rho$  - gęstość wody

$v$  - objętość warstwy wody

Zakładając, że  $c=1$  i  $\rho=1$ , można wzór zapisać jako;

$$q_w = t \cdot v \text{ [cal]} \quad (2)$$

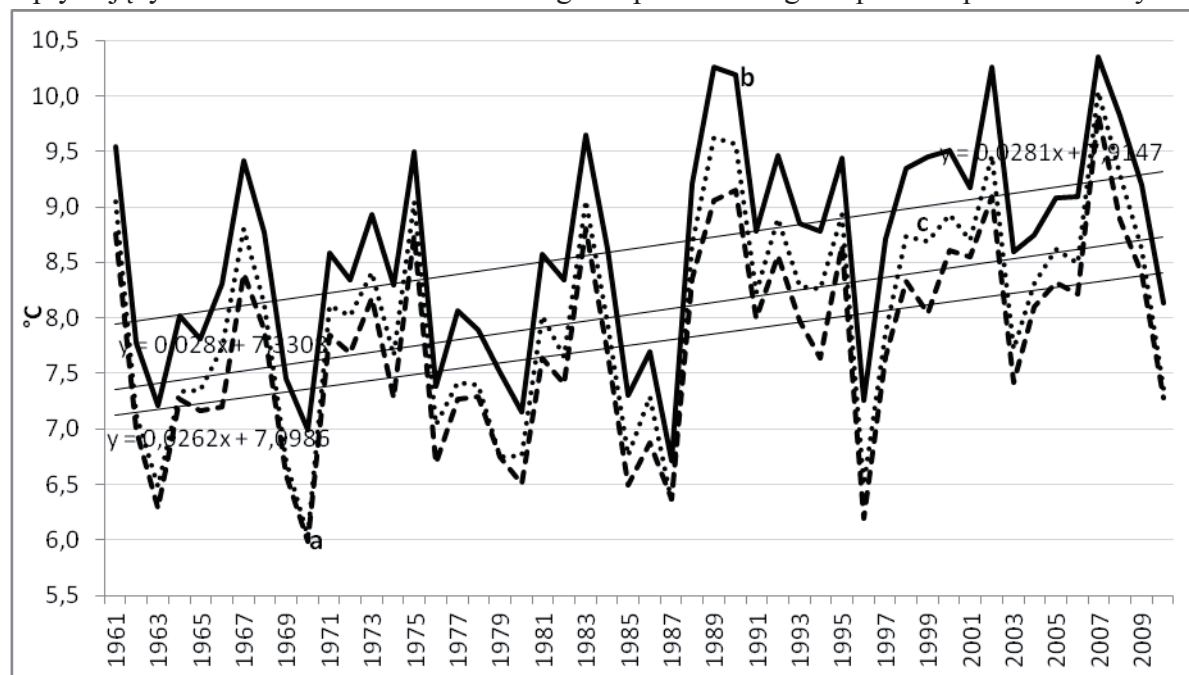
tak więc całkowite zasoby ciepła można wyznaczyć jako;

$$Q = \sum t \cdot v \text{ [cal]} \quad (3)$$

Dokonano przeliczenia zasobów ciepła na  $\text{cm}^2$  powierzchni jeziora. Wg Hutchisona [1957] jest to ilość ciepła zawarta w prostopadłościanie o powierzchni  $1 \text{ cm}^2$  i wysokości równej średniej głębokości jeziora.

## WYNIKI I DYSKUSJA

Ocenę zasobów ciepła oraz ich zmienności dla obu jezior, poprzedzono analizą zmian temperatury powietrza a następnie temperatury wody- jako kluczowych czynników wpływających na wielkość zakumulowanego ciepła. Przebieg temperatur przedstawia ryc. 2.

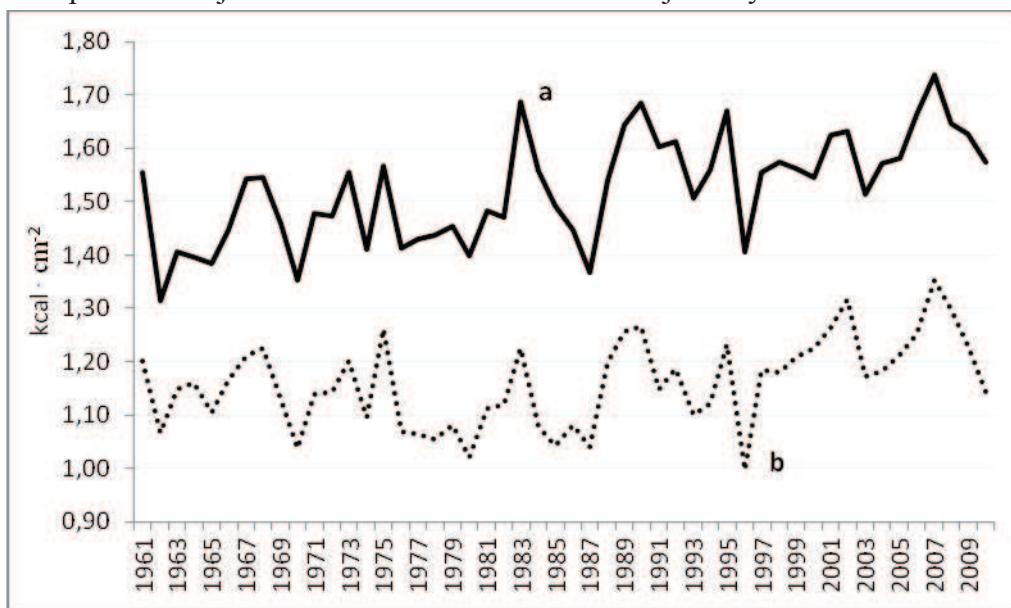


Ryc.2. Średnia roczna temperatura powietrza oraz wód jeziornych w okresie 1961-2010, a- Łeba, b- Łebsko, c- Gardno

Temperatura powietrza dla stacji Łeba oraz temperatura wody obu jezior w analizowanym okresie wykazują małe zróżnicowanie względem siebie. Najwyższą średnią roczną temperaturę odnotowano w przypadku jeziora Łebsko i wyniosła  $8,6^{\circ}\text{C}$  i była większa o  $0,6^{\circ}\text{C}$  od temperatury wody Gardna i o  $0,8^{\circ}\text{C}$  w przypadku temperatury powietrza w Łebie. W układzie miesięcznym najwyższe różnice pomiędzy temperaturą powietrza a temperaturą wody notowane są w styczniu (średnia temperatura powietrza dla Łeby to  $-0,7^{\circ}\text{C}$  a wody w Łebsku  $1,3^{\circ}\text{C}$ ) oraz w lipcu (średnia temperatura powietrza dla Łeby to  $16,8^{\circ}\text{C}$  a wody w Łebsku  $18,6^{\circ}\text{C}$ ). Analizując rozkład temperatury powietrza dla stacji Łeba można stwierdzić, że nawiązuje on ściśle do przebiegu temperatury wód obu jezior. Zarówno temperatura powietrza jak i temperatura wody, charakteryzują się tendencją wzrostową. W analizowanym wieloleciu nastąpił wzrost temperatury powietrza o  $0,26^{\circ}\text{C}\cdot\text{dek}^{-1}$  a temperatury wody jeziora Łebsko i Gardno o  $0,28^{\circ}\text{C}\cdot\text{dek}^{-1}$ . W układzie miesięcznym najwyższy wzrost temperatury powietrza zanotowano w lutym i wynosił on  $0,45^{\circ}\text{C}\cdot\text{dek}^{-1}$ . Z uwagi na występującą w tym miesiącu pokrywą lodową i izolację mas wodnych od czynników zewnętrznych, sytuacja ta nie przełożyła się na największy wzrost temperatury wód jeziornych. Najwyższy wzrost średniej miesięcznej temperatury wody odnotowano w kwietniu w przypadku Łebska ( $0,49^{\circ}\text{C}\cdot\text{dek}^{-1}$ ) a w przypadku Gardna w lipcu ( $0,33^{\circ}\text{C}\cdot\text{dek}^{-1}$ ). Zmiany te są istotne statystycznie.

Z uwagi na niewielką głębokość i polimiktyczny charakter obu jezior można przyjąć, że temperatura wody jest w całej masie wyrównana. Oznacza to, że punktowy pomiar temperatury daje informacje o średniej temperaturze wody w jeziorze. Dysponując takimi

informacjami, zgodnie z wcześniej przedstawionymi założeniami można określić zmianę zasobów ciepła dla obu jezior w latach 1961-2010. Obrazuje to ryc.3.



Ryc.3. Zmienność zasobów ciepła jeziora Łebsko (a) i Gardno (b) w latach 1961-2010.

Średnie zasoby ciepła w przeliczeniu na jednostkę powierzchni w analizowanym wieloleciu wyniosły  $1,52 \text{ kcal} \cdot \text{cm}^{-2}$  w przypadku Łebska i  $1,16 \text{ kcal} \cdot \text{cm}^{-2}$  w przypadku Gardna. Wielkość zasobów ciepła, jest proporcjonalna do średniej temperatury masy wody i średniej głębokości jeziora [Grześ 1978]. Zgodnie z tym stwierdzeniem, analogicznie jak w przypadku temperatury wody, odnotowany jest wzrost tej wielkości w analizowanym pięćdziesięcioleciu. W odniesieniu do głębokości średniej, także wcześniej przytoczona prawidłowość znajduje potwierdzenie w badanych przypadkach- głębsze o 0,3 m jezioro Łebsko, posiada wyższe średnie zasoby ciepła (w skali całego wielolecia) o  $0,36 \text{ kcal} \cdot \text{cm}^{-2}$  w stosunku do jeziora Gardno.

Uzyskane w pracy wyniki dla dwóch jezior znajdujących się na południowym wybrzeżu Bałtyku są zbliżone z wynikami podobnych prac na świecie [Verburg i in. 2003, Thompson i in. 2005, Coast i in. 2006, Adrian i in. 2009]. Obserwowana tendencja wzrostowa temperatury powietrza ma bezpośrednie przełożenie na wzrost temperatury wód jeziornych. Szczególnie na zmiany wynikające z tego faktu podatne są jeziora płytkie, o homogenicznych cechach całej masy wodnej. Jedną z oczywistych konsekwencji zmian temperatury wody jest wzrost ciepła. Fakt ten z kolei będzie prowadził do zmian w składzie gatunkowym ekosystemów jeziornych oraz powodował zmiany cyklu procesów życiowych organizmów tam występujących.

## WNIOSKI

Zestawione w pracy dane świadczą o dużych zmianach w środowisku przyrodniczym. W rozpatrywanym okresie pięćdziesięciu lat zauważalny jest wyraźny wzrost temperatury powietrza, który miał wpływ na wzrost temperatury wody analizowanych jezior. W związku z tym nastąpił zwiększenie ciepła akumulowanego w tych zbiornikach, co w przyszłości może przyczynić się do przebudowy flory i fauny tam występujących. W kontekście propagowania

coraz szerszego wykorzystywania energii odnawialnej, jako interesujące wydaje się podjęcie w przyszłości szczegółowych badań nad możliwością wykorzystania energii zmagazynowanej w jeziorach dla celów gospodarczych. Energia ta szczególnie na obszarze młodogłacjalnym (uwagi na liczbę jezior), mogłaby okazać się znacznym uzupełnieniem dotychczasowego stanu.

## LITERATURA

1. Adrian R., O'Reilly C. M., Zagarese H., Baines S. B., Hessen D. O., Keller W., Livingstone D. M., Sommaruga R., Straile D., Van Donk E., Weyhenmeyer G.A., Winder M., 2009. Lakes as sentinels of climate change, *Limnology and Oceanography*, 54, 6, 2: 2283-2297
2. Coats R., Perez-Losada J., Schladow G., Richards R., Goldman C., 2006. The warming of Lake Tahoe. *Clim. Change*, 76: 121–148.
3. Edmundson J.A. , Mazumder A., 2002. Regional and hierarchical perspectives of thermal regimes in subarctic, Alaskan lakes, *Freshwater Biology*, 47, 1: 1-17
4. Gerten D., Adrian R., 2002. Effects of climate warming, North Atlantic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation on thermal conditions and plankton dynamics in northern hemispheric lakes. (Review), *The Scientific World Journal*, 2: 586-606
5. Grześ M., 1978. Termika osadów dennych w badaniu jezior, Wrocław: Zakład Narodowy im. Ossolińskich - Wydaw. PAN
6. Jansen, W., Hesslein R.H., 2004. Potential Effects of Climate Warming on Fish Habitats in Temperate Zone Lakes with Special Reference to Lake 239 of the Experimental Lakes Area (ELA), North-Western Ontario, *Environmental Biology of Fishes*, 70, 1: 1-22
7. Livingstone, D.M., Dokulil, M.T., 2001. Eighty years of spatially coherent Austrian lake surface temperatures and their relationship to regional air temperature and the North Atlantic Oscillation, *Limnology and Oceanography*, 46, 5: 1220-1227
8. Novikmec M., Svitok M., Kočický D., Šporka F., Bitušík P., 2013. Surface water temperature and ice cover of Tatra Mountains Lakes depend on altitude, topographic shading, and bathymetry, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 45, 1: 77-87
9. Robertson D.M., Ragotzkie R.A., 1990. Changes in the thermal structure of moderate to large sized lakes in response to changes in air temperature, *Aquatic Sciences*, 52, 4:360-380
10. Straile D., Jöhnk K., Rosknecht H., 2003. Complex effects of winter warming on the physicochemical characteristics of a deep lake, *Limnology and Oceanography*, 48, 4: 1432-1438
11. Taranu Z.E., Köster D., Hall R.I., Charette T., Forrest F., Cwynar L.C., Gregory-Eaves I., 2009. Contrasting responses of dimictic and polymictic lakes to environmental change: A spatial and temporal study, *Aquatic Sciences*, 72, 1: 97-115
12. Verburg P., Hecky R.E., Kling H., 2003. Ecological Consequences of a Century of Warming in Lake Tanganyika, *Science*, 301: 505-507

13. Wilhelm S., Adrian R., 2008. Impact of summer warming on the thermal characteristics of a polymictic lake and consequences for oxygen, nutrients and phytoplankton, *Freshwater Biology*, 53: 226–237.
14. Thompson R., Kamenik C., Schmidt R., 2005. Ultra-sensitive Alpine lakes and climate change, *Journal of Limnology*, 64, 2: 139-152

### THE CHANGES IN HEAT RETENTION OF TWO CHOSEN POLYMICTIC LAKES AS AN EFFECT OF CLIMATE CHANGE

**Summary:** The work presents variability concerning heat retention of two polymictic lakes, Lake Łebsko and Lake Gardno, located in northern Poland. Basing on the average monthly and yearly air temperatures and the temperature of the lake water in the period between 1961 and 2010, it was possible to establish the volume of heat accumulated by the waters of both lakes. As the conducted analysis has shown the water temperature of Lake Łebsko and Lake Gardno has risen by  $0.28^{\circ}\text{C}\cdot\text{dec}^{-1}$ . The rise of water temperature is the key factor in the growth of heat retention of both lakes. The average heat retention in the analysed period of time has been established to be  $1.52 \text{ kcal} \cdot \text{cm}^{-2}$  in case of Lake Łebsko and  $1.16 \text{ kcal} \cdot \text{cm}^{-2}$  in case of Lake Gardno.

**Key words:** climate change, temperature, heat retention

### VERÄNDERUNGEN DER WÄRMERESSOURCEN DER ZWEI AUSGEWÄHLTEN POLIMIKTISCHEN SEEN ALS EFFEKT DES KLIMAWANDELS

**Zusammenfassung:** In der Bearbeitung wurde die Wandelbarkeit der Wärmeressourcen von zwei polimiktischen Seen beschrieben. Der See Łebsko und der See Gardno sind in Nordpolen lokalisiert. Im Bezug auf die durchschnittliche Lufttemperatur und Seewassertemperatur im Zeitraum von 1961-2010 konnte das Volumen der von Wassermassen beider Seen gespeicherter Wärme bestimmt werden. Die durchgeführte Analyse der Wassertemperatur in den Seen Łebsko und Gardno hat gezeigt, dass sie um  $0,28^{\circ}\text{C}\cdot\text{dec}^{-1}$  gestiegen ist. Die Steigung der Temperatur erscheint als Hauptfaktor, der zur Steigung der Wärmeressourcen beider Seen beigetragen hat. Die durchschnittlichen Wärmeressourcen, die in den analysierten mehreren Jahren beobachtet waren, betragen für Łebsko  $1,52 \text{ kcal} \cdot \text{cm}^{-2}$  und für Gardno  $1,16 \text{ kcal} \cdot \text{cm}^{-2}$ .

**Schlüsselworte:** Klimawandel, Temperatur, Wärmeressourcen