

Zmiany bilansu masy lodu w Jaskini Lodowej w Ciemniaku (Tatry Zachodnie, Polska) z zastosowaniem technik trójwymiarowego modelowania jaskiń

Piotr Szukała

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Instytut Geoekologii i Geoinformacji,
ul. Dziegielowa 27, 61-680 Poznań, Polska, e-mail: pszuk@amu.edu.pl

Słowa kluczowe: bilans masy lodowej, Jaskinia Lodowa w Ciemniaku, modelowanie 3D

Keywords: ice mass balance, Ice Cave in Ciemniak, 3D modeling

Streszczenie

Jaskinia Lodowa w Ciemniaku znajduje się w zachodniej części Tatr, najwyższego łańcucha polskich Karpat. Jej otwór położony jest na wysokości 1715 m n.p.m. Mikroklimat jaskini został określony jako dynamiczny zimny, co ma związek z sezonowymi przepływami powietrza w końcowych partiach. Permanentna pokrywa lodowa, wypełniająca większą część głównego ciągu korytarzy jaskini, była opisywana w latach 1922, 1950 i 1986 lecz dopiero w latach 2002–2004 skonfrontowano bilans masy lodu z sezonową zmiennością termiki jaskini Lodowej w Ciemniaku, co umożliwiło identyfikację i udział procesów alimentacji oraz jego ablacji i sublimacji. Kontynuacją badań dotyczących wieloletniej dynamiki zjawisk kriogenicznych w jaskini jest kartograficzne opracowanie kształtu i rozmiarów korytarzy oraz masy lodowej. Pozwoliło to na zestawienie danych archiwalnych z aktualnymi pomiarami oraz przeprowadzenie symulacji zmian wysokości położenia oraz ukształtowania powierzchni lodu. Skonfrontowano materiały kartograficzne testowanej części jaskini z lat 1986, 2002 oraz sezonu zimowego 2009/1010. Stwierdza się ciągły ubytek masy lodu oraz zmniejszenie się jego powierzchni. Uzyskane wyniki potwierdzają jednak wcześniejsze obserwacje dotyczące stałego ubytku masy lodu w Jaskini Lodowej w Ciemniaku oraz znacznego wzrostu tempa tego procesu w ostatnich dekadach.

1. Wstęp

Jaskinia Lodowa w Ciemniaku jest największą jaskinią lodową w Tatrach polskich i niejednokrotnie była tematem rozważań naukowych (Rachlewicz, Szczuciński, 2004, Rygielski et al., 1995, Zwoliński, 1923, etc.). Mikroklimat tej

jaskini został określony na dynamiczny zimny (Rygielski et al., 1994) co powoduje zróżnicowanie pokrywy lodowej w zależności od pory roku. Podpowierzchniowe zjawiska kriogeniczne można podzielić na typy w zależności od rodzaju lodu, który się pojawia epizodyczne lub występuje permanentnie (Ford, Williams, 2007). W Jaskini Lodowej w Ciemniaku występuje typ epizodyczny: nacieki lodowe, szron (*ang. hoarfrost*), zamrożone jeziorka oraz rynny lodowe oraz typ lodu występujący permanentnie powstały w skutek infiltracji wód meteorycznych i ich depozycji w formie laminarnych pól lodowych. Od roku 1986 obserwuje się ciągły ujemny bilans masy lodowej w Jaskini Lodowej w Ciemniaku (Rachlewicz, Szczuciński, 2004) co wskazuje na zmianę warunków mikroklimatycznych pozwalających na depozycję lodu.

Techniki trójwymiarowej wizualizacji danych pomiarów kartograficznych umożliwiają wierną rekonstrukcję masy lodowej oraz możliwości porównywania ich ze sobą. Ze względu na ciągły ubytek masy lodowej w Jaskini Lodowej w Ciemniaku niezbędny jest monitoring zjawisk kriogenicznych co odzwierciedla tempo zmian i umożliwia ich prognozowanie.

1.1. Obszar badań

Dla celów porównania materiałów kartograficznych z lat 1986, 2002 oraz 2009 zdecydowano się na założenie powierzchni testowej w przyotworowych partiach Jaskini Lodowej w Ciemniaku, zwanych Kozią Kolebą, Ślizgawką oraz Wielkim Korytarzem (Ryc. 1) o łącznej powierzchni ok. 500 m². Obszar ten jest dobrze udokumentowany pod względem wysokości zalegania pokrywy lodowej, nieskomplikowany powierzchniowo oraz łatwy w dostępie co umożliwiło dokładny pomiar powierzchni i naturalne odzwierciedlenie kształtów masy lodu z uwzględnieniem charakterystycznych cech geometrycznych. Kartując masę lodową na obszarze powierzchni testowej uwzględniono również zjawisko odspojenia masy lodowej od ścian jaskini co spowodowało odsłonięcie bocznych szczelin. Pierwsze informacje o tym zjawisku pojawiają się w opracowaniach kartograficznych

z 1994 roku, gdzie zaznaczono na planie jaskini inicjalny otwór do Komory pod Lodem (Siarzewski, 1994).

2. Metodyka

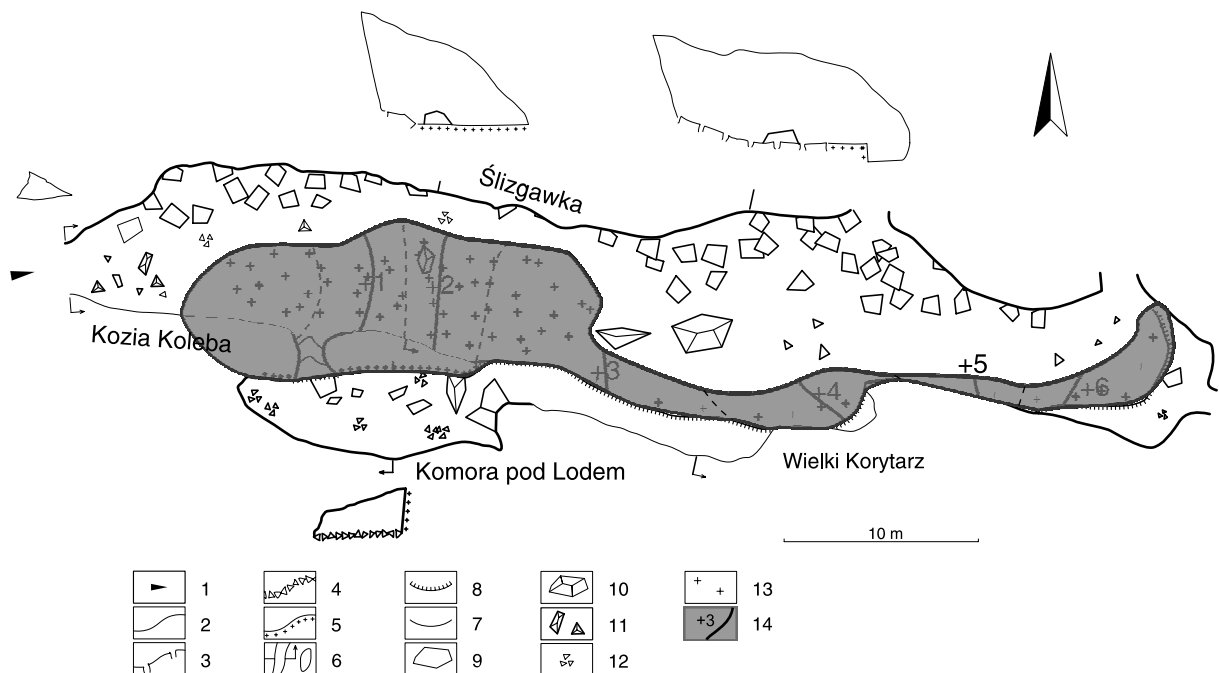
Prace terenowe były wykonane podczas wyjazdu terenowego w grudniu 2009 roku, które polegały na skartowaniu wstępnych partii jaskini ze szczególnym uwzględnieniem pokrywy lodowej. W celu zwiększenia dokładności pomiarów użyto dalmierza laserowego z wmontowanym modułem kompasu i klinometru elektronicznego co pozwoliło na zwiększenie dokładności pomiarowej do 0.1° wartości kątowej oraz 1mm wartości odległości. Z punktów osnowy pomiarowej wykonano domiary szczegółów topograficznych metodą biegunową a następnie opracowano dane w programie służącym do kartowania jaskiń i generowania modeli trójwymiarowych korytarzy (Therion) (Budaj, Mudrak, 2008, Wookey, 2004).

W celu porównania bilansu masy lodu na przestrzeni lat 1986–2009 wykorzystano archiwalne materiały kartograficzne planów Jaskini Lodowej w Ciemniaku (Siarzewski, 1994, Rachlewicz, Szczuciński, 2004) oraz opracowanie własne w roku 2009. Na przełomie tego okresu zauważa się intensywny i jednostajny ubytek lodu. Na podstawie modelowania masy lodowej w programach grafiki 3D (3ds Max, AutoCAD, Therion) określono objętość lodu z zachowaniem kształtu korytarzy jaskini oraz z uwzględnieniem procesów ablacji. W ten sposób uzyskano szczegółowo obliczoną kubaturę masy lodowej

na lata 1986, 2002 oraz sezonu zimowego 2009/2010 dla powierzchni testowej w przyotworowych partiach jaskini.

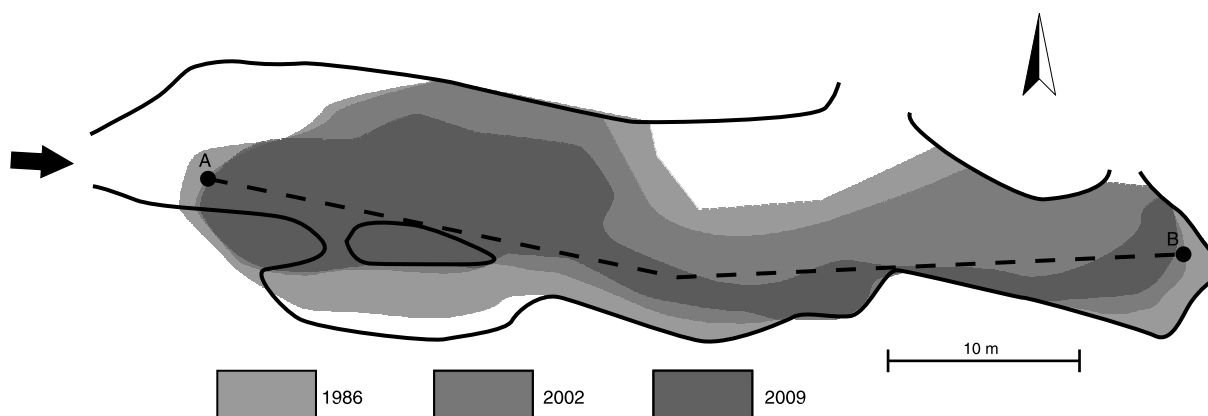
3. Wyniki

Na podstawie pomiarów własnych oraz rekonstrukcji mas lodu z lat 1986, 2002 dokonano porównania otrzymanych wyników z uwzględnieniem możliwych błędów: odchyłek pomiarowych, rocznej amplitudy ablacji lodu oraz różnicy wykorzystanych materiałów kartograficznych. Bazując na materiałach archiwalnych zrekonstruowano powierzchnie zalegania lodu oraz uwzględniono poprawki wynikające z porównania poziomu pokrywy lodowej ze znanym podłożem skalnym co przejawia się intensywnym zmniejszaniem się cienkiej pokrywy lodowej w północnej części omawianego obszaru. Na podstawie opisu tekstowego tej części jaskini (Siarzewski, 1994) odtworzono możliwe tempo procesu odspajania się lodu od ściany skalnej w południowej części powierzchni testowej. Kolejne założenie metodyczne uwzględnia interpolacje masy kriogenicznej w częściach niedostępnych dla człowieka (fragment południowo-zachodni). Na rycinie (Ryc. 2) przedstawiono obszary zalegania pokrywy lodowej dla lat 1986, 2002 i 2009. Porównując poszczególne powierzchnie do ogółu powierzchni testowej (obszar przyotworowy jaskini – ok. 500 m^2), uzyskano jej procentowy udział, która wynosi odpowiednio dla analizowanych lat: 80%, 60% oraz 40%.



Ryc. 1. Zaleganie pokrywy lodowej na powierzchni testowej w Jaskini Lodowej w Ciemniaku (15.12.2009). 1: wejście; 2: ściana; 3: bloki skalne; 4: rumowisko; 5: lód; 6: linia profilowa; 7: próg; 8: zarys spadku; 9: granica bloków skalnych; 10: krawędzie bloków skalnych; 11: bloki skalne; 12: rumowisko; 13: lód; 14: pokrywa lodowa w roku 2009 z zaznaczonymi poziomiami (interwał co 0,5 m) w metrach powyżej otworu. Skartował i opracował: Szukała P. 2009

Fig. 1. Appearance of the ice surface in the test area in The Ice Cave in Ciemniak (15.12.2009) Key: 1: entrance; 2: wall; 3: blocks; 4: debris; 5: ice; 6: cross-section; 7: floor step; 8: contour; 9: rock border; 10: rock edge; 11: blocks; 12: debris; 13: ice; 14: ice surface in 2009 with contour interval 0,5 m under entrance level. Measured and surveyed: Szukała P. 2009



Ryc. 2. Obszar zalegania pokrywy lodowej w przyotworowych partiach Jaskini Lodowej w Ciemniaku w latach 1986, 2002 oraz 2009 z zaznaczoną linią profilową A–B

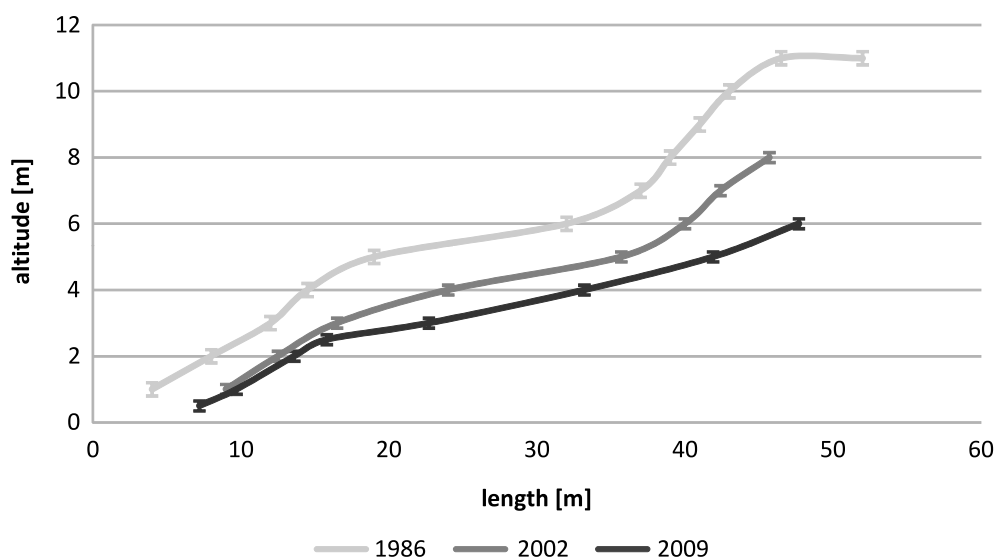
Fig. 2. The ice sheet area in the near-entrance parts of the Ice Cave in Ciemniak in 1986, 2002 and 2009 yr. The line profile is marked between A–B points

Efektom pomiarów niwelacyjnych było uzyskanie informacji o kształcie i wysokości powierzchni pokrywy lodowej co przedstawia zestawienie wykresów powierzchni (Ryc. 3) na linii profilowej A–B (Ryc. 2). Materiały źródłowe powstawały w różnych okresach roku co wiąże się z dysproporcjami porównywalnych danych. Średnia amplituda bilansu rocznego masy lodu w latach 2002–2004 wynosiła ok. 30 cm (Rachlewicz, Szczuciński, 2004) stąd też na wykresach (Ryc. 3.) zaznaczono słupki błędów.

4. Dyskusja

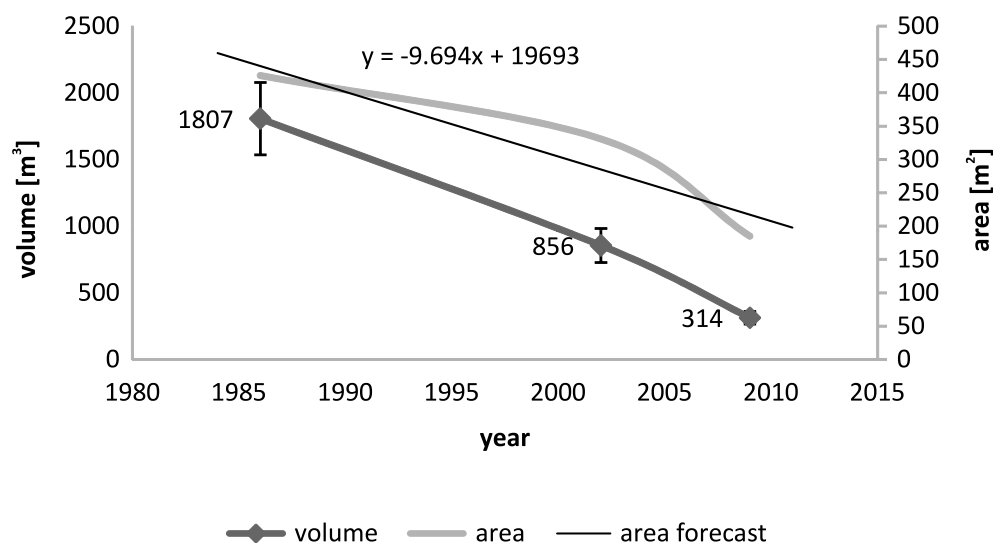
Na podstawie uzyskanych danych oraz literatury dotyczącej zagadnień zmiany bilansu masy lodowej w jaskiniach, stwierdzić można, iż zjawisko ubytku masy

kriogenicznej na przełomie XX i XXI wieku nie jest zjawiskiem odosobnionym. Podobne tendencje zauważa się m.in. w jaskiniach lodowych w Alpach Szwajcarskich (Luetscher et al., 2005), gdzie pokrywa lodowa w niektórych jaskiniach intensywniej się zmniejsza. Podobną sytuację można stwierdzić w przypadku omawianej Jaskini Lodowej w Ciemniaku, gdzie tempo ubytku lodu jest coraz intensywniejsze (Ryc. 4). Powierzchni lodu ubywa szybciej niż objętości co jest związane z małą miąższością lodu w północnej części oraz jego odspajania się w części południowej. Ma to najprawdopodobniej związek ze zmianą wieloletniej temperatury skały w tym miejscu, ponieważ jednym z warunków do utrzymania się permanentnej pokrywy lodowej w jaskiniach lodowych klimatu umiarkowanego jest ujemna temperatura skały na przestrzeni wielolecia. Tym samym musi



Ryc. 3. Profil wysokości pokrywy lodowej względem otworu (1715 m n.p.m.) w latach 1986, 2002, 2009 na linii A–B

Fig. 3. The cross section of ice sheet altitude above the entrance (1715 m a.s.l.) in 1986, 2002, 2009 yr on the line profile A–B



Ryc. 4. Zmiany w objętości i powierzchni pokrywy lodowej w przyotworowych partiach Jaskini Lodowej w Ciemniaku w okresie 1986–2009

Fig. 4. Changes of the ice mass volume and area in near-entrance parts of the Ice Cave in Ciemniak during period of 1986–2009 yr

ona być dodatnia przez pewien czas w roku co warunkuje dostanie się wody w do pustek podziemnych (Silvestru, 1999).

Jednoznaczny trend ubytku masy lodowej stwierdzić można na podstawie przedstawionych wyników zmiany kubatury masy lodowej oraz zmian powierzchni zalegania pokrywy lodowej (Ryc. 4). Przy obliczaniu objętości lodu uwzględniono błąd statystyczny, który określono na 15% z wartości masy. W ten sposób wartość błędu rośnie wprost proporcjonalnie do wartości objętości oraz odwrotnie proporcjonalnie do czasu pomiaru. Jest to związane z dużymi dysproporcjami pomiędzy planami jaskini z lat 1986, 2002 oraz niezależnie skartowanym planem w 2009r. Od września 1986 do maja 2002 (daty pomiarów) masy lodowej ubywało w tempie $58 \text{ m}^3 \text{ r}^{-1}$, natomiast w terminie od maja 2002 do grudnia 2009 wartość ta wynosiła $71 \text{ m}^3 \text{ r}^{-1}$. W latach 1920–1980 wartość ubytku lodu zawierała się w zakresie $20\text{--}30 \text{ m}^3 \text{ r}^{-1}$ (Rachlewicz, Szczuciński, 2004). Intensywność ubytku masy lodowej w Jaskini Lodowej w Ciemniaku jest coraz większa na przestrzeni wielolecia co może być indykatorem zmian klimatycznych.

Changes in the ice-mass balance in the Jaskinia Lodowa w Ciemniaku ice cave (Western Tatra Mountains, Poland) using 3D cave surveying method

The Ice Cave in Ciemniak (Jaskinia Lodowa w Ciemniaku) is located in the western part of the Tatra Mountains, the highest mountain range in the Polish part of the Carpathians. The cave entrance is situated approx. 1715 m a.s.l. Its microclimate has been described as dynamic-cold and fluctuates depending on the seasonal air circulation in the closing parts of the cave. The pe-

rennial ice body has been described in 1922, 1950 and 1986, but only in 2002–2004 the ice mass balance was compared with the seasonal air currents inside the cave. The aim of the present study was to establish a 3D model of the cave, with a description of shape and passage dimensions as well as an estimate of the ice mass. Archival data were compared with the new survey so that the ice ablation could be simulated. The ice cover and the ice volume were reconstructed for the years 1986, 2002 and winter season 2009/2010. Cartographical data from those years show that the ice mass was constantly decreasing just as the ice covering. Thus, all investigations confirm that the ice-melting rate in the Ice Cave in Ciemniak is increases.

Literatura

- Budaj M., Mudrak S., 2008. Therion – Digital Cave Maps. “4th European Speleological Congress”, Speleological Federation of the European Union, Lans-en-Vercors, Francja, 23–30.08.2008.
- Ford D., Williams P., 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology. England, John Wiley & Sons.
- Luetscher M., Jeannin P., Haerberli W., 2005. Ice caves as indicator of winter climate evolution: a case study from Jura Mountains, *The Holocene* 15, 7, s. 982–993.
- Rachlewicz G., Szczuciński W., 2004. Seasonal, annual and decadal ice mass balance changes in the ice cave Jaskinia Lodowa w Ciemniaku, the Tatra Mountains, Poland. *Theoretical and Applied Karstology*, 17, s. 11–18.
- Rygielski W., Siarzewski W., Wieliczko P., 1995. Variability of the ice deposits in Ice Cave on Mount Ciemniak in the West Tatra Mountains, *Questiones Geographicae*, 17/18, s. 55–64.

- Silvestru E., 1999. Perennial ice in caves in temperate climate and its significance, *Theoretical and Applied Karstology*, 11–12, s. 83–93.
- Siarzewski W., 1994. Jaskinie lodowe w Tatrach. [w:] Grodzicki J. (red.), *Jaskinie Wąwozu Kraków, Jaskinie Tatrzańskiego Parku Narodowego*, 5, Warszawa, PTP-NoZ.
- Wookey, 2004. Therion- State of the Art Cave-Drawing Software. [w:] Day, A., (red.), *Compass Points*, 33, British Cave Research Association.
- Zwoliński T., 1923. Nieznane groty doliny Kościeliskiej, *Wierchy*, 1, s. 26–43.

