

Morfologia zwałów lodowych na polskich zalewach przybrzeżnych

Prof. dr hab. Józef Piotr Girjatowicz
Uniwersytet Szczeciński, Wydział Nauk o Ziemi

Na płytkich, wysłodzonych i o małych ruchach wód (nie- wielkie falowanie, prądy, brak pływów) polskich zalewach przybrzeżnych występują sprzyjające warunki do tworzenia się stałych pokryw lodowych. Na tych akwenach stały lód jest dominującym rodzajem lodu [14, 16, 18]. W okresie rozpadu stałego lodu i ruszenia lodów na płycznach i w strefie brzegowej zalewów pojawiają się zwały lodowe, które mogą sięgnąć do wysokości nawet 10 m. Czynnikiem piętrzącym lód w zwały lodowe jest głównie siła wiatru (napężenie styczne) [3, 4, 15], a ich wysokość zależy głównie od grubości lodu [por. 4, 10, 17]. Niektóre dane morfometryczne dotyczące osiadłych zwałów lodowych z innych akwenów osłoniętych można znaleźć w pracach Krausa [10], Alestalo i Häikiö [1], czy Orviku i in. [15]. Dane te dotyczą głównie wymiarów (parametrów): wysokości i odległości zwałów od brzegu w zatokach: Parnawskiej (Pärnu), Tallińskiej, Narewskiej, czy na wodach między wyspami Sarema, Hiiuma, Muhu i Vormsi.

Brak jest kompleksowych pomiarów topografii osiadłych zwałów lodowych, dlatego jako cel pracy przyjęto przedstawienie topografii i wymiarów (parametrów) tych zwałów oraz związków, jakie zachodzą między tymi parametrami. W tym celu wyszczególniono 22 przypadki zwałów lodowych: 17 na Zalewie Szczecińskim (Podgrodzie, Miroszewo, Kopice, Czarnocin, Półwysep Rów, Płocin i Karnocice) i 5 na Zalewie Wiślanym (Tolkmicko, Frombork) z okresu 1995-2017. Mierzone były takie parametry jak: wysokość nad poziomem wody (n.p.w.) i nad powierzchnią gruntu (n.p.g.), szerokość zwału, długość zboczy: podwietrznego i zawietrznego oraz stopnie nachylenia tych zboczy. Główne wymiary (parametry) zwału lodowego przedstawiono na rys. 1. Ponadto mierzono grubość lodu, głębokość, odległość zwału od brzegu, a także określano współrzędne geograficzne zwału i kierunek nasuwu taflí lodowej. Podstawowe wyniki pomiarów przedstawiono w tabl. 1, a lokalizację punktów pomiarowych dotyczących zwałów lodowych na Zalewie

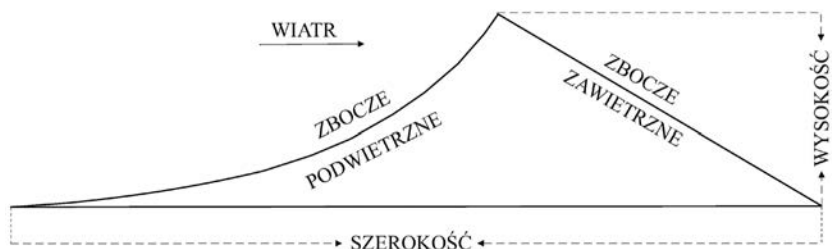
Tabl. 1. Dane morfometryczne zwałów lodowych na polskich zalewach przybrzeżnych (1995-2017)

Obszar	Data pomiaru	Wysokość zwału H [m]	Wysokość zwału H_g [m]	Długość zbocza zawietrznego [m]	Długość zbocza podwietrznego D [m]	Szerokość zwału S [m]	Nachylenie zbocza zawietrznego [°]	Nachylenie zbocza podwietrznego [°]	Grubość lodu h [cm]
Zalew Szczeciński									
Podgrodzie	11.02.2003	5,8	7,4	10,5	23 ¹	30 ¹	31	15 ¹	18
	27.01.2000	2,8	4,5	5	7	10	29	26	8
	26.02.2003	2,5	4,8	8,5	6	12	15	29	18
Miroszewo	09.03.2011	3	3,3	7,5	12 ²	17 ²	22	14 ²	9
	22.01.1996	4,6	6	6,5	13	15	45	22	16
	28.12.1995	3,5	5,5	5,5	9	15	29	26	10
Kopice	06.03.2003	2,3	2,1	8	13	19	14	10	13
Czarnocin	06.02.2004	2,4	1,8	7 ³	17	20 ³	15 ³	10	10
Półwysep	15.12.1998	1,7	1,8	3,5	14 ²	15 ²	30	7 ²	6
Rów	08.02.2011	2,6	2,5	4,5	8	10	32	23	10
	27.02.2003	3,4	3,3	7	12	17	29	14	14
	03.02.2016	1,4	1,2	1,5	5	6	25	17	4
	03.02.2016	1,6	1,2	2,5	7 ²	9 ²	29	13 ²	4
Płocin	02.03.2011	1,7	1,3	6,5	13	17	11	8	15
	05.03.2011	3,1	3,5	5,5	7	11	32	27	11
	04.03.2003	3,2	4	9	16	23	21	12	13
Karnocice	20.01.2016	1,7	2,2	4	4	6	27	25	3
Średnia	09.02	2,8	3,3	6,0	10,9	14,8	25,6	17,5	10,7
Zalew Wiślany									
Tolkmicko	25.02.2017	3,4	3,6	8	14 ²	19 ²	25	15 ²	10
	03.03.1999	1,8	2	2,5	5	6	36	23	6
Frombork	11.02.2011	4,5	4,5	7	13	16	38	23	20
	11.02.2011	3,4	3,6	5,5	9	11	35	26	15
	11.02.2011	4,4	4,3	6,5	9	12	41	30	20
Średnia	18.02	3,5	3,6	5,9	10,0	12,8	35	23,4	14,2
Ogółem	11.02	2,9	3,4	6,0	10,7	14,4	27,8	18,9	11,5

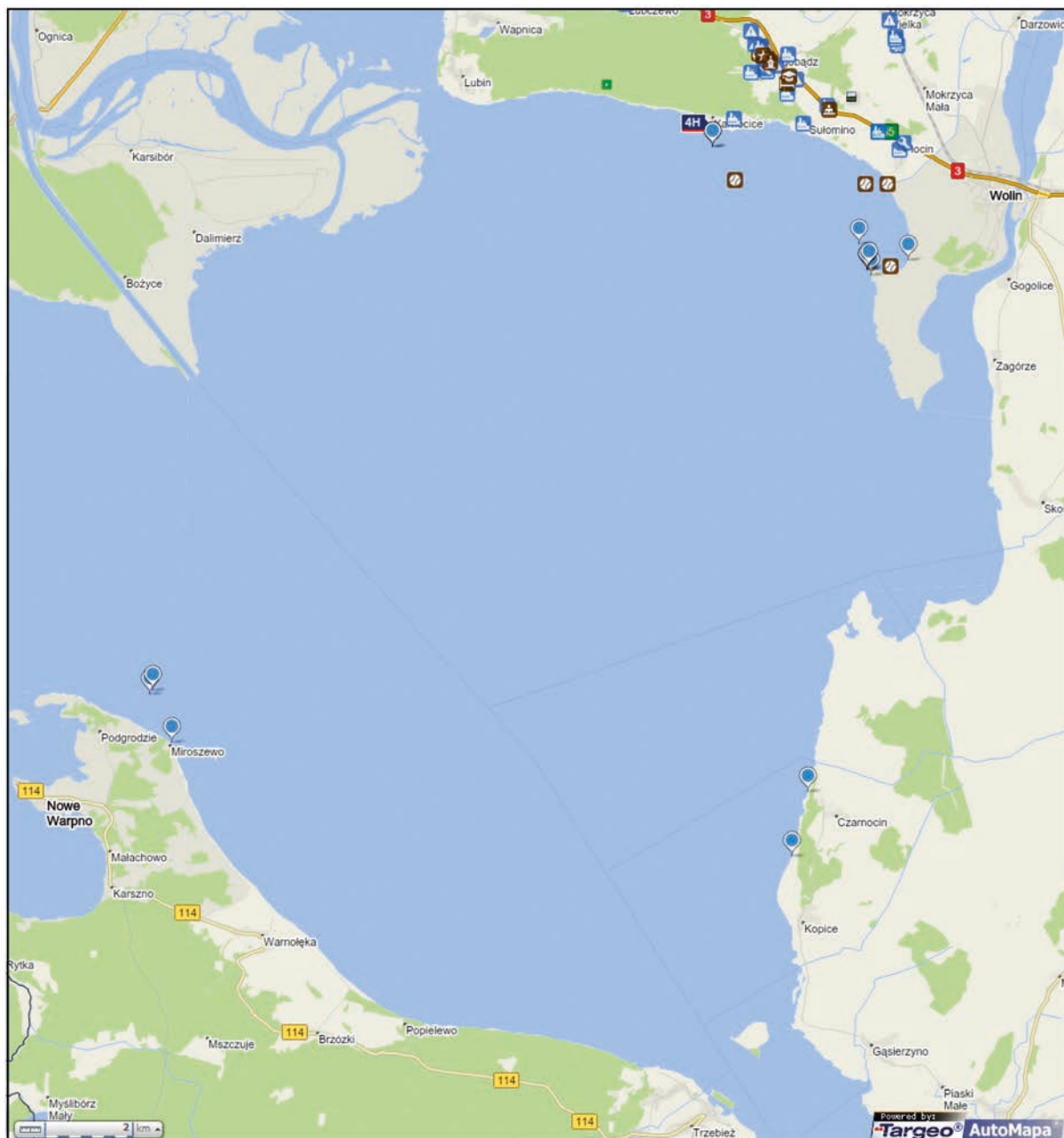
^{1/} Uwzględniono zwał z trzema grzbietami po stronie podwietrznej

^{2/} Uwzględniono zwał z dwoma grzbietami po stronie podwietrznej

^{3/} Uwzględniono zwał z dwoma grzbietami po stronie zawietrznej



Rys. 1. Główne wymiary (parametry) zwału lodowego



Rys. 2. Lokalizacja punktów pomiarowych dotyczących zwałów lodowych na Zalewie Szczecińskim

Szczecińskim, dla których dysponowano współrzędnymi geograficznymi (13), przedstawiono na rys. 2.

Strukturę pokrywy lodowej wraz ze zwałami lodowymi badano na podstawie wyników wierceń w lodzie, stosując ręczny świder do lodu. Wyniki te posłużyły do sporządzenia przekrojów

poprzecznych tych form lodowych. Przekroje te dość dobrze obrazują strukturę pokrywy lodowej ze wszelkimi formami lodu [por. 5, 8, 11]. Korzystano też z taśmy mierniczej, łaty lodowej, sondy ręcznej, kompasu oraz GPS. Wykonywano również zdjęcia fotograficzne ukazujące topografię zwałów lodowych.

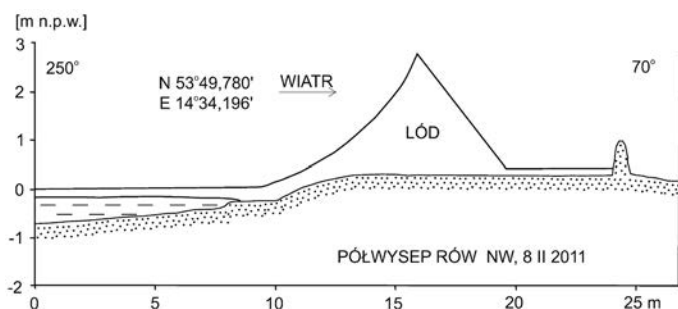
Związki między poszczególnymi parametrami zwału lodowego badane były metodami statystyki matematycznej – analizą korelacji i regresji liniowej. Wyprowadzono równania regresji. Siłę zależności między tymi parametrami określono współczynnikiem korelacji (R). Natomiast istotność statystyczną tych związków na poziomach: $\alpha = 0,05$; $0,01$ i $0,001$ badano testem Fishera-Snedecora [7, 13].

FORMY ZWAŁÓW LODOWYCH

Zwały lodowe powstające na zalewach przymorskich morza Bałtyckiego czy na innych akwenach osłoniętych (duże jeziora, zbiorniki retencyjne) przeważnie różnią się od spiętrzeń lodowych pojawiających się na wodach nieosłoniętych (morskich). Te osiadłe zwały lodowe (*ang. hummock*) charakteryzują się wklęsłymi zboczami podwietrznymi o wzrastającym nachyleniu ku wierzchołkowi, w odróżnieniu od topografii i struktury wałów lodowych (*ridge*), [por. 2, 9], czy od wałów śryżowych uformowanych wzdłuż brzegów (*grease ice ridge*), [por. 5, 12]. Charakterystyczne cechy topografii zwałów lodowych przedstawiono na wybranych profilach poprzecznych i fotografiach. Na rys. 3 przedstawiono przekrój poprzeczny zwału lodowego uformowanego u północno-zachodnich brzegów Półwyspu Rów (Zalew Szczeciński) w dniu 8 lutego 2011 roku. Wysokość tego zwału wynosiła 2,6 m n.p.w. i 2,5 m n.p.g. Zbocze podwietrzne o średnim nachyleniu 23° było wklęsłe o wzrastającym nachyleniu w kierunku wierzchołka zwału. Natomiast zbocze zawietrzne charakteryzowało się jednolitym nachyleniem (32°),

określone kątem naturalnego usypu (*angle of natural slip*) gruzu lodowego. Długość zbocza zawietrznego (4,5 m) była prawie dwukrotnie krótsza od zbocza podwietrznego (8 m), a szerokość zwału wynosiła 10 m. Na rys. 3 od strony lądu widoczny jest wał piasku o wysokości 0,5 m n.p.g. spiętrzony na początku nasuwania się tafli lodowej. Na skutek zwiększającego się tarcia nasuwającej się tafli lodowej nastąpiło jej przełamanie i zwałowanie lodu na brzegu zalewu (rys. 4). Na rys. 4 pokazano podwietrzną stronę zwału lodowego uformowanego wzdłuż brzegu Półwyspu Rów (Zalew Szczeciński). U góry w głębi rys. 4 widoczna jest wysunięta prawie pionowo tafła lodowa.

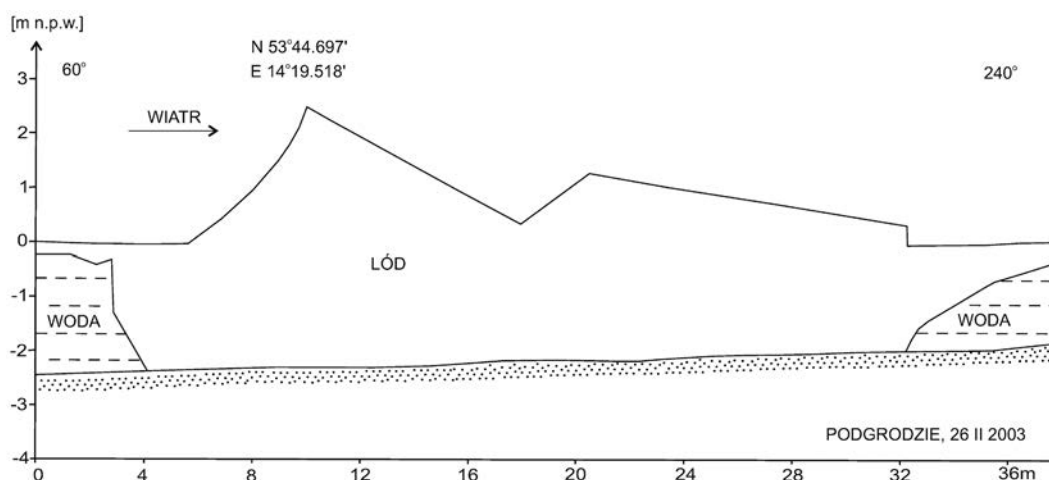
Zwały lodowe pojawiają się też na mieliznach, z dala od brzegu. Na rys. 5 pokazano zwał lodowy na Wysoku Warpieńskim w rejonie Podgrodzia (Zalew Szczeciński) na głębokości około 2 m i około 0,9 km od brzegu w dniu 26 lutego 2003 roku. Wysokość tego zwału wynosiła 2,5 m n.p.w. i 4,8 m n.p.g. Od strony ENE (60°) widoczne jest wklęsłe zbocze podwietrzne o wzrastającym nachyleniu ku wierzchołkowi zwału. Średnie nachylenie tego zbocza to 29° . Natomiast zbocze zawietrzne o długości 8,5 m charakteryzowało się jednolitym nachyleniem (15°). Szerokość zwału wynosiła 12 m, a wraz z pozostałymi postaciami osiadłego lodu – 28 m. Taki spiętrzony i osiadły lód na mieliznach może się rozciągać na odległość nawet 100 m



Rys. 3. Przekrój poprzeczny zwału lodowego w północno-zachodniej części Półwyspu Rów (Zalew Szczeciński, 8 II 2011 r.)



Rys. 4. Zbocze podwietrzne zwału lodowego w północno-zachodniej części Półwyspu Rów (Zalew Szczeciński, 8 II 2011 r.)



Rys. 5. Przekrój poprzeczny zwału lodowego wraz z lodem spiętrzone po stronie zawietrznej na Zalewie Szczecińskim (Podgrodzie, 26 II 2003 roku)

(rys. 6). Na rys. 6 u góry po prawej stronie pokazano zawietrzną stronę zwału lodowego usytuowanego na mieliźnie – Wysokoku Krzeckim (Zalew Szczeciński). W środkowej części tego rysunku widoczny jest wał lodu stłoczonego. Te spiętrzone formy lodowe były osadzone na gruncie na dużych przestrzeniach.

Wzdłuż strefy brzegowej może pojawić się kilka równoległych do brzegu ciągów grzbietów zwałów lodowych. Na rys. 7 przedstawiono trzy wyraźne grzbiety zwałów lodowych w Tolkmicku (Zalew Wiślan) w dniu 25 lutego 2017 roku. Wysokość tych grzbietów wzrastała w kierunku południowym (195° , w kierunku łądu). Pierwszy grzbiet od strony zalewu miał wysokość około 1,5 m n.p.w., drugi 2 m n.p.w., a trzeci miał wysokość 3,4 m n.p.w. i 3,6 m n.p.g. Od strony zalewu (15°) widoczne są wklęsłe zbocza podwietrzne o wzrastającym nachyleniu w kierunku wierzchołka. Natomiast zbocze zawietrzne charakteryzowało się jednolitym nachyleniem (25°) o długości 8 m. Szerokość dwóch najwyższych grzbietów wynosiła 19 m, a łącznie z trzecim – około 27 m. Natomiast wraz z lodem osiadłym strefa tych spiętrzeń lodowych rozciągała się na szerokości przynajmniej kilkudziesięciu metrów (rys. 8). Na rys. 8 pokazano podwietrzne strony zwałów lodowych w strefie brzegowej w rejonie Tolkmicka (Zalew Wiślan). Widoczne są też wzrastające w kierunku łądu wysokości grzbietów zwałów lodowych.

Zbocza podwietrzne zwałów lodowych są przeważnie wklęsłe o wzrastającym nachyleniu ku wierzchołkowi. Występują też

wyjątki zwałów charakteryzujące się nieznacznie wypukłymi zboczami podwietrznymi, czy nieznacznie wklęsłymi lub wypukłymi zboczami zawietrznymi. Na rys. 9 przedstawiono zwał lodowy na brzegu Zalewu Wiślanego w rejonie Fromborka w dniu 11 lutego 2011 roku. Zbocze podwietrzne tego zwału o długości 9 m i o nachyleniu 30° było nieznacznie wypukłe, natomiast zbocze zawietrzne – nieznacznie wklęsłe. Długość zbocza zawietrznego wynosiła 6,5 m, o dość dużym nachyleniu – 41° . Wysokość zwału to 4,4 m n.p.w. i 4,3 m n.p.g. Szerokość zwału na kierunku od zachodu na wschód (280° - 100°) wynosiła 12 m.

W celu poznania charakterystycznych wymiarów (parametrów) zwałów lodowych przeanalizowano ich wartości średnie i ekstremalne dotyczące 22 przypadków, łącznie dla Zalewu Szczecińskiego i Zalewu Wiślanego oraz oddzielnie dla tych akwenów. Wyszczególniono 7 parametrów zwału: wysokość nad poziomem wody, wysokość nad powierzchnią gruntu, szerokość, długość zbocza zawietrznego i podwietrznego oraz nachylenia ich zboczy (tabl. 1).

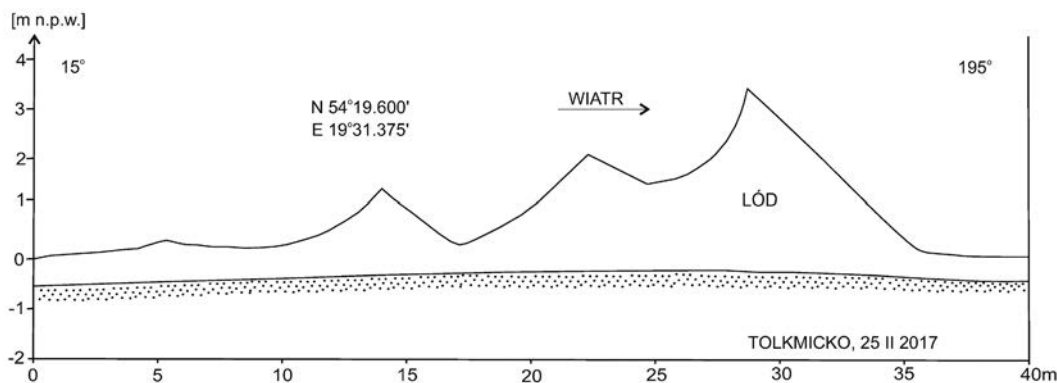
Analizując dane tych dwóch akwenów można stwierdzić, że wysokość badanych zwałów lodowych zawierała się w przedziale od 1,4 m do 5,8 m n.p.w. i od 1,2 m do 7,4 m n.p.g., o średnich wysokościach odpowiednio 2,9 m n.p.w. i 3,4 m n.p.g. Większe zróżnicowanie wysokości zwałów nad powierzchnią gruntu wynikało stąd, że występowały one zarówno na lądzie jak, i na wodzie (na mieliżnach). Zwały uformowane na wodzie szybciej topnieją i obniżają się niż na lądzie. Stąd różnice wysokości zwałów związane z miejscem występowania (woda, ląd) będą zależne także od czasu zalegania zwału i momentu, w którym dokonano pomiaru. To będzie miało również wpływ na wartości pozostałych parametrów.

Długość zbocza zawietrznego zawierała się w przedziale od 1,5 m do 10,5 m, o wartości średniej 6 m. Natomiast długość zbocza podwietrznego była wyraźnie dłuższa – od 5 m do 23 m, a średnia – 10,7 m. Większa długość zbocza podwietrznego spowodowana była nawarstwieniami tafli lodowych o mniejszym nachyleniu w początkowej części zwału.

Zróżnicowane były też stopnie nachylenia zboczy: podwietrznego i zawietrznego. Bardziej nachylone były zbocza zawietrzne i zawierały się w granicach od 11° do 41° o średnim nachyleniu 28° . O stopniu nachylenia tych zboczy decydowały głównie rozmiary usypującego się gruzu lodowego podczas zwałowania lodu. Natomiast zbocze podwietrzne charakteryzuje się przeważnie mniejszym nachyleniem w granicach od 7° do 30° – średnio 19° . Należy tu zaznaczyć, że nachylenie tego zbo-



Rys. 6. Zawietrzna strona zwału lodowego. Na pierwszym planie wał lodu spiętrzonego na Zalewie Szczecińskim (Podgrodzie, 11 II 2003 roku)



Rys. 7. Przekrój poprzeczny trzech zwałów lodowych w strefie brzegowej Zalewu Wiślanego (Tolkmicko, 25 II 2017 roku)



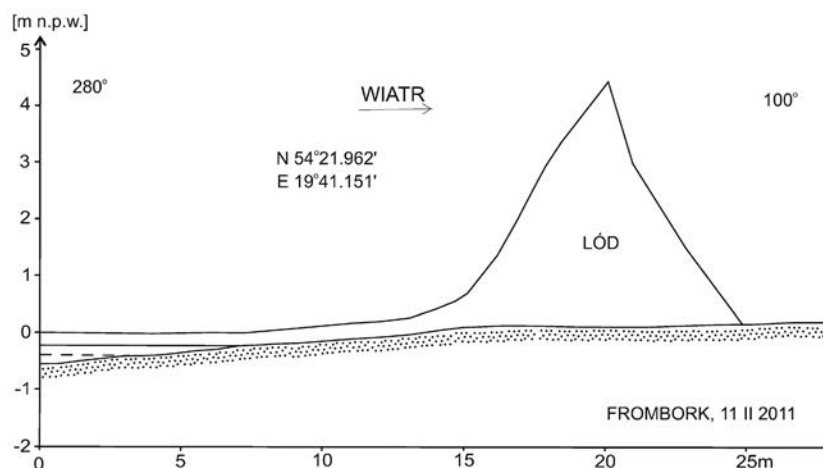
Rys. 8. Podwietrzne zbocza zwałów lodowych w strefie brzegowej Zalewu Wiślanego (Tolkmicko, 25 II 2017 roku)

cza, zbudowane przeważnie z tafli lodowych, nie jest jednolite. Najmniejsze jest ono u podstawy zwału i zwiększa się ku jego wierzchołkowi, często z wysuniętą pionowo, a niekiedy przechylającą się w kierunku podwietrznego tafli lodową (rys. 10 i 11). Na rys. 10 pokazano wysuniętą do góry w części wierz-

chołkowej zwału i oblamującą się po stronie podwietrznej tafle lodową u południowo-zachodnich brzegów Zalewu Wiślanego (Tolkmicko). Z kolei na rys. 11 przedstawiono wierzchołkową część zwału lodowego w rejonie Fromborka. Po prawej stronie tego rysunku widoczny jest fragment wzrastającego zbocza podwietrznego, a po lewej stronie (od strony lądu) – część zbocza zawietrznego.

Porównując średnie wymiary (parametry) zwałów lodowych Zalewu Szczecińskiego i Zalewu Wiślanego można zauważyć, że parametry te są podobne (tabl. 1). Na uwagę zasługują różnice dotyczące wysokości zwałów nad poziomem wody (0,7 m) oraz nachylenia zboczy zawietrznych ($9,4^\circ$). Większa wysokość zwałów lodowych na Zalewie Wiślanym wynika z dysponowania dla tego akwenu przypadków dotyczących przeważnie wysokich zwałów. Wysokie zwały lodowe zbudowane były tam z grubszyz gruzu lodowego (średnia 14,2 cm), stąd prawdopodobnie także większe było nachylenie zbocza zawietrznego (tabl. 1).

Należy zaznaczyć, że analizowane zwały powstały w wyniku silnego wiatru, przeważnie podczas występowania porywów czy szkwałów o kierunkach doładowych. Czas tworzenia się zwałów był dość krótki i determinowany zwykle czasem trwania porywów lub szkwałów.



Rys. 9. Przekrój poprzeczny zwału lodowego na brzegu Zalewu Wiślanego (Frombork, 11 II 2011 roku)



Rys. 10. Wysunięta do góry tafli lodowa w części wierzchołkowej zwału na Zalewie Wiślanym (Tolkmicko, 25 II 2017 roku)



Rys. 11. Wierzchołek zwału z widoczną stroną podwietrzną (po prawej) i zawietrzną (po lewej) na Zalewie Wiślanym (Frombork, 16 III 2011 roku)

**Tabl. 2. Współczynniki korelacji Pearsona (R)
między wymiarami (parametrami) zwału lodowego na Zalewie Szczecińskim i Zalewie Wiślanym (1995-2017)**

Wymiary (parametry) zwału lodowego	Wysokość zwału H [m]	Wysokość zwału H_g [m]	Długość zbocza za- wietrznego $[m]$	Długość zbocza pod- wietrznego D [m]	Szerokość zwału S [m]	Nachylenie zbocza za- wietrznego $[\circ]$	Nachylenie zbocza pod- wietrznego $[\circ]$	Grubość lodu h [cm]
Wysokość zwału H [m]	1	0,89 ³	0,66 ³	0,55 ²	0,58 ²	0,50 ¹	0,28	0,74 ³
Wysokość zwału H_g [m]	0,89 ³	1	0,62 ²	0,37	0,47 ¹	0,40	0,43 ¹	0,62 ²
Długość zbocza zawietrznego [m]	0,66 ³	0,62 ²	1	0,72 ³	0,85 ³	-0,27	-0,13	0,73 ³
Długość zbocza podwietrznego D [m]	0,55 ²	0,37	0,72 ³	1	0,96 ³	-0,15	-0,59 ²	0,45 ¹
Szerokość zwału S [m]	0,58 ²	0,47 ¹	0,85 ³	0,96 ³	1	-0,27	-0,52 ¹	0,51 ¹
Nachylenie zbocza zawietrznego $[\circ]$	0,50 ¹	0,40	-0,27	-0,15	-0,27	1	0,53 ¹	0,14
Nachylenie zbocza podwietrznego $[\circ]$	0,28	0,43 ¹	-0,13	-0,59 ²	-0,52 ¹	0,53 ¹	1	0,21
Grubość lodu h [cm]	0,74 ³	0,62 ²	0,73 ³	0,45 ¹	0,51 ¹	0,14	0,21	1

^{1/} istotność na poziomie $\alpha = 0,05$

^{2/} istotność na poziomie $\alpha = 0,01$

^{3/} istotność na poziomie $\alpha = 0,001$

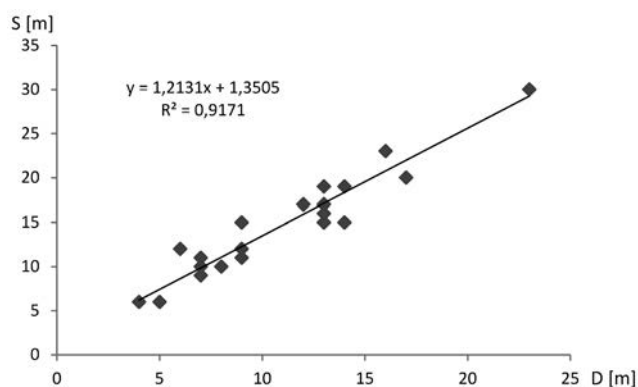
ZWIĄZKI MIĘDZY PARAMETRAMI ZWAŁU LODOWEGO

Związki korelacyjne między wymiarami (parametrami) zwału lodowego są bardzo zróżnicowane, poczynawszy od korelacji słabej ($0,1 \leq R < 0,3$), przeciętnej ($0,3 \leq R < 0,5$), wysokiej ($0,5 \leq R < 0,7$), bardzo wysokiej ($0,7 \leq R < 0,9$), a kończąc na prawie pełnej ($0,9 \leq R < 1$; tabl. 2). Korelacja prawie pełna ($0,96$) zachodzi między szerokością zwału i długością jego zbocza podwietrznego. Jak wskazuje współczynnik determinacji ($R^2 \cdot 100\%$), zmienność szerokości zwału lodowego jest w 92% wyjaśniona zmiennością długości jego zbocza podwietrznego. Natomiast jak wynika ze współczynnika regresji (a), wzrost długości zbocza podwietrznego o 1 m spowoduje wzrost szerokości zwału lodowego średnio o 1,2 m (rys. 12).

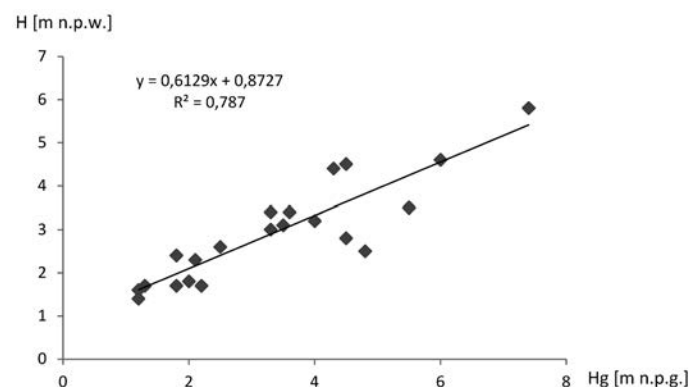
Korelacja bardzo wysoka ($0,85$) jest również między szerokością zwału i długością zbocza zawietrznego. Jest to oczywiste, bo szerokość zwału rozciąga się między początkiem zbocza podwietrznego i końcem zbocza zawietrznego.

Bardzo wysoka korelacja ($0,89$) występuje też między wysokościami zwału nad poziomem wody i nad powierzchnią gruntu. Zmienność wysokości zwału lodowego nad poziomem wody w 79% wyjaśniana jest zmiennością wysokości zwału nad powierzchnią gruntu. Wzrost wysokości zwału nad powierzchnią gruntu o 1 m przejawia się wzrostem wysokości zwału nad poziomem wody średnio o 0,6 m (rys. 13). Nieco słabiej korelują między sobą długości jego zboczy – podwietrznego i zawietrznego ($0,72$). Podobny związek zachodzi między wysokością zwału nad poziomem wody i grubością lodu ($0,74$), z którego został zbudowany. Związki te są istotne statystycznie nawet na poziomie $\alpha = 0,001$ ($0,1\%$ ryzyka błędu, tabl. 2).

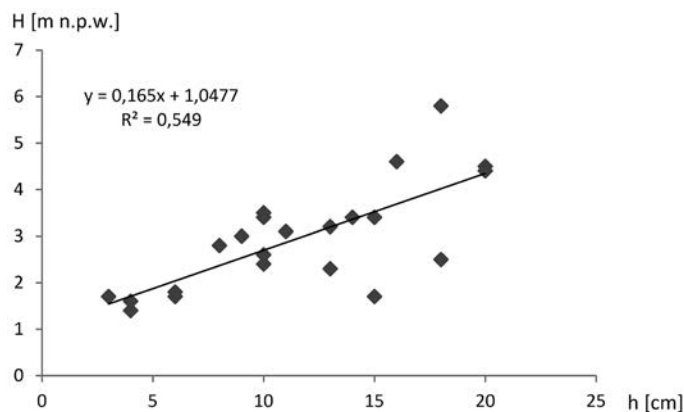
Należy zaznaczyć, że grubość lodu ma wpływ na niektóre parametry zwału lodowego. Od grubości lodu istotnie statystycznie zależy: długość zbocza podwietrznego ($R = 0,45$) i zawietrznego ($R = 0,73$), szerokość zwału ($R = 0,51$) oraz wysokość zwału nad powierzchnią gruntu ($R = 0,62$) i wysokość nad poziomem wody ($R = 0,74$). Zmienność wysokości zwału lodowego nad poziomem wody w 55% wytłumaczona jest zmiennością



Rys. 12. Związek regresji liniowej między szerokością zwału (S) i długością zbocza podwietrznego (D) na zalewach przymorskich (1995-2017)



Rys. 13. Związek regresji liniowej między wysokościami zwału: nad poziomem wody (H) i nad powierzchnią gruntu (H_g) na zalewach przymorskich (1995-2017)



Rys. 14. Związek regresji liniowej między wysokością zwału nad poziomem wody (H) i grubością lodu (h) na zalewach przymorskich (1995-2017)

ścią grubości lodu. Wzrost grubości lodu o 1 cm wywoła wzrost wysokości zwału średnio o 0,16 m (rys. 14).

Słabe i przeważnie nieistotne statystycznie są związki parametrów zwału ze zboczami zwału, zwłaszcza ze zboczem zawietrznym (tabl. 2).

Analizowano również związki wykonane dla samego Zalewu Szczecińskiego. Związki te między szerokością zwału (S) i długością zbocza podwietrznego (D), następnie między wysokościami zwału: nad poziomem wody (H) i nad powierzchnią gruntu (H_g) oraz między wysokością zwału nad poziomem wody (H) i grubością lodu (h) mają odpowiednio postać:

$$y(S) = 1,1852x(D) + 1,856; R^2 = 0,912,$$

$$y(H) = 0,5668x(H_g) + 0,902; R^2 = 0,825 \text{ i}$$

$$y(H) = 0,1595x(h) + 1,075; R^2 = 0,434.$$

Związki te są podobne do związków przedstawionych łącznie dla Zalewu Szczecińskiego i Zalewu Wiślanego (rys. 12 ÷ 14). Różnice między nimi mogą wynikać głównie z tego, że dla Zalewu Wiślanego dysponowano danymi charakteryzującymi się stosunkowo wysokimi zwałami lodowymi oraz małą liczbą przypadków.

UWAGI KOŃCOWE

Na zalewach przymorskich południowego Bałtyku dominującym rodzajem lodu jest stała pokrywa lodowa. Jest to lód tworzący się głównie z narastania grubości szkła lodowego, równomiernie narosły, spoisty, gładki i o dużej wytrzymałości. Takie pokrywy lodowe, nawet cienkie, niełatwo ulegają rozpadowi, nawarstwiają się na długich odcinkach, nasuwają się na brzeg i mogą ulegać zwałowaniu, formując stosunkowo wysokie spiętrzenia lodowe (zwały lodowe).

Stosunkowo wysokie zwały lodowe w porównaniu do innych spiętrzeń (np. lód stłoczony, wały lodowe, wały śryżowe) formują się na skutek stosunkowo łatwej możliwości nasuwania się tych wytrzymałych pól lodowych (tafli lodowych) po zboczu podwietrznym i obłamywaniu się ich pod własnym ciężarem na gruz lodowy dopiero po stronie zawietrznej zwału. Usypujący się tam gruz lodowy zsuwa się po zboczu, jego nachylenie staje się jednolite i jest zgodne z kątem naturalnego usypu gruzu lodowego.

W wyniku takiego procesu zwałowania lodu zbocze podwietrzne zwału z upływem czasu staje się przeważnie wklęsłe. Im bliżej wierzchołka zwału, tym wzrasta nachylenie tego zbocza. Często tafle lodowe przyjmują pionowe położenie, a niekiedy przechylają się w kierunku odwrotnym (w kierunku zalewu) i tam się obłamują pod własnym ciężarem. Przy takim pełnym procesie zwałowania nachylenie zbocza podwietrznego staje się podobne do nachylenia zbocza zawietrznego i również jest określone kątem naturalnego usypu gruzu lodowego.

Na zalewach przymorskich zwały lodowe charakteryzują się dość zróżnicowanymi wymiarami (parametrami). Na podstawie analizy 22 przypadków zwałów lodowych wysokość zwału nad poziomem wody zmienia się w granicach od 1,4 m do 5,8 m, o wartości średniej około 3 m. Nieco wyższe są te zwały występujące na wodzie (na mieliźnie) mierzone od gruntu – średnio około 3,5 m. Natomiast średnia szerokość zwału to około 14 m, długość zboczy: podwietrznego około 11 m i zbocza zawietrznego 6 m, a nachylenie tych zboczy to odpowiednio 19° i 28° . Dłuższe zbocze podwietrzne i mniejsze ich nachylenie spowodowane było dłuższymi nawarstwieniami tafli lodowych o mniejszym nachyleniu na początku zwału. Natomiast zbocza zawietrzne były zbudowane z gruzu lodowego, przeważnie o jednolitym nachyleniu.

Wysokie zwały lodowe świadczą o tym, że były one zbudowane z lodu o stosunkowo dużej grubości. Świadczy też to o tym, że musiał występować silny wiatr, który wywołał ruch kry lodowej o stosunkowo dużej grubości. Bowiem im grubszy lód, tym niezbędna jest większa siła wiatru, aby wywołać zwałowanie lodu [4].

Między wymiarami (parametrami) zwału lodowego zachodzą dość istotne statystycznie związki. Wynika to z dość dużego podobieństwa topografii poszczególnych zwałów. Ze wzrostem wysokości zwału n.p.w.: zwiększa się szerokość zwału ($R = 0,58$), wydłużają się zbocza – podwietrzne ($R = 0,55$) i zawietrzne ($R = 0,66$) oraz zwiększają się nachylenia zboczy, zwłaszcza zbocza zawietrznego ($R = 0,50$). Podobnie, ze wzrostem szerokości zwału: wydłużają się zbocza – podwietrzne ($R = 0,96$) i zawietrzne ($R = 0,85$), natomiast zmniejszają się nachylenia zboczy, zwłaszcza zbocza podwietrznego ($R = -0,52$).

Należy zaznaczyć, że z upływem czasu zmieniają się wymiary (parametry) zwału lodowego, nie tylko wskutek ablacji, ale też kompresji lodu. Przede wszystkim zmienia się wysokość, długość zboczy i szerokość zwału. Najszybciej zanikają te zwały, które są usytuowane na mieliżnach, głównie w wyniku intensywnego topnienia lodu w części przydennej oraz abrazyjnego oddziaływania ruchów wód, zwłaszcza falowania. Później zwał lodowy zanika na brzegu, głównie erodowany od strony podwietrznej, a najpóźniej – uformowany na lądzie.

LITERATURA

1. Alestalo J. and Häikiö J.: Ice features and ice-thrust shore forms at Luodonselkä, Gulf of Bothnia in winter 1972/73. Fennia 144, Helsinki 1976.
2. Christensen F. T.: Ice ride-up and pile-up on shores and coastal structures. Journal of Coastal Research 10 (3), 1994.
3. Correns M.: Eisverhältnisse des Peenestrom-Haffgebietes – ein Beitrag zur Hydrographie der Gewässer an der Südlichen Ostseeküste. Petermanns Geographische Mitteilungen 117(4), 1973.

4. Girjatowicz J. P.: Ice thrusting and hummocking on the shores of the Southern Baltic sea's coastal lagoons. *Journal of Coastal Research* 30 (3), 2014.
5. Girjatowicz J. P.: Forms of grease ice ridge on the south coast of the Baltic Sea. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 45 (3), 2016.
6. Girjatowicz J. P.: Forms of ice hummocks in the coastal lagoons of the Southern Baltic Sea. Manuscript. Pracownia Hydrologii i Gospodarki Wodnej, Uniwersytet Szczeciński, 2018.
7. Greń. J.: Statystyka matematyczna modele i zadania. PWN, Warszawa, 1976.
8. Keinonen A.: The shape and size of ice ridges in the Baltic according to measurements and calculations. Styrelsen för Vintersjöfartsforskning (Winter Navigation Research Board). Research Report, 17, Helsinki, 1976.
9. Kovacs A. and Sodhi D.S.: Shore ice pile-up and ride-up: Field observations, models, theoretical analyses. *Cold Regions Science and Technology*, 2, 1980.
10. Kraus E.: Über Eisschubberge. III Hydrologische Konferenz der Baltischen Staaten, Warschau, 1930.
11. Leppäranta M.: Ice thickness mapping in the Baltic Sea. *Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis*, 84, 1999.
12. Lutkovskij S.V.: Obrazovanie l'da v ozerach, rekach i morjach. Izdatel'stvo Akademii Nauk SSSR, Moskva 1957.
13. Łomnicki A.: Wprowadzenie do statystyki dla przyrodników. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2014.
14. Maliński J.: Zlodzenie Zalewu Szczecińskiego i wód przyległych. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1971.
15. Orviku K., Jaagus J. and Tõnisson H.: Sea ice shaping the shores. *Journal of Coastal Research, Special Issue* 64, 2011.
16. Szeffler K.: Zlodzenie. [W:] Zatoka Pucka. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk, 1993.
17. Zakrzewski W.: Geneza powstawania spiętrzeń lodowych w Zatoce Puckiej. *Studia i Materiały Oceanologiczne* Nr 27, 1979.
18. Zorina V. A.: Metod prognoza vesennykh ledovykh javlenij v Kurskom i Vislinskom Zalivach. Trudy GOIN 86, Leningrad, 1965.