

PRÓBA IDENTYFIKACJI ZASIĘGU ODDZIAŁYWANIA LODOWCA GÓRSKIEGO NA TEMPERATURĘ POWIETRZA – NA PRZYKŁADZIE LODOWCA ENGABREEN (NORWEGIA)

WIKTORIA DYSZY*, ZOFIA GRAJEK**

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych
i Geologicznych, ul. B. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań
*ORCID: 0000-0003-0594-1515, **ORCID: 0000-0002-9452-3341

Abstract: *An attempt to identify the extent of mountain glacier effects on air temperature, an example of the Engabreen Glacier (Norway).* This study aims to identify the extent of mountain glacier influence on air temperature in the vertical profile, using the Engabreen glacier (Norway) as an example. An important aspect of the work is also an analysis of the variation in surface temperature and wind conditions in the valley of the Engabreen glacier. The analysis was carried out based on measurement data of vertical air temperature taken over the glacier cavity with sensors mounted to an unmanned aerial vehicle. The field survey was carried out on 25 July 2022 in the afternoon. The results of the measurements may indicate that the presence of the glacier reduces the air temperature gradient with altitude compared to the surrounding areas. Above the glacier, the air temperature in the vertical profile increases with height. Based on the profiles taken above the glacier, it was concluded that the surface of the glacier influences the air temperature above it up to an altitude of 37–53 m above ground level.

Keywords: air temperature, vertical profile, Engabreen, glacier, UAV

WSTĘP

Badania nad lodowcami góorskimi są ważnym źródłem informacji ze względu na ich wrażliwość względem postępujących zmian klimatu. Zmiany w systemie klimatycznym wpływają na modyfikacje masy i zasięgu lodowców. Lodowce są ważnym elementem środowiska między innymi ze względu na ich oddziaływanie na lokalne warunki meteorologiczne. Najistotniejszy wpływ wywiera najwyższej położona akumulacyjna część lodowca, gdzie jego powierzchnia jest największa. Szacuje się, że średnia roczna temperatura powietrza obszarów sąsiadujących z najwyższą częścią lodowca ulega obniżeniu o 3°C względem obszarów sąsiadujących. W dolnej części lodowca, czyli tam, gdzie występuje jezioro lodowcowe, obniżenie temperatury powietrza jest mniejsze niż w części akumulacyjnej i wynosi 0,7°C (Trepińska 2002).

Temperatura powietrza przy powierzchni jest najważniejszym czynnikiem kontrolującym wymianę energii i tempo topnienia śniegu lub lodu (Petersen i in. 2013). Z tego względu wykorzystywana jest jako główna zmienna wejściowa w wielu modelach do przewidywania kierunku i wielkości zmian topnienia

lodowców. Temperatura powietrza używana jest również jako zmienna do obliczeń między innymi przychodzącego promieniowania długofalowego, ciepła jawnego oraz wilgotności powietrza (Bravo i in. 2018 za: Ebrahimi i Marshall 2016).

Temperatura powietrza nad powierzchnią lodowca może również być wykorzystana do rozróżnienia obszarów, na których opad atmosferyczny pojawia się w postaci śniegu lub deszczu (Bravo i in. 2018 za: Minder i in. 2010). Badania dotyczące temperatury powierzchni lodowców przeprowadzali między innymi: Aubry-Wake i in. (2015), Carturan i in. (2015), Bravo i in. (2018).

Wadami badań powierzchni lodowców górskich jest ich niestabilna powierzchnia. Szybkość topnienia lodu może wynosić od 5 do 10 m w ciągu lata, co utrudnia dostęp do stabilnych struktur niezbędnych do montażu instrumentów, które pozwoliłyby na uzyskanie wysokiej jakości danych (Oerlemans i Grisogono 2002). W niektórych badaniach wykorzystywane są dane z punktów pomiarowych poza lodowcem (Shea i Moore 2010), jednak jak wskazują Carturan i in. (2015) oraz Shaw i in. (2017), są one nieprzydatne w celu oszacowania temperatur powietrza przy powierzchni lodowca. Wynika to z faktu, że punkty pomiarowe znajdują się poza zasięgiem wpływu warstwy granicznej lodowca i podlegają wpływom lokalnych warunków topograficznych, na przykład takich jak zacienienie.

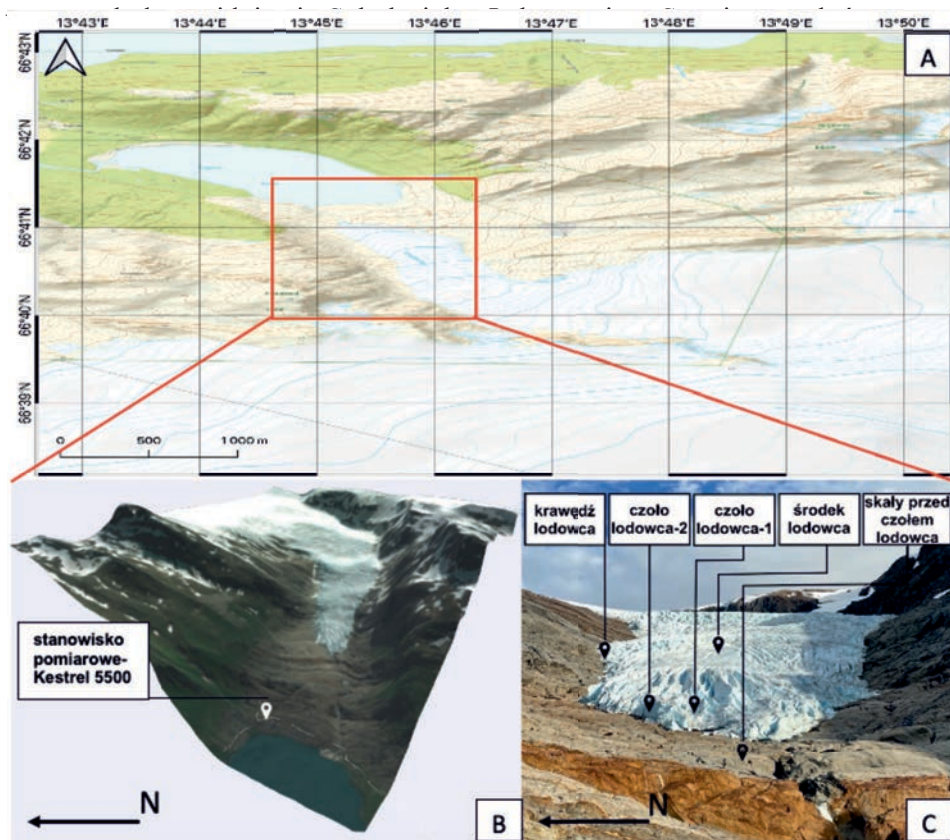
W celu pozyskania informacji o pionowej strukturze warstwy granicznej lodowca podjęte zostały próby z wykorzystaniem balonów linowych i radiosond. Badania te dostarczały informacji o zmianie temperatury powietrza oraz prędkości i kierunku wiatru wraz ze wzrostem wysokości nad powierzchnią lodowca (Oerlemans i in. 1999; Oerlemans i Grisogono 2002).

Lodowiec Engabreen (północna Norwegia), na którego obszarze prowadzono badania w ramach niniejszej pracy, jest stale monitorowany przez Norweską Dyрекcję Zasobów Wodnych i Energii i znajdujące się tam Subglacjalne Laboratorium Svartisen. Opracowania dotyczące lodowca Engabreen obejmują raporty między innymi o zmianach masy lodowca czy lokalnego klimatu (Andreassen i in. 2006). Prowadzono również badania sub- i supraglacjalne dotyczące modelowania przepływu lodu i warunków panujących na dnie lodowca Engabreen (Solgaard i in. 2018).

Główny cel pracy stanowiła próba identyfikacji zasięgu oddziaływania lodowca górskiego na temperaturę powietrza w profilu pionowym. Ważnym aspektem pracy była analiza zróżnicowania temperatury powierzchni oraz warunków wiatrowych w dolinie lodowca Engabreen.

Obszar badań

Badania wpływu lodowca na temperaturę powietrza przeprowadzono nad jeziorem lodowca Svartisen – Engabreen (66°40'N, 13°45'E) (ryc. 1). Lodowiec Svartisen położony jest w północnej Norwegii obok Holandsfjorden (fiord) i jest drugim największym lodowcem w kontynentalnej Norwegii. Pod 200-metrową



Ryc. 1. Obszar badawczy (A – mapa topograficzna badanego obszaru, B – numeryczny model terenu / wykorzystano 2-krotne przewyższenie, C – miejsca wykonywania lotów dronem)

Fig. 1. Study area (A – topographic map of the study area, B – numerical terrain model / used 2-fold elevation, C – drone flight sites)

Źródło/Source: 1.A – statkart.no; 1.B – elevationapi.com.

warstwą lodu znajduje się Subglacjalne Laboratorium Svartisen, w którym wykonuje się pomiary paramentów subglacjalnych (www.nve.no). Jezor lodowcowy Engabreen cechuje się dobrą dostępnością, ponieważ rozciąga się niemalże do poziomu morza. Jezor lodowcowy znajduje się poza Parkiem Narodowym Saltfjellet–Svartisen, co umożliwiło przeprowadzenie nalotów dronem bez pozwolenia. Wybrany obszar badawczy został wskazany przez pracowników Parku Narodowego Saltfjellet–Svartisen jako dogodne miejsce do przeprowadzenia badań o tym charakterze. W 2018 r. jezor lodowcowy Engabreen zajmował 34,42 km², natomiast w 1968 – 38,02 km². W 2021 r. lodowiec cofnął się o niemal 2,5 km względem początku XX w. (glacier.nve.no). Zmniejszająca się powierzchnia, masa i długość lodowca związane są z globalnym wzrostem temperatury powietrza (globalne ocieplenie). Średnia roczna temperatura powietrza mierzona jest

na dwóch stacjach meteorologicznych wokół jezora lodowca i wynosi około $5,5^{\circ}\text{C}$ na stacji przy jeziorze oraz $-3,6^{\circ}\text{C}$ na stacji położonej w zachodniej części Svartisen na nunataku (1364 m n.p.m.) (Solgaard i in. 2018). Jezor lodowcowy Engabreen położony jest w dolinie, którą otaczają wzniesienia o wysokości około 1 km. Wzniesienia w obszarze, gdzie wykonywane były badania, nie są porośnięte roślinnością (ryc. 1C). Engabreen położony jest głównie na gnejsach i łupkach (Cohen i in. 2005) (ryc. 1C).

Materiał źródłowy i metody badań

W okresie letnim najsilniej widoczny jest oziębiający wpływ lodowca ze względu na kontrast pomiędzy podłożem zlodowaconym a niezlodowaconym (Trepńska 2002). Z tego względu badania terenowe lodowca Engabreen odbywały się 25 lipca 2022 roku.

Pomiary temperatury powietrza zostały wykonane za pomocą czujników zamontowanych do bezzałogowego statku powietrznego, zwanego w dalszej części opracowania „dronem”. Pomiary temperatury powietrza wraz ze wzrostem wysokości zostały wykonane nad powierzchnią lodowca Engabreen. Wykonano dwa pomiary nad jego czołem (profil I, II – tab. 1) oraz dwa pomiary w środkowej części (profil III, IV – tab. 1) około 400 m od czoła w górę lodowca (ryc. 1C). Dodatkowo wykonano pomiar porównawczy nad powierzchnią skał oznaczony jako V (tab. 1, ryc. 1C). Punkty pomiarowe wybrano ze względu na łatwość dostępu oraz możliwość bezpiecznego startu i lądowania dronem.

Tab. 1. Podstawowe informacje o profilach pionowych

Tab. 1. Basic information on vertical profiles

Nr profilu	Miejsce wykonywania pomiaru	Pionowy zasięg pomiaru [m n.p.g.]	Godzina pomiaru (UTC)
I	Nad czołem lodowca – 1	116	16:24–16:28
II	Nad czołem lodowca – 2	180	16:19–16:23
III	Krawędź lodowca	76	15:07–15:10
IV	Środek lodowca	140	15:10–15:11
V	Skały przed czołem lodowca	178	16:32–16:35

Naloty przeprowadzono w dwóch turach. Pierwsza obejmowała pomiary w profilach III i IV, odbywała się ona od godziny 15:07 do 15:11. Druga tura nalotów trwała od godziny 16:19 do 16:35 (tab. 1). Różnica w czasie nalotów wynikała z potrzeby zmiany stanowiska startu i lądowania drona, która w drugiej turze nalotów obejmowała okolice czoła lodowca. Wysokości na ryc. 5 są wysokościami względnymi. Poziomem określonym jako 0 m jest powierzchnia, nad którą zaczęto wykonywać pomiar.

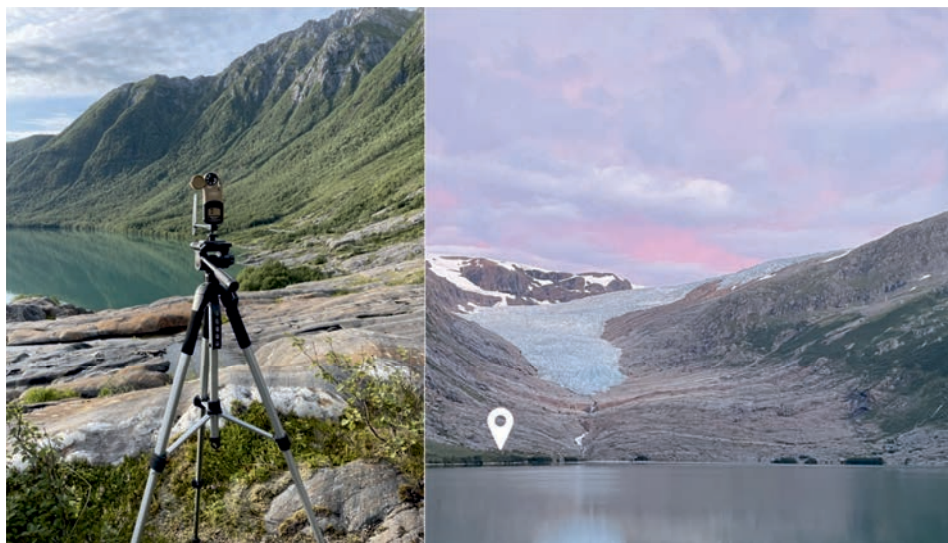
Ze względu na zróżnicowaną częstość wykonywania pomiarów przez czujnik temperatury powietrza dane wymagały interpolacji. Wykorzystano interpolację liniową w celu uzyskania wartości o częstości co 1 m wysokości. Wartość funkcji interpolującej w punkcie z przedziału $[x_i, x_{i+1}]$ obliczono ze wzoru:

$$F(x) = f(x_i) + [f(x_{i+1}) - f(x_i)] / (x_{i+1} - x_i) * (x - x_i),$$

gdzie: x – wysokość n.p.g.

W celu pozyskania temperatury powierzchni w dolinie lodowca Engabreen wykorzystano zdjęcie satelitarne LANDSAT 8 z bazy danych USGS – *United States Geological Survey*. Wybrano zdjęcie z 12.07.2022 r. ze względu na brak zachmurzenia, które umożliwiło odczyt temperatury powierzchni terenu (LST – *Land Surface Temperature*). W celu pozyskania LST ze zdjęcia satelitarnego wykorzystano algorytm automatycznego mapowania temperatury powierzchni Ziemi z wykorzystaniem danych satelitarnych LANDSAT 8 (Avdan i Janovska 2016).

W czasie badań prowadzone były również automatyczne pomiary przez przenośną stację pogodową Kestrel 5500 (ryc. 2). Urządzenie wykonywało pomiary temperatury powietrza, prędkości i kierunku wiatru w dniu 25.07.2022 od 00:00 do 23:40 (UTC) co 20 min. Kestrel 5500 oddalony był 800 m od czoła lodowca. Wykres temperatury powietrza w zależności od kierunku adwekcji wiatru wykonano dla sytuacji bez ciszy, czyli braku ruchu powietrza, gdy prędkość wiatru wynosi od 0-0,2 m/s (Zawiślak 2010).



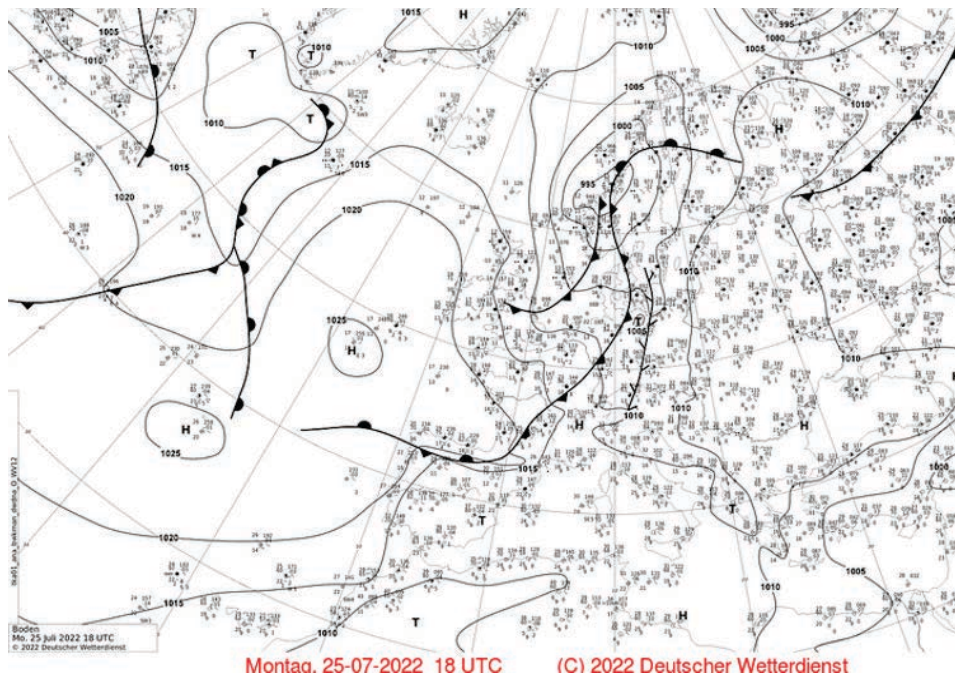
Ryc. 2. Stanowisko pomiarowe przyrządu Kestrel 5500

Fig. 2. Kestrel 5500 measuring stand

Wyniki

Pogoda w czasie wykonywania badań

W dniu 25 lipca 2022 r. w godzinach popołudniowych nad obszarem północnej Norwegii przechodził front ciepły w kierunku północno-zachodnim (ryc. 3). Pogodę nad Europą północną kształtował układ niskiego ciśnienia (995 hPa). Nad badanym obszarem temperatura powietrza w godzinach popołudniowych wyniosła 14–16°C. Wiatr na wysokości 10 m nad obszarem północnej Norwegii wiał z kierunku wschodniego i południowo-wschodniego o prędkości 1–3 m/s. W czasie wykonywania pomiarów, które trwały 1 h 28 min, wielkość zachmurzenia była zmienna. Stwierdzono zachmurzenie umiarkowane, duże lub całkowite (5–8 oktantów). Obserwowano chmury warstwowe, kłębiasto-warstwowe, średnie-warstwowe i średnie-kłębiaste. Wielokrotnie podczas prowadzenia badań dokonano identyfikacji wiatru lodowcowego, czyli wiatru zimnego i porywistego wiejącego od czoła lodowca. „Wiatry takie również zależne są od warunków termicznych. Powietrze silnie oziębione nad lodowcem i jego polem firnowym spływa jako zimne. Wiatr lodowcowy jest to więc spływ stosunkowo cienkiego strumienia powietrza, często ‘zduszonego’ przez wiatr powstający w dolnych partiach doliny” (Trepńska 2002, 108).

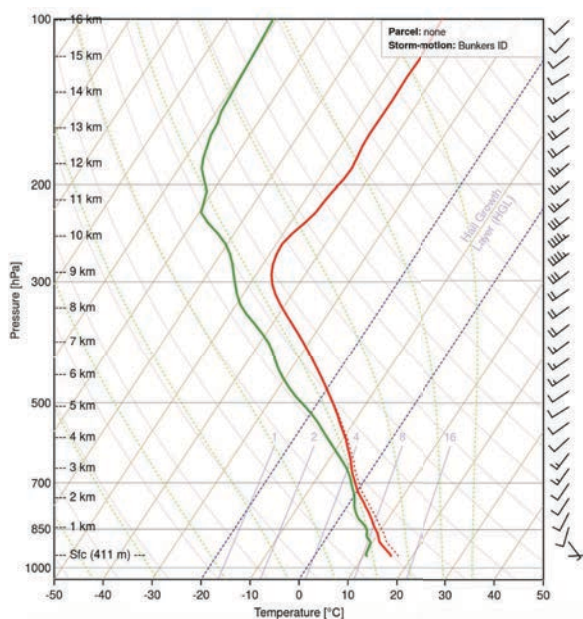


Ryc. 3. Mapa synoptyczna Europy z dnia 25.07.2022 (18:00 UTC)

Fig. 3. Synoptic map of Europe for 25.07.2022 (18:00 UTC)

Źródło/Source: wetter3.de.

Stratyfikacja temperatury powietrza na podstawie danych z reanaliz ERA5 dla lokalizacji (66.75°N 13.75°E) w dniu 25.07.2022 o godzinie 16:00 UTC została przedstawiona na ryc. 4. Naloty dronem w niniejszych badaniach zostały wykonane do wysokości 178 m w profilu za skałami przy czole lodowca. Z diagramu aerologicznego (ryc. 4) można odczytać stratyfikację temperatury powietrza w wyższych poziomach troposfery. Stwierdzono, że do wysokości 9 km temperatura powietrza spadała do górnej granicy troposfery.



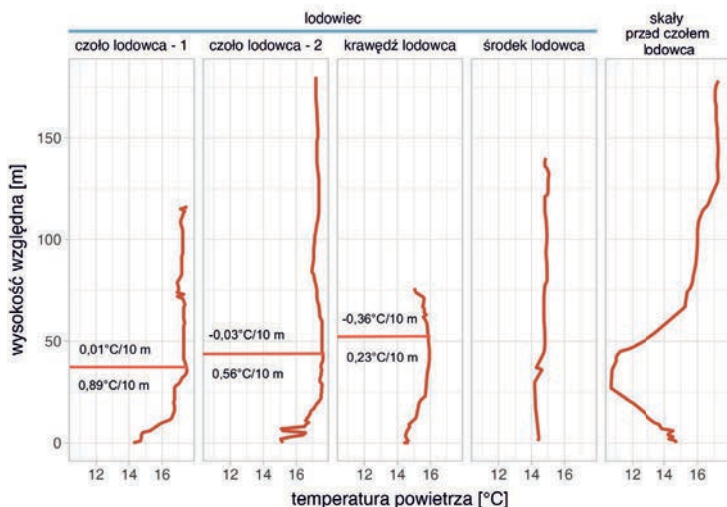
Ryc. 4. Diagram aerologiczny z reanaliz ERA5 z dnia 25.07.2022
 Fig. 4. Aerological diagram from ERA5 reanalysis dated 25.07.2022

Źródło/Source: rawinsonde.com.

Profile pionowe temperatury powietrza

Przebieg temperatury powietrza w profilach pionowych został przedstawiony na ryc. 5. Profile reprezentujące czoło lodowca (profil I, II) i krawędź lodowca (profil III) charakteryzowały się wzrostem temperatury powietrza, a następnie jej stabilizacją wraz ze wzrostem wysokości. Pomarańczowa linia na ryc. 5 wskazuje na wysokość (tab. 2), gdzie zaobserwowano stabilizację temperatury lub zmianę wartości gradientu termicznego. W przypadku profilu II i III gradienty temperatury powietrza powyżej wyznaczonych wysokości (pomarańczowa linia ryc. 5) przyjmowały wartości ujemne, natomiast w profilu I była to wartość dodatnia (0,01°C/10 m). Dla profilu IV, który przedstawiał warunki termiczne

nad środkową częścią lodowca, ze względu na mały zakres zmian temperatur powietrza (temperatura maksymalna 15,05°C, minimalna 14,20°C) nie wskazano wysokości, dla której widoczna byłaby wyraźna zmiana gradientu termicznego. Wyznaczony został gradient obejmujący cały profil – 0,18°C/50 m. Wartość gradientu termicznego profilu IV była najniższa spośród profili wykonanych nad lodowcem. Zaobserwowano, że profile wykonane w górnej i środkowej części jeziora lodowcowego charakteryzowały się mniejszym gradientem temperatury powietrza wraz z wysokością w stosunku do profili wykonanych nad czołem lodowca. Różnica pomiędzy wartością gradientu profilu nad czołem lodowca a tym znajdującym się na jego środku wyniosła 1,22°C /50 m. Pomiar w profilu V, czyli profilu znajdującym się nad skałami, posłużył jako pomiar porównawczy względem pomiarów nad powierzchnią lodowca. Przebieg temperatury powietrza wraz ze wzrostem wysokości jest odmienny w stosunku do pomiarów uzyskanych nad lodowcem, co może być tłumaczone sypływem chłodnego powietrza z nad lodowca. Widoczne jest turbulencyjne mieszanie się mas powietrza blisko powierzchni, wystąpiły tam wahania temperatury powietrza do wysokości około 6 m n.p.g. Zakres zmian temperatury powietrza był największy spośród wszystkich profili (6,56°C), co w porównaniu ze zmianami temperatury powietrza profilu IV (0,86°C) oraz pozostałych profili (tab. 2) wskazywać może, że obecność lodowca wpływa łagodząco na zmianę temperatury wraz ze wzrostem wysokości. Wysokość, na której dochodzi do zmniejszania gradientu i ustabilizowania się temperatury powietrza, wynosi od 37 do 53 m nad powierzchnią lodowca.



Ryc. 5. Temperatura powietrza w poszczególnych profilach pionowych (pomarańczowa linia – wysokość oddziaływania lodowca)

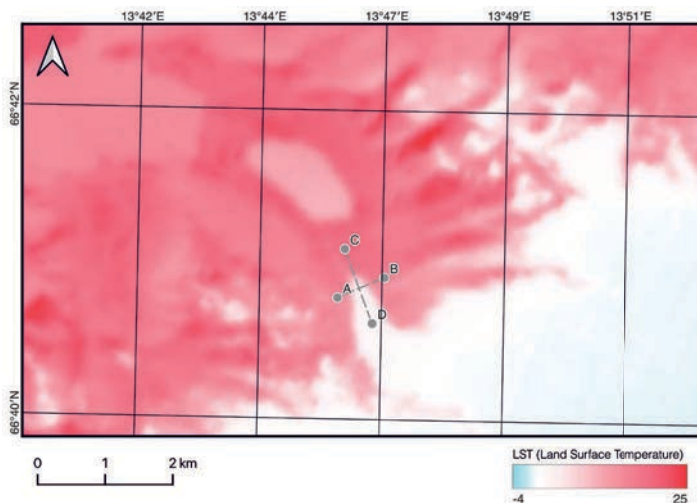
Fig. 5. Air temperature in individual vertical profiles (orange line – glacier influence height)

Tab. 2. Wybrane parametry dotyczące pionowych profili temperatury powietrza
 Tab. 2. Selected parameters for vertical air temperature profiles

Nr profilu	Miejsce wykonywania pomiaru	Zakres oddziaływania lodowca na temperaturę powietrza [m n.p.g.]	Gradient termiczny profilu [°C/50m]	Zakres zmian temperatury powietrza w profilu [°C]
I	Nad czołem lodowca – 1	37	1,40	3,28
II	Nad czołem lodowca – 2	43	0,56	2,56
III	Krawędź lodowca	53	0,20	1,43
IV	Środek lodowca	–	0,18	0,86
V	Skąły przed czołem lodowca	–	0,71	6,56

Temperatura powierzchni ziemi (LST) badanego obszaru

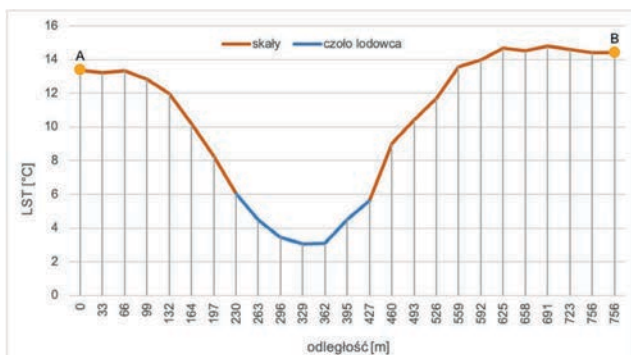
Temperatura powierzchni lodu lodowcowego znacznie różniła się od przyległych terenów (ryc. 6). Temperatura powierzchni lodowca Svartisen była ujemna (niebieski odcień na ryc. 6) i niższa niż powierzchnia jezora Engabreen, którego temperatura powierzchni wyniosła 2–4°C. Wykonano dwa przekroje poziome na powierzchni skał i lodu, tak aby określić różnice w temperaturze terenu tych powierzchni. Przekrój A – B został poprowadzony w taki sposób, aby porównać termikę lodu w obszarze czoła lodowca z temperaturą lodu w głębi jezora na przekroju C – D.



Ryc. 6. Temperatura powierzchni ziemi (LST) z 12.07.2022 (szare przerywane linie wskazują przebieg przekrojów A – B i C – D)

Fig. 6. Land surface temperature (LST) from 12.07.2022 (grey dashed lines indicate cross sections A – B and C – D)

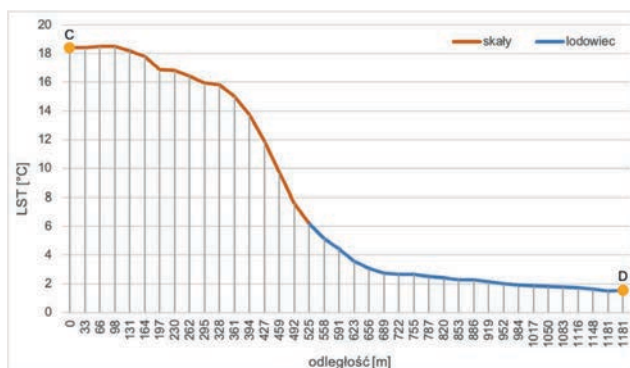
Przekrój A – B rozpoczyna się na powierzchni skał, następnie poprowadzono go na jeziorze lodowcowym Engabreen przy czole i znów na powierzchni skał (ryc. 7). Średnia temperatura powierzchni lodu czoła wyniosła $4,3^{\circ}\text{C}$, w środkowej części jeziora była najniższa ($3,1^{\circ}\text{C}$). Średnia temperatura powierzchni skał wyniosła $12,7^{\circ}\text{C}$. Wraz ze zmniejszaniem odległości od lodowca temperatura powierzchni skał spadała. Skały blisko lodu miały temperaturę $8,6^{\circ}\text{C}$.



Ryc. 7. Przekrój A – B z mapy ryc. 6

Fig. 7. Cross-section A – B from map Fig. 6

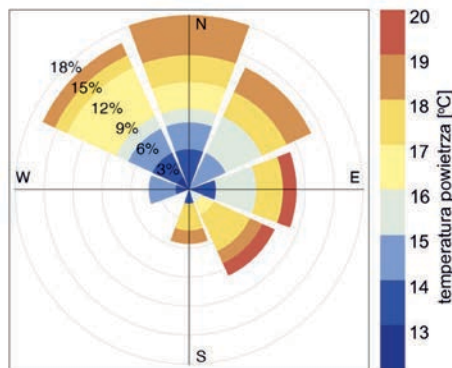
Przekrój C – D rozpoczyna się na powierzchni skał i następnie poprowadzono go na powierzchni jeziora lodowcowego Engabreen (ryc. 8). Średnia temperatura powierzchni lodu wyniosła $2,6^{\circ}\text{C}$, przy czym lód w rejonie czoła lodowca miał znacznie wyższą temperaturę ($4,8^{\circ}\text{C}$) niż lód w dalszej odległości od czoła ($1,8^{\circ}\text{C}$). Stwierdzano spadek temperatury lodu w miarę oddalania się od czoła w górę lodowca. Temperatura czoła lodowca (przekrój A – B) była wyższa około $2,5^{\circ}\text{C}$ niż lód w głębi jeziora (przekrój C – D). Średnia temperatura powierzchni skał wyniosła $15,6^{\circ}\text{C}$. Skały przy czoło lodowca miały temperaturę $9,7^{\circ}\text{C}$. Wraz ze zmniejszaniem odległości od lodowca temperatura powierzchni skał spadała.



Ryc. 8. Przekrój C – D z mapy ryc. 6

Fig. 8. Cross-section C – D from map Fig. 6

nad powierzchnią lodowca, a następnie nad powierzchnią skał (wynika to z układu budowy doliny lodowca). Przypuszcza się, że wiatr lodowcowy, który wieje od lodowca, jest zimny i porywisty, jednak w wyniku przemieszczania się nad powierzchnią skalną, która jest znaczna między stanowiskiem pomiarowym a lodowcem (stanowisko pomiarowe jest położone 800 m od czoła lodowca – ryc. 1A), doszło do znacznego wzrostu temperatury przesuujących się mas powietrza.



Ryc. 10. Zależność temperatury powietrza od kierunku adwekcji mas powietrza w dolinie lodowca Engabreen w dniu 25.07.2022

Fig. 10. Dependence of air temperature on the direction of advection of air masses in the Engabreen glacier valley on 25.07.2022

DYSKUSJA

W niniejszej pracy przeanalizowano zmiany temperatury powietrza zachodzące nad powierzchnią lodowca w profilu pionowym. Wykazano, że nad powierzchnią lodu wystąpił efekt tzw. tłumienia przez lodowiec (Carturan i in. 2015), co oznacza, że temperatura powietrza w profilach nad lodowcem wykazywała mniejszą zmienność niż nad powierzchnią skał (ryc. 5). Jak wskazuje Oerlemans i Grisogono (2002), aby uchwycić duże gradienty temperatury powietrza w dolnych warstwach profilu pionowego, prędkość wznoszenia urządzenia pomiarowego musi zostać utrzymana na niskim poziomie przez pierwsze minuty sondowania. Takie postępowanie pozwoliło autorom na otrzymanie dużej gęstości pomiarów w najniższych 50 m. W niniejszej pracy nie udało się uzyskać dużego zagęszczenia pomiarów w dolnych poziomach profilu podczas sondowania, co było spowodowane chwilowymi utratami zasięgu przez nadajnik GPS.

Temperatura powierzchni lodowca Engabreen (ze zdjęcia satelitarnego LST) jest niższa niż otaczających go skał. Średnia temperatura powierzchni czoła lodowca wyniosła 4,3°C, natomiast średnia temperatura powierzchni skał 12,7°C. Ze względu na to, że dane dotyczące LST pochodziły z lipca, czyli najcieplej-

szezo okresu w ciągu roku, to temperatura powierzchni lodowca była w punkcie topnienia (powyżej 0°C). Jak podają Oerlemans i Grisogono (2002), temperatura powierzchni lodu może utrzymywać się w punkcie topnienia nawet przez kilka miesięcy. Zauważalny był też tzw. efekt chłodzenia lodowca (Carturan i in. 2015), skały bliżej lodowca miały niższą temperaturę powierzchni (ryc. 7, 8).

PODSUMOWANIE

W niniejszej analizie stwierdzono, że przebieg temperatury powietrza wraz ze wzrostem wysokości różni się w zależności od powierzchni, nad jaką został wykonany. Profile reprezentujące czoło lodowca oraz jego krawędź charakteryzują się wzrostem temperatury powietrza wraz z wysokością, gdzie po osiągnięciu maksymalnych temperatur w danym profilu następuje ich stabilizacja, gdzie wahania temperatur są niewielkie. Temperatura powietrza w profilu nad środkiem lodowca charakteryzowała się wyrównanym przebiegiem, bez wyraźnych zmienności wraz ze zmianą wysokości ze względu na małe różnice pomiędzy temperaturą maksymalną i minimalną w profilu.

Przebieg temperatury powietrza w profilu porównawczym nad powierzchnią skalną jest odmienny w stosunku do pomiarów uzyskanych nad lodowcem. Stwierdzono turbulencyjne mieszanie się mas powietrza blisko powierzchni skalnej, wystąpiły tam duże wahania temperatury powietrza na małej różnicy wysokości.

Zakres zmian temperatury powietrza w profilu nad środkową częścią lodowca był najmniejszy (0,86°C), a nad powierzchnią skalną największy (6,56°C). Wyniki pomiarów wykonanych w różnych punktach nad lodowcem wskazywać mogą, że obecność lodowca wpływa łągodząco na zmianę temperatury wraz ze wzrostem wysokości. Nad lodowcem temperatura powietrza rośnie razem ze wzrostem wysokości, czyli podczas oddalania się od jego powierzchni. Przedział wysokości, na którym dochodzi do wzrostu i ustabilizowania się zmian temperatury powietrza wraz z wysokością, można szacować jako wysokość względną nad powierzchnią lodowca od 37 do 53 m.

Na podstawie zdjęcia satelitarne LST stwierdzono, że temperatura powierzchni lodu lodowcowego znacznie różniła się od przyległych terenów. Temperatura powierzchni lodowca Svartisen była ujemna i niższa niż powierzchnia jezera Engabreen, którego temperatura powierzchni wyniosła 2–4°C. Wraz ze zmniejszaniem odległości od lodowca temperatura powierzchni skał spadała, co wskazywać może na ochładzającą rolę jezera lodowcowego.

Wyniki pomiarów ze stacji pogodowej Kestrel 5500, która była umiejscowiona 800 m od czoła lodowca w jego dolinie, wykazały, że największe prędkości wiatru wystąpiły z sektora południowo-wschodniego i południowego, czyli z czoła lodowca Engabreen, i południowego zbocza doliny, nad którą znajduje

się lodowiec Svartisen. Najwyższe temperatury w ciągu dnia wystąpiły, gdy adwekcja powietrza następowała z południowego wschodu i wschodu. Najprawdopodobniej podłoże skalne, które mocniej ogrzewa powietrze niż podłoże z roślinnością, czy powierzchnia wody jeziora, miało wpływ na to, że masy powietrza przemieszczające się nad tą powierzchnią, były cieplejsze niż masy przemieszczające się nad innymi powierzchniami.

Reasumując, stwierdzono, że lodowiec Engabreen, którego temperatura powierzchni jest znacznie niższa niż terenów w dolinie lodowca, ma wpływ na przebieg temperatury powietrza w profilu pionowym nad jego powierzchnią. Nad lodowcem temperatura powietrza rośnie wraz z oddalaniem się od jego powierzchni w pionie. Określono, że powierzchnia lodowca ma wpływ na temperaturę powietrza w pionie od 37 do 53 m nad jego powierzchnią.

Otrzymane wyniki mają charakter wstępny i nie wyczerpują zagadnienia. Do bardziej jednoznacznego określenia zasięgu oddziaływania lodowca posłużyć mogą regularne pomiary nad grupą lodowców. Powyższa analiza stanowi wstęp do badań identyfikacji wpływu zasięgu lodowca na temperaturę powietrza.

Podziękowanie

Pragniemy podziękować prof. dr. hab. Leszkowi Kolendowiczowi oraz dr. Markowi Półrolniczakowi za udostępnienie czujnika do pomiarów temperatury powietrza oraz za czas poświęcony na konsultacje w czasie realizacji projektu. Składamy również podziękowania Dziekanowi Wydziału Nauk Geograficznych i Geologicznych UAM za sfinansowanie i wsparcie wyprawy naukowej „Kolem przez Skandynawię” organizowanej przez Studenckie Koło Naukowe Geografów im. Stanisława Pawłowskiego w Poznaniu, w czasie której wykonano powyżej przedstawione badania terenowe.

LITERATURA

- Andreassen L.M., Elvehøy H., Jóhannesson T., Oerlemans J., Beldring S., Broeke van den M., 2006: *Report No. 3 Modelling the climate sensitivity of Storbreen and Engabreen, Norway*. Norwegian Water Resources and Energy Directorate.
- Aubry-Wake C., Baraer M., McKenzie J.M., Mark B.G., Wigmore O., Hellström R.Å., Lautz L., Somers L., 2015: *Measuring glacier surface temperatures with ground-based thermal infrared imaging*. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 20, 8489–8497.
- Avdan U., Jovanovska G., 2016: *Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data*. *J. Sens*, 2016.
- Bravo A., Quincey D.J., Ross A.N., Rivera A., Brock B., Miles E., Silva A., 2019: *Air temperature characteristics, distribution, and impact on modeled ablation for the South Patagonia Icefield*. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 907–925.
- Carturan L., Cazorzi F., De Blasi F., Dalla Fontana G., 2015: *Air temperature variability over three glaciers in the Ortles–Cevedale (Italian Alps): effects of glacier fragmentation, comparison of calculation methods, and impacts on mass balance modeling*. *TC*, 9, 1129–1146.

- Cohen D., Iverson N.R., Hooyer T.S., Fischer U.H., Jackson M., Moore P.L., 2005: *Debris-bed friction of hard-bedded glaciers*. J. Geophys. Res., 110, F02007.
- Ebrahimi S., Marshall S.J., 2016: *Surface energy balance sensitivity to meteorological variability on Haig Glacier, Canadian Rocky Mountains*. TC, 10, 6, 2799–2819.
- Minder J.R., Mote P.W., Lundquist J.D., 2010: *Surface temperature lapse rates over complex terrain: Lessons from the Cascade Mountains*. J. Geophys. Res., 115, D14122.
- Oerlemans J., Grisogono B., 2002: *Glacier winds and parameterisation of the related surface heat fluxes*. Tellus A: Dyn. Meteorol. Oceanogr., 54: 5, 440–452.
- Oerlemans J., Björnsson H., Kuhn M., Obleitner F., Palsson F., Smeets C.J.P.P., Vugts H.F., De Wolde J., 1999: *Glacio-Meteorological Investigations On Vatnajökull, Iceland, Summer 1996: An Overview*. Bound.-Layer Meteorol., 92, 3–24.
- Petersen L., Pellicciotti F., Juszak I., Careno M., Brock B.W., 2013: *Suitability of a constant air temperature lapse rate over an alpine glacier: Testing the Greuell and Böhm model as an alternative*. Ann. Glaciol., 54, 63, 120–130.
- Shaw T., Brock B., Ayala A., Rutter N., Pellicciotti F., 2017: *Centreline and cross-glacier air temperature variability on an Alpine glacier: assessing temperature distribution methods and their influence on melt model calculations*. J. Glaciol., 63, 242.
- Shea J.M., Moore R.D., 2010: *Prediction of spatially distributed regional-scale fields of air temperature and vapor pressure over mountain glaciers*. J. Geophys. Res., 115, D23107.
- Solgaard A.M., Messerli A., Schellenberger T., Hvidberg C.S., Grinsted A., Jackson M., Zwinger T., Karlsson N.B., Dahl-Jensen D., 2018: *Basal conditions at Engabreen, Norway, inferred from surface measurements and inverse modelling*. J. Glaciol., 64, 246, 555–567.
- Trepińska J., 2002: *Górskie klimaty*. IGiGP UJ, Kraków.
- Zawiślak J., 2010: *Słownik tematyczny terminów, wyrażeń i zwrotów stosowanych w prognozach meteorologicznych*. IMGW, Warszawa.

Źródła internetowe

- EarthExplorer, <https://earthexplorer.usgs.gov> [dostęp: 16.10.2022].
- Elevationapi.com, https://elevationapi.com/playground_3dbbox.
- Glacier.nve.no, <http://glacier.nve.no/Glacier/viewer/CI/en/nve/ClimateIndicatorInfo/1094?name=Engabreen> [dostęp: 2.11.2022].
- Nve.no, <https://www.nve.no/Hydrology/Glaciers/Svartisen-subglacial-observatory/> [dostęp: 2.11.2022].
- Rawinsonde.com, http://rawinsonde.com/ERA5_Europe/ [dostęp: 10.11.2022].
- Statkart.no, <https://openwms.statkart.no/skwms1/wms.topo4>.
- Wetter3.de, https://www.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html [dostęp: 26.10.2022].