Prace Geograficzne 239 Dolina Suchej Wody w Tatrach. Środowisko i jego współczesne przemiany

RZEŹBA I WYBRANE ELEMENTY KLIMATU NAJWYŻEJ POŁOŻONYCH CYRKÓW POLODOWCOWYCH NA PRZYKŁADZIE KOZIEJ DOLINKI

Bogdan Gądek, Mariusz Grabiec, Stanisław Kędzia

W Dolinie Suchej Wody większość wysoko położonych dolinek zostało w plejstocenie i częściowo na początku holocenu przekształconych/uformowanych przez lodowce (Klimaszewski 1988; Baumgart-Kotarba, Kotarba 2001a,b). Jedynie Dolina Liliowa i Dolina Sucha w południowo-zachodniej części Doliny Stawów Gąsienicowych nie były zlodowacone, zachowując pierwotny typ rzeźby fluwialno-denudacyjnej (Klimaszewski 1988). Według M. Baumgart-Kotarby i A. Kotarby (2001a, b) ostatnie małe lodowce górskie istniały w najwyżej położonych cyrkach lodowcowych w holocenie, w okresie ochłodzenia Venediger (około 8,3 ka BP). Ze względu na duże zacienienie oraz wysokość bezwzględną, dolinki te charakteryzują się odmiennym topoklimatem, podobnym do klimatu obszarów peryglacjalnych. Współcześnie, płaty śnieżne utrzymują się w nich do późnego lata lub do następnego roku. W niektórych stwierdzono występowanie (Kozia Dolinka) lub duże prawdopodobieństwo istnienia (Dolina Sucha) wieloletniej zmarzliny.

Do największych i najlepiej wykształconych, wysoko położonych cyrków polodowcowych w Dolinie Suchej Wody należy Kozia Dolinka, która jest także najlepiej zbadana pod kątem geofizyczno-geomorfologicznym oraz klimatycznym. Z tego powodu dalsze omawianie klimatu i rzeźby cyrków będzie prowadzone na jej przykładzie.

Kozia Dolinka powstała z przeobrażenia fluwialnej dolinki preglacjalnej (Klimaszewski 1988). Wycięta jest w granitoidach trzonu krystalicznego (Bac-Moszaszwili, Gąsienica-Szostak 1990), pociętego przez uskoki i spękania ciosowe o biegu NE-SW (strefa dyslokacyjna Koziej Przełęczy – przechodząca przez Kozią Przełęcz i Granaty) oraz NW-SE (dwie w miarę równoległe biegnące strefy dyslokacyjne) (Grochocka-Piotrowska 1970).

Ma półkolisty kształt o promieniu około 500 m i otwarta jest w kierunku północno-zachodnim (ryc. 1). Z trzech stron otoczona jest stokami i skalnymi ścianami o wysokości względnej do 350 m, w dolnej części podciętymi i często wygładzonymi glacjalnie. Skalne zbocza i ściany ponacinane są głębokimi żlebami nawiązującymi do przebiegu spękań. U wylotu żlebów rozpościerają się duże, lecz słabo rozczłonkowane stożki piargowe (Klimaszewski 1988).





- wały moren czołowych; Ко-

10 - lakes and streams; 11 - tourist routes; 12 - summits, passes; 13 - lateral mo-15 - fragments of valley floor covered ered from slope; 16 - rocky slopes covered with debris, mantled by alpine meadows; raine ridges; 14 – frontal moraine ridges; with moraine material and material deliv-

17 - spot heights

CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH ELEMENTÓW KLIMATU

TEMPERATURA POWIETRZA

Największy wpływ na topoklimat Koziej Dolinki ma znaczna wysokość bezwzględna oraz duże zacienienie. Prowadzone w latach 90. ubiegłego wieku patrolowe pomiary temperatury powietrza wykazały duże zróżnicowanie jej termiki. Najwyższą temperaturą charakteryzowały się południowe stoki Zadniego Granatu, natomiast najniższą – dolna część stożka piargowego pod Kozim Wierchem. Jest to spowodowane głównie ilością energii dopływającej do gruntu w postaci bezpośredniego promieniowania słonecznego. Pod tym względem uprzywilejowane sa południowe stoki Zadniego Granatu, na które w ciągu lata promienie słoneczne padają pod kątem zbliżonym do prostego. Natomiast najmniej energii słonecznej dociera do stożków piargowych usytuowanych pod Kozim Wierchem i Kozimi Czubami. Spowodowane jest to dużym zacienieniem przez kilkuset metrowej wysokości skalne ściany. Pomiary zacienienia wykazały, że do niektórych partii stożków piargowych bezpośrednie promieniowanie słoneczne nie dociera przez większą część roku (Kędzia 2004). Zróżnicowanie termiki znajduje znaczne odzwierciedlenie w grubości pokrywy śnieżnej oraz w rodzajach i intensywności procesów morfogenetycznych.

Na podstawie kilkuletnich pomiarów temperatury powietrza, prowadzonych na początku XXI w., przy użyciu cyfrowych rejestratorów temperatury zamontowanych na wychodni skalnej w górnej części stożka piargowego pod Kozimi Czubami (około 2020 m n.p.m.) oraz serii krótkich pomiarów patrolowych, oszacowano, że średnia roczna temperatura powietrza nad dolną częścią stożka piargowego pod Kozim Wierchem wynosi około -1,5 °C. Ze względu na bardzo grubą pokrywę śnieżną, sięgającą nawet kilku metrów, pomiar temperatury powietrza w dolnej części omawianego piargu nie był możliwy i stałe pomiary prowadzono tylko na wychodni skalnej, na której pokrywa śnieżna nie osiąga tak dużej miąższości jak przy dnie dolinki.

TEMPERATURA GRUNTU I WIELOLETNIA ZMARZLINA

Pierwsze pomiary temperatury gruntu wykonane przez M. Hessa (1963) w połowie ubiegłego wieku nie wykazały występowania wieloletniej zmarzliny w Koziej Dolince. Dopiero następne pomiary prowadzone przez T. Gerlacha i M. Kłapę, z użyciem zmarzlinomierzy Danilina, zasugerowały możliwość utrzymywania się przemarzniętego gruntu również w ciepłym okresie roku (Kłapa 1963, 1966; Gerlach 1971). Dalsze, szczegółowe badania nad temperaturą gruntu i wieloletnią zmarzliną prowadzone kilkadziesiąt lat później, głównie przez S. Kędzię, J. Mościckiego oraz B. Gądka, potwierdziły występowanie w ciągu całego roku przemarzniętego gruntu w stożkach



Ryc. 2. Przebieg temperatury powierzchni gruntu ze zmarzliną w dolnej części stożka piargowego pod Kozim Wierchem (KW) i wolnego od zmarzliny stoku Zadniego Granatu (KG1) w okresie zimnym 2003/2004 (a) i 2004/2005 (b) Fig. 2. Ground surface temperature at lower part of scree slope with permafrost under the Kozi Wierch summit (KW) and at permafrost free slope of the Zadni Granat summit

(KG1) in winters 2003/2004 (a) and 2004/2005 (b)

obrywowo-usypiskowych pod Kozim Wierchem i Kozimi Czubami (Kędzia i in. 1998; Mościcki, Kędzia 2000, 2001; Kędzia 2004, 2006; Mościcki 2008; Gądek, Kędzia 2008, 2009). Pierwszymi badaniami, które wykazały duże prawdopodobieństwo występowania wieloletniej zmarzliny, były pomiary BTS (*the bottom temperature of the winter snow cover*) wykonane w 1996 r. W okresach poprzedzających wiosenne roztopy temperatura na kontakcie pokrywy śnieżnej i gruntu w miejscach występowania zmarzliny wynosiła od -8 do -11°C (Kędzia i in. 1998; Mościcki, Kędzia 2001). W latach późniejszych do pomiarów temperatury gruntu zastosowano cyfrowe rejestratory wyposażone w elektryczne termometry, które przez cały lub prawie cały rok, w odstępach jednej godziny rejestrowały temperaturę powierzchni gruntu oraz na głębokości 50 cm. Na rycinach 2a i b pokazana jest zmienność temperatury powierzchni gruntu w sezonach zimowych 2003/2004 i 2004/2005 na stokach z wieloletnią zmarzliną (Kozi Wierch) i wolnych od niej (Zadni Granat) (Gądek, Kędzia 2008, 2009).

We wrześniu 1997 r. przeprowadzono w Koziej Dolince, za pomocą kamery termowizyjnej, pomiar temperatury powierzchni gruntu na stokach o ekspozycji północnej. Rycina 3 przedstawia badane stoki w przedziale światła widzialnego (ryc. 3a) i w podczerwieni (ryc. 3b). Termogram stoków został wykonany kamerą termowizyjną firmy AGEMA przez A. Wróbel (Kędzia i in. 1998). Kamera rejestrowała promieniowanie podczerwone powierzchni gruntu w zakresie fal o długościach od 2 µm do 5 µm. Czułość kamery wynosiła 0,1 °C, a błąd wyznaczenia temperatury tą metodą wahał się w granicach 2% zakresu pomiarowego. Z trzech stożków piargowych widocznych na fotografii i termogramie, najniższą temperaturą powierzchni odznaczał się stożek usytuowany pod Kozim Wierchem (pierwszy z lewej na ryc. 3ab). Różnica w temperaturze powierzchni, pomiędzy jego górną (wolną od zmarzliny) a dolną częścią (zawierającą wieloletnią zmarzlinę), dochodziła do 7 °C. Rozkład temperatury powierzchni gruntu zarejestrowany kamerą termowizyjną pod koniec lata, odzwierciedlał rozkład temperatury zarejestrowany w zimie za pomocą metody BTS, przy czym w zimie różnica w temperaturze powierzchni górnej i dolnej części piargu dochodziła do około 9,5 °C. Tak niska temperatura powierzchni dolnej części piargu przemawia za istnieniem w tym miejscu wieloletniej zmarzliny.

W kolejnych badaniach geofizycznych posłużono się metodą sondowań elektrooporowych, przeprowadzonych pod kierunkiem J. Mościckiego, przy użyciu aparatury cyfrowej GDRM – Elmes w układzie pomiarowym 4-elektrodowym, symetrycznym Schlumberger`a. Rycina 4 przedstawia krzywą sondowań elektrooporowych wykonanych na stożku piargowym pod Kozim Wierchem. Z modelu interpretacyjnego tej krzywej wynika, że warstwa czynna sięgała do głębokości około 2 m, natomiast grubość zmarzliny została wyinterpretowana na około 4 m (Kędzia i in. 1998). Podobną grubość warstwy czynnej otrzymano za pomocą wzoru W. Haeberliego i G. Patzelta (1982).



Ryc. 3. Stoki o ekspozycji północnej Koziego Wierchu i Kozich Czub w świetle widzialnym (fot. S. Kędzia) (a) oraz ich termogram wykonany 18.09.1997 w godz. 9.20–9.30 (Kędzia i in. 1998) (b)

Fig. 3. Northern slopes of the Kozi Wierch and the Kozie Czuby summits in visible light (fot. S. Kędzia) (a) and their thermogram on 18.09.1997 at 9.20 – 9.30 (Kędzia et al. 1998) (b)



Ryc. 4. Krzywa sondowania elektrooporowego wykonanego 18.09.1997 na stożku piargowym pod Kozim Wierchem wraz z modelem interpretacyjnym 1D (Kędzia i in. 1998)

Fig. 4. The curve of electric resistivity soundings (18.09.1997) on the scree slopes under the Kozi Wierch summit with interpretation model 1D (Kędzia et al. 1998)

W 1999 r. na stożku piargowym pod Kozim Wierchem ponownie przeprowadzono sondowania elektrooporowe. Tym razem w celach porównawczych wykonano sondowania dwukrotnie: pod koniec czerwca i na początku października. Pomiary ponownie potwierdziły występowanie wieloletniej zmarzliny, której grubość na początku października, oszacowana według wyinterpretowanych modeli, wynosiła od około 3 do około 4 m. Otrzymane modele sugerowały topnienie warstwy zmarzliny nie tylko od góry, ale również od dołu, przy czym topnienie spągu zmarzliny było intensywniejsze. Przyczyną tego prawdopodobnie była woda, która podczas opadów deszczu spływając ze skalnych ścian, wsiąka w górną część stożka piargowego i następnie spływając po skalnym podłożu kotła, nadtapia zmarzlinę od dołu. Tylko podczas bardzo intensywnych opadów deszczu, woda spływa po powierzchni piargu, modelując jego powierzchnię. Według J. Mościckiego i S. Kędzi (2001) oraz S. Kędzi (2004) woda spływająca ze skalnych ścian ogranicza możliwości występowania wieloletniej zmarzliny do dolnej części piargu.

POKRYWA ŚNIEŻNA

Podczas pomiarów temperatury metodą BTS w latach 90. ubiegłego wieku prowadzono również pomiary grubości pokrywy śnieżnej (Kędzia i in. 1998; Mościcki, Kędzia 2001; Kędzia 2004). W dnie oraz w dolnej części zacienionych stoków pod Kozim Wierchem i Kozimi Czubami miąższość pokrywy śnieżnej, głównie na skutek nawiewania śniegu dochodziła do 6 m, podczas gdy w rejonie Stacji Badawczej IGiPZ PAN na Hali Gąsienicowej rejestrowano dwu- lub trzykrotnie mniejszą grubość. W wyniku specyficznego topoklimatu, pokrywa śnieżna w dnie oraz na zacienionych stokach dolinki zanika zwykle w pierwszej połowie czerwca, to jest o około 1,5 miesiąca później, niż na Hali Gąsienicowej. Przez sporą część ciepłego okresu roku w zacienionych zagłębieniach cyrku utrzymują się płaty firnowo-lodowe. Na stokach o ekspozycji południowej Zadniego Granatu oraz stożkach piargowych usytuowanych pod Kozim Wierchem i Kozimi Czubami występują lawiny śnieżne (ryc. 5). Największe zaobserwowane lawiny zaczynały się od skalnych ścian i kończyły w dnie dolinki.



Ryc. 5. Spływy gruzowe pod Zadnim Granatem w dniu 17.07.2009. Poniżej spływu na płacie śnieżnym widoczne jest czoło lawiniska (szary odcień) (fot. Kędzia) Fig. 5. Debris flow at the Zadni Granat slopes on 17.07.2009. Below debris flow on snow patches is visible snow avalanche front (grey shade) (photo Kędzia)

PROCESY MORFOGENETYCZNE

Materiał gruzowy pokrywa około 53% powierzchni Koziej Dolinki. Do głównych form rzeźby terenu z pokrywą gruzową należą: stożki obrywowo-usypiskowe pod Kozimi Czubami, Kozim Wierchem, Buczynową Strażnicą i Czarnymi Ścianami, stożek usypiskowo-napływowy pod Zadnim Granatem, dno kotła pokryte osadami o zróżnicowanej genezie oraz wał moreny czołowej położony na jego progu (ryc. 1).

Na skalnych ścianach, głównie Czarnych Ścian, Koziego Wierchu i Kozich Czub, zachodzi intensywne wietrzenie mrozowe oraz odpadanie. Na stożkach obrywowo-usypiskowych usytuowanych pod wymienionymi ścianami, dochodzi do spłukiwania materiału zwietrzelinowego, spełzywania, przemieszczania przy udziale lawin i powolnego zsuwania się pokrywy śnieżnej oraz przemieszczeń materiału tworzącego stożki, na skutek wyruszeń spowodowanych materiałem odpadającym od skalnych ścian.

Spływy gruzowe pod Kozim Wierchem i Kozimi Czubami, jak wykazały badania lichenometryczne, zostały utworzone i następnie przemodelowane, głównie w ostatnich 20–30 latach. Na niezadarnionych częściach stożków dochodzi do deflacji. Rola wieloletniej zmarzliny w przekształcaniu rzeźby kotła, jest bardzo mała. Przyczyną tego jest znaczna grubość warstwy czynnej (ok. 2 m), duże nachylenie omawianych stożków oraz typ samej zmarzliny, która występuje w postaci niewielkich soczew zamarzniętego gruntu. W miejscach występowania wieloletniej zmarzliny można spotkać nieliczne przykłady sortowania materiału, jednakże na skutek dużego nachylenia stożków formy te są intensywnie degradowane przez procesy stokowe (Kędzia 2004).

Na częściowo zadarnionych, południowych stokach Zadniego Granatu dochodzi głównie do ściekania pokrywy zwietrzelinowej, spłukiwania, deflacji oraz przemieszczania materiału przy udziale lodu włóknistego. Spływy gruzowe na południowym stoku Zadniego Granatu, które według interpretacji zdjęć lotniczych i datowania lichenometrycznego powstały co najmniej 60 lat temu, należą do największych i najczęściej przemodelowywanych w Koziej Dolince (ryc. 5).

Dno Koziej Dolinki buduje materiał pochodzenia lodowcowego oraz materiał dostarczany ze stoków i skalnych ścian wskutek napływów i spływów, śnieżnych lawin oraz obrywów. Niewielką rolę morfogenetyczną odgrywają w obrębie płatów firnowo-lodowych procesy niwalne, prowadzące do powstawania form niwacyjnych.

BUDOWA POKRYW GRUZOWYCH

STOKI OBRYWOWO-USYPISKOWE

Stożki gruzowe w Koziej Dolince, utworzone u podnóży skalnych ścian w strefie wysokościowej od 1945 m n.p.m. do 2050 m n.p.m., zajmują powierzchnię około 6 ha. Ich wysokość wynosi od 50 m do ponad 100 m, a nachylenie od 28° do 34°.



Ryc. 6. Pokrywy gruzowe i lokalizacja linii pomiarów georadarowych w Koziej Dolince: 1 – stoki obrywowo-usypiskowe; 2 – stożek usypiskowo-napływowy; 3 – pokrywy o zróżnicowanej genezie wyścielających dno doliny; 4 – wał moreny czołowej; a-h – linie pomiarów georadarowych

Fig. 6. Debris covers and location of GPR profiles in the Kozia Dolinka valley: 1 – talus slopes; 2 – talus-alluvial cone; 3 – bottom sediments of various origin; 4 – frontal moraine; a-h – GPR profiles

Echogramy radarowe stoków obrywowo-usypiskowych, których przebieg ilustruje rycina 6, otrzymane przy użyciu anten o częstotliwości 200 MHz, przedstawiają nakładające się hiperbole dyfrakcyjne będące efektem wielokrotnej rejestracji dyfrakcji fal elektromagnetycznych na dużych okruchach skalnych (ryc. 7). Średnia prędkość propagacji fal radarowych wewnątrz stoków wynosiła 11 cm/ns. Jest to typowa wartość zarówno dla luźnych osadów grubookruchowych jak i suchych piaszczystych (Gądek, Grabiec 2008, 2010). W przypowierzchniowej warstwie badanego podłoża, której grubość nie przekraczała 2 m, średnie prędkości fal były jednak znacznie wyższe i wynosiły od około 17 cm/ns do około 18 cm/ns. Wpłynęła na to świeża i sucha pokrywa śnieżna o grubości od około 20 cm do około 50 cm. Prędkość propagacji fal elektromagnetycznych w takiej pokrywie śnieżnej może być zbliżona do 25 cm/ns (Gądek, Kotyrba 2007). W głębszych partiach badanych stoków zmierzone prędkości fal ulegających dyfrakcji na pojedynczych głazach miały zwykle znacznie mniejsze wartości. Tylko w środkowej części piargu pod Kozim Wierchem, w warstwie o grubości 8 m, wynosiły 16 cm/ ns. Wartość ta jest typowa dla gruntów zamarzniętych (Brandt i in. 2007; Gądek, Grabiec 2008) i potwierdza możliwość występowania w tej części stoku płatu wieloletniej zmarzliny (Kędzia i in. 1998; Mościcki, Kędzia 2000, 2001; Kędzia 2004; Lamparski, Kędzia 2007; Gądek, Kędzia 2008; Mościcki 2010). Najniższe średnie prędkości fal radarowych zmierzono u podnóża stoków. W warstwie o grubości około 6 m wynosiły od 8 cm/ns do 10 cm/ns. Prawdopodobnie było to związane z obecnością wody gruntowej lub wilgotnego materiału drobniejszej frakcji.



Ryc. 7. Echogram radarowy (200 MHz) stoków obrywowo-usypiskowych pod Kozim Wierchem i Kozimi Czubami (ryc. 6; linia a).

Fig. 7. The GPR section (200 MHz) of the talus slopes below the Kozi Wierch summit and the Zadnia Sieczkowa pass (see fig. 6; line a).

Echogramy radarowe uzyskane przy użyciu georadaru z antenami o częstotliwości 25 MHz nie ujawniły żadnych wyraźnych struktur wewnątrz stoków obrywowo-usypiskowych. Pozwoliły natomiast na określenie miąższości luźnego materiału, zdeponowanego u podnóża ścian skalnych. W ich świetle maksymalna grubość piargów Koziej Dolinki wynosi od 20 m do ponad 30 m (ryc. 8). Piarg pod Kozim Wierchem o wysokości 110 m osiąga grubość około 25 m, podczas gdy w dolnej części piargu pod Zadnią Sieczkową Przełęczą, którego wysokość wynosi tylko około 60 m, miąższość luźnego materiału skalnego jest zbliżona do 35 m. W tym ostatnim przypadku materiał stokowy prawdopodobnie jest nałożony na pokrywę morenową. W jej dnie zarejestrowano bardzo wyraźny horyzont refleksyjny o poziomym przebiegu. Od tego miejsca prędkość propagacji fal radarowych w głąb podłoża znacznie malała, co świadczy o tym, że zarejestrowany horyzont refleksyjny odzwierciedlał poziom wód gruntowych.



Ryc. 8. Echogram radarowy (25 MHz) stoków obrywowo-usypiskowych pod Kozim Wierchem i Zadnią Sieczkową Przełęczą (ryc. 6; linia b) Fig. 8. The GPR section (25 MHz) of the talus slopes below Kozi Wierch summit and Zadnia Sieczkowa pass (Fig. 6;,line b)

STOK USYPISKOWO-NAPŁYWOWY

U wylotu żlebu rozcinającego południowo-zachodni stok Zadniego Granatu, w przedziale wysokości od 1940 m n.p.m. do 2005 m n.p.m., występuje stożek usypiskowo-napływowy o powierzchni około 1 ha. Jego średnie nachylenie wynosi 23°, przy czym najbardziej stroma jest jego górna część. Powierzchnię tej zadarnionej formy tworzy materiał skalny o zróżnicowanej frakcji – od głazowej po ilastą.

W świetle wyników pomiarów georadarowych (ryc. 9) dolna część stożka, sięgająca do wysokości około 1970 m n.p.m., zawiera dużą ilość materiału drobnej frakcji. Tworzy on wkładki o grubości od około 1 m do 3 m, rozdzielone materiałem grubookruchowym. Średnia prędkość propagacji fal elektromagnetycznych w tej napływowej części stożka była zbliżona do 10 cm/ns. W dnie Koziej Dolinki utwory te zostały nałożone na materiał glacjalny i wraz z nim osiągają grubość około 25 m. Natomiast górna część stoku ma wyraźne cechy formy usypiskowej z bardzo dużym udziałem okruchów skalnych o wielkości przekraczającej 0,4 m. Na echogramach radarowych, zarejestrowanych przy użyciu anten o częstotliwości 200 MHz, znajdują one odzwierciedlenie w postaci nakładających się hiperbol dyfrakcyjnych. Średnia prędkość fal radarowych ulegających dyfrakcji na pojedynczych okruchach skalnych w tej części stoku przekraczała 11 cm/ns.



Ryc. 9. Echogram radarowy (200 MHz) stożka usypiskowo-napływowego pod Zadnim Granatem (ryc. 6; linia c)

Fig. 9. The GPR section (200 MHz) of the talus-alluvial cone below the Zadni Granat summit, (Fig. 6; line c)

DNO KOTŁA

Glacjalne dno Koziej Dolinki ma około 350 m długości i około 150 m szerokości. Pokryte jest materiałem morenowym, na którym znajdują się utwory napływowe (północno-zachodnia część kotła) oraz utwory obrywowo-usypiskowe (południowo-wschodnia część kotła). Znajduje to także odzwierciedlenie w prędkościach propagacji fal elektromagnetycznych w gruncie oraz w strukturach zarejestrowanych na echogramach radarowych. Średnie prędkości propagacji fal elektromagnetycznych w strefie przypowierzchniowej (o grubości około 12 m z pominięciem warstwy śniegu zalegającego na powierzchni terenu w okresie pomiarów) wynosiły 9 cm/ns w północno-zachodniej części i 11 cm/ns w południowo-wschodniej części kotła. Na rycinie 9 wskazano rozmieszczenie osadów napływowych i zasieg zwartej pokrywy utworów obrywowo-usypiskowych. Granica pomiędzy tymi dwiema częściami dna Koziej Dolinki przebiega na wysokości 1945 m n.p.m., a ich średnie nachylenia wynoszą odpowiednio 4° i 21°. Na 200 m profilu pomiarowego, w obrębie stoku obrywowo-usypiskowego, zarejestrowano wyraźną i jednorodną strukturę o długości 30 m i grubości dochodzącej do 6 m. W okresach bezśnieżnych w tym miejscu na powierzchni terenu widoczna jest lita skała. W świetle uzyskanych wyników jest to blok skalny. Jego położenie i orientacja świadczą, że odpadł od Czarnych Ścian. Obraz radarowy skalnego bloku różni się od struktur napływowych brakiem przewarstwień (ryc. 10). Ponadto prędkość propagacji fal elektromagnetycznych w jego masie była o około 3 cm/ns większa niż w osadach drobnookruchowych.



Ryc. 10. Echogram radarowy (200 MHz) dna Koziej Dolinki (ryc. 6; linia d) Fig. 10. The GPR section (200 MHz) of the bottom of the Kozia Dolinka valley (Fig. 6; line d)



Ryc. 11. Echogram radarowy (25 MHz) dna Koziej Dolinki (ryc. 6; linia e) Fig. 11. The GPR section (25 MHz) of the bottom of the Kozia Dolinka valley (Fig. 6; line e)

Wyniki pomiarów georadarowych wykonanych z wykorzystaniem anten o częstotliwości 25 MHz świadczą o tym, że maksymalna grubość luźnego materiału wyścielającego dno Koziej Dolinki wynosi 55 m w jej dolnej części (ryc. 11) i 35 m w górnej części (ryc. 8). Po wewnętrznej stronie progu Koziej Dolinki istnieje przegłębienie litego podłoża o głębokości około 30 m, oddzielone od górnej części kotła progiem skalnym. Kształt i położenie tego przegłębienia wskazują, że jest ono efektem podlodowcowego kruszenia i wyorywania skał oraz ich wygładzania przez ślizgający się spąg lodowca zawierający rumosz skalny (Gądek 1998). Forma ta powstała w wyniku rotacyjnego ruchu lodu poniżej skalnego progu. Materiał okruchowy, który ją wypełnia i nadbudowuje, charakteryzuje się zmiennymi właściwościami dielektrycznymi. Średnia prędkość fal elektromagnetycznych w masie tego materiału wynosiła jednak 11 cm/ns, czyli tyle, ile wewnątrz innych grubookruchowych pokryw gruzowych w Koziej Dolince. Zatem prawdopodobnie w podłożu kotła dominuje materiał morenowy. Powierzchnia terenu nad pogrzebanym zagłębieniem glacjalnym także obecnie jest wklęsła. Maksymalna głębokość współczesnego zagłębienia wynosi 8 m. Zajmuje ono powierzchnię około 2000 m². W jego obrębie występują zarówno utwory napływowe jak i obrywowe (ryc. 12). Na dnie występuje charakterystyczny blok skalny o średnicy 7,5 m, który prawdopodobnie stoczył się żlebem spod Koziej Przełęczy.



Ryc. 12. Echogram radarowy (200 MHz) dna Koziej Dolinki (ryc. 6; linia e) Fig. 12. The GPR section (200 MHz) of the bottom of the Kozia Dolinka valley (Fig. 6; line e)

W dnie górnej części Koziej Dolinki zarejestrowano bardzo wyraźny horyzont refleksyjny o poziomym przebiegu, interpretowany jako zwierciadło wód gruntowych. Obejmuje on także dolną część stoków obrywowo-usypiskowych pod Kozim Wierchem i pod Czarnymi Ścianami.

WAŁ MORENY CZOŁOWEJ

Na progu Koziej Dolinki występuje rozcięty marginalnie wał moreny czołowej o wysokości około 6 m i długości około 80 m. Jego wiek korelowany jest z alpejską oscylacją Venediger (ok. 8300 BP) (Baumgart-Kotarba, Kotarba 2001a,b). Budują go przede wszystkim duże bloki skalne, które na echogramach radarowych zarejestrowanych z wykorzystaniem anten o częstotliwości 200 MHz, odzwierciedlają nakładające się hiperbole dyfrakcyjne. Maksymalna grubość utworów morenowych zmienia się wzdłuż osi wału od 12 m do 17 m. Średnia prędkość propagacji fal elektromagnetycznych w jego wnętrzu wynosiła 12 cm/ns. W pobliżu środkowej części wału, na głębokości około 8 m, istnieje jednak wkładka utworów drobnoklastycznych o miąższości około 4 m, szerokości około 20 m (w poprzek kotła) i długości około 30 m (ryc. 10 i 13). Na podstawie cech geometrycznych i położenia tej wkładki można przypuszczać, że: a) tworzą ją utwory fluwioglacjalne wypełniające kopalną rynnę proglacjalną (dawniej odprowadzającą część wód lodowcowych), b) jest to napływowy osad ze stoku Zadniego Granatu, zdeponowany w początkowej fazie stagnacji czoła lodowca na progu Koziej Dolinki, c) jest to napływowy osad stokowy złożony na powierzchni dawnego lodowca, a następnie przemieszczony wraz z lodem do strefy czołowej i w wyniku procesów ablacji zdeponowany na przedpolu lodowca wraz z innymi utworami morenowymi.



Ryc. 13. Echogram radarowy (200 MHz) moreny czołowej (ryc. 6; linia f) Fig. 13. The GPR section (200 MHz) of the frontal moraine (Fig. 6; line f)

LITERATURA

- Bac-Moszaszwili M., Gąsienica-Szostak M., 1990, *Tatry polskie. Przewodnik geologiczny dla turystów*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 160 ss.
- Baumgart-Kotarba, M., Kotarba, A., 2001a, Deglacjacja Doliny Suchej Wody w Tatrach Wysokich, [w:] A. Karczewski, Z. Zwoliński (red.) Funkcjonowanie geoekosystemów w zróżnicowanych warunkach morfoklimatycznych – monitoring, ochrona, edukacja, Stowarzyszenie Geomorfologów Polskich, Poznań, s. 73–84.
- 2001b. Deglaciation in the Sucha Woda and Pańszczyca Valleys in the Polish High Tatras, Studia Geomorfologica Carpatho-Balcanica, 35, s. 7–38.
- Brandt, O., Langley, K., Kohler, J., Hamran, S. E., 2007, *Detection of buried ice and sediment layers in permafrost using multi-frequency Ground Penetrating Radar: a case examination on Svalbard*, Remote Sensing of Environment, 111, s. 212–227.
- Gądek, B., 1998, Würmskie zlodowacenie Tatr w świetle rekonstrukcji lodowców wybranych dolin na podstawie prawidłowości glacjologicznych, Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice, 151 ss.
- Gądek, B., Grabiec, M., 2008, *Glacial ice and permafrost distribution in the Medena kotlina (Slovak Tatras): mapped with application of GPR and GST measurements*, Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica, 42, s. 5–22.
- 2010, Grubość pokryw gruzowych w Tatrach w świetle wyników pomiarów georadarowych, [w:] S. Kędzia, Sprawozdanie z projektu: pt. "Współczesne zmiany klimatu i ich odzwierciedlenie w morfodynamice stoków tatrzańskich, Zakład Badań Geośrodowiska, IGiPZ PAN, Kraków.
- Gądek, B., Kędzia, S., 2008, Winter surface thermal regimes in the zone of sporadic discontinuous permafrost, Tatra Mountains (Poland and Slovakia), Permafrost and Periglacial Processes, 19, s. 315–321.

- 2009, Problemy detekcji wieloletniej zmarzliny na podstawie temperatury u spągu zimowej pokrywy śnieżnej na przykładzie Tatr, Przegl. Geogr., 81,1, s. 75–91.
- Gądek, B., Kotyrba, A., 2007, Contemporary and fossil metamorphic ice in Medena kotlina (Slovak Tatras) mapped by ground-penetrating radar, Geomorphologia Slovaca et Bohemica, 1, s. 75–81.
- Gądek B., Grabiec M., Kędzia S., Rączkowska Z., Struktura wewnętrzna i morfodynamika wybranych stoków gruzowych tatr w świetle wyników pomiarów georadarowych i lichenometrycznych, [w:] A. Kotarba (red.), Nauka a Zarządzanie obszarem Tatr i ich otoczeniem, Materiały IV Konferencji Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek, 14–16.10.2010, Zakopane, t. 1, Nauki o Ziemi, TPN-PTP-NoZ, Zakopane, 2010, s. 55–61.
- Gerlach T., 1971, Contribution a la connaissance du developpement actuel des buttes gazonnees (thufurs) dans les Tatras Polonaises, [w:] Processus periglaciaires etudies sur le terrain, Symposium International de Geomorphologie Liege-Caen 1-9 juillet 1971, Union Geographique Internationale, s. 57–74.
- Grochocka-Piotrowska K., 1970, Fotointerpretacja i geneza struktur nieciągłych w masywie granitowym polskiej części Tatr Wysokich, Acta Geologica Polonica, 20, 2, s. 365–411.
- Haeberli W., Patzelt G., 1982, *Permafrostkartierung im gebiet Der Hochebenkar-Blockgletscher, Obergurgl, Ötztaler Alpen*, Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 18, 2, s. 127–150.
- Hess M., 1963, *Problems of the Perinival Climate in the Tatra Mountains*, Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences, Serie des sci. geol. et geogr., 11, 4, s. 247–251.
- Kędzia, S., 2004, *Klimatyczne i topograficzne uwarunkowania występowania wieloletniej zmarzliny w Tatrach Wysokich (na przykładzie Koziej Dolinki)*, Praca doktorska, Zakład Badań Geośrodowiska, IGiPZ PAN, Kraków.
- 2006, Winter thermal regime of ground in the Kozia Dolinka valley (Polish High Tatra Mts.), [w:] I. Smolov (red.) Geomorfologické výzkumy v roce 2006, Vydavatelství UP v Olomouci, Olomouc, s. 100–103.
- Kędzia, S., Mościcki, J., Wróbel, A., 1998, Studies on the occurrence of permafrost in Kozia Valley (The High Tatra Mts.), [w:] Wyprawy Geograficzne na Spitsbergen, UMCS, Lublin, s. 51–57.
- Klimaszewski M., 1988, *Rzeźba Tatr polskich*, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, 708 ss.
- Kłapa M., 1963, Prace Stacji Badawczej Instytutu Geografii PAN na Hali Gąsienicowej w latach 1960 i 1961, Przegl. Geogr., 35, 2, s. 221–237.
- 1966, Prace Stacji Badawczej Instytutu Geografii PAN na Hali Gąsienicowej w latach 1962-1964, Przegl. Geogr., 38, 2, s. 253–268.
- Lamparski, P., Kędzia S., 2007, *Permafrost occurence in Kozia Dolinka (High Tatra Mountains) in light of georadar investigations*, Geomorphologia Slovaca et Bohemica, 1, s. 82–88.
- Mościcki, J., 2010, Temperatura gruntu na północno-wschodnim stoku Świnicy i w Koziej Dolince w okresie 2004-2009, [w:] IV Konferencja Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek, Zakopane, 14-16 październik 2010, streszczenie prac, s. 87.
- Mościcki, W.J., 2008, Temperature regime on northern slopes of Hala Gąsienicowa in the Polish Tatra Mountains and its relationship to permafrost, Studia Geomorfologica Carpatho-Balcanica, 42, s. 23–40.

Mościcki W.J., Kędzia S., 2000, Comments and observations on the application of resistivity sounding In the research of permafrost, Biuletyn Peryglacjalny, 39, 69–81.
Mościcki, J., Kędzia, S., 2001, Investigation of mountain permafrost in the Kozia Dolinka valley, Tatra Mountains, Poland, Norsk Geografisk Tidsskrift, 55, s. 235–240.

Adresy Autorów:

Bogdan Gądek

Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi Katedra Geomorfologii ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec

e.mail: bogdan.gadek@us.edu.pl

Mariusz Grabiec

Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk o Ziemi Katedra Geomorfologii ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec

e.mail: m.grabiec@ultra.cto.us.edu.pl

S. Kędzia

Zakład Badań Geośrodowiska Instytut Geografi i i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego Polska Akademia Nauk ul. Św. Jana 22, 31-018 Kraków

e-mail: kedzia@zg.pan.krakow.pl