

Maciej Dąbski

Zakład Geomorfologii, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych
Uniwersytet Warszawski
Warszawa

**LICHENOMETRYCZNA ANALIZA
ROZKŁADU CZĘSTOŚCI JAKO METODA DATOWANIA
MOREN LODOWCA FLÁA (SE ISLANDIA)**

**LICHENOMETRIC SIZE-FREQUENCY DISTRIBUTION
AS A TOOL IN FLÁAJÖKULL MORAINES DATING
(SE ICELAND)**

Zarys treści: W artykule zaprezentowano wyniki badań lichenometrycznych, przeprowadzonych na wcześniej wydатовanych wałach morenowych lodowca Fláa na Islandii. Ich wynikiem są ważne spostrzeżenia, nawiązujące do możliwości wykorzystywania krzywej lichenometrycznej T. Bradwella (2004). Daty otrzymane przez autora mają stosunkowo wysoki stopień zgodności z datami z wcześniejszego datowania, opartego na danych glaciologicznych, kartograficznych i historycznych (Dąbski 2002). Potwierdzono też wystąpienie maksimum zasięgu lodowca Fláa podczas małej epoki lodowej pod koniec XIX w.

Słowa kluczowe: datowanie lichenometryczne, moreny, Islandia

Key words: Lichenometric dating, maraines, Iceland

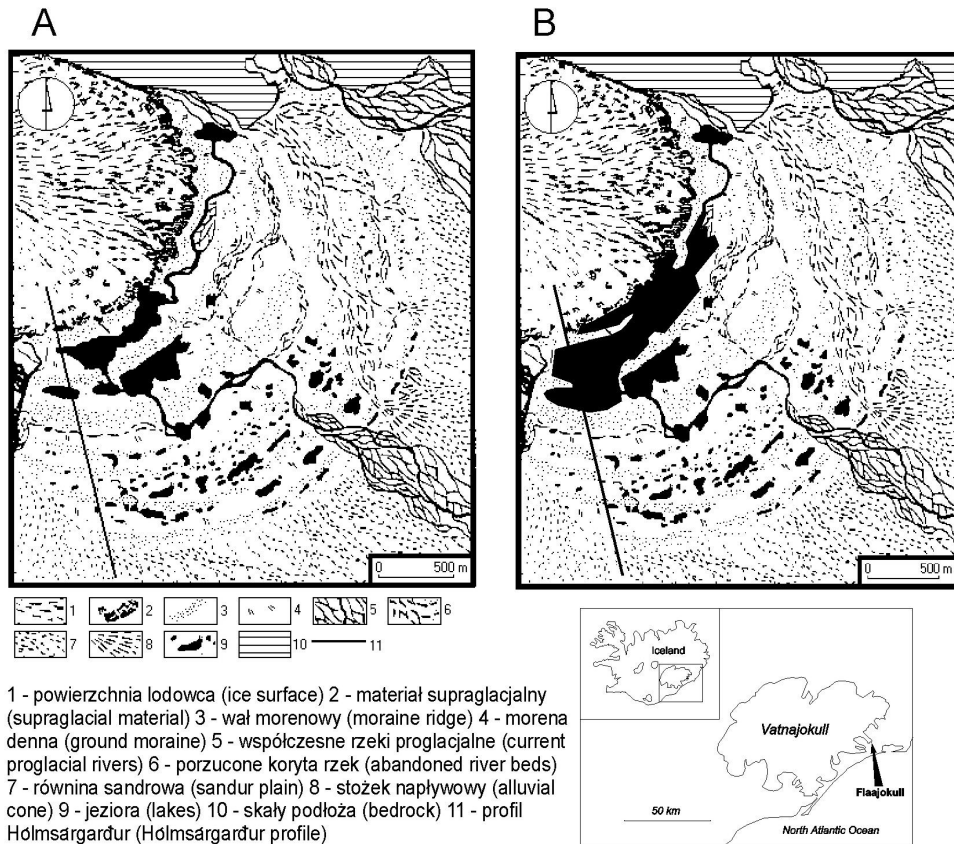
Wstęp

Metoda lichenometryczna po raz pierwszy użyta została w geomorfologii przez R. Beschela (1950) do datowania moren 24 różnych lodowców w Alpach. Od tego czasu metoda ta było wielokrotnie stosowana i rozwijana (Lock i in. 1979, Innes 1982, 1983a, b, 1985, Caseldine 1990, 1991, Evans i in. 1999). J.B. Benedict (1967, 1985) jako pierwszy zastosował analizę opartą na rozkładzie częstości pomierzonych plech porostów. Ostatnio T. Bradwell (2004) skonstruował dla obszaru południowo-wschodniej Islandii uniwersalną krzywą lichenometryczną, która została przetestowana przez K.M. McKinzey i in. (2004) w badaniach wieku moren lodowców Skálafells i Heinabergs, a w polskiej literaturze została opisana przez M. Dąbskiego (2005a). Wspomniani badacze po przedyskutowaniu różnych lichenome-

trycznych metod stosowanych wcześniej doszli do wniosku, że najlepsze wyniki osiąga się, stosując zarówno metodę wykorzystującą analizę największych plech porostów (metoda tradycyjna), jak i metodę opartą na analizie gradientu rozkładu częstości pomierzonej populacji porostów.

W Polsce lichenometrię stosuje się do datowania tatrzańskich piargów i spływów gruzowych (Kotarba 1988, 2001, 2004) oraz beskidzkich osuwisk (Bajgier 1992; Bajgier-Kowalska 2002, 2003). Niewiele miejsca poświęca się jednak na dyskusję nad samą metodą lichenometryczną.

Na temat wieku moren lodowca Fláa (SE Islandia) wypowiedali się: K. Jaksch (1975), S. Snorrason (1984), M. Dąbski i in. (1998) oraz M. Dąbski (2002). W ostatniej z wymienionych prac zawarto wnioski, że lichenometryczne datowanie może być



Ryc. 1 Położenie strefy marginalnej lodowca Fláa w SE Islandii. A – szkic geomorfologiczny na podstawie zdjęcia lotniczego z 1989 r. (Dąbski i in. 1998). B – przybliżony zasięg zalewey powstałego wskutek otwarcia się nowej bramy lodowcowej na wiosnę 2001 r.

Fig. 1. Location of the Fláajökull marginal zone in SE Iceland. A – geomorphological sketch based on an aerial photographs from 1989 (Dąbski et al. 1998), B – rough range of flooded area after opening of a new glacier gate in spring 2001

obarczone znacznym błędem wynikającym z niepewności co do tempa wzrostu porostów oraz z niestabilnych warunków środowiskowych. W pracy M. Dąbskiego (2002) znajduje się porównanie danych glaciologicznych, kartograficznych i historycznych z datami lichenometrycznymi otrzymanymi przez uśrednianie 5 największych plech porostu *Rhizocarpon*, zgodnie z metodą stosowaną przez D.J.A. Evansa i in. (1999), który w ten sposób datował moreny sąsiednich lodowców.

Celem tej pracy jest przedstawienie i przedyskutowanie wyników nowego lichenometrycznego datowania moren lodowca Fláa z zastosowaniem analizy gradientu rozkładu częstości plech z rodzaju *Rhizocarpon*, pomierzonych latem 2005 r. Dodatkowo przedstawiono zróżnicowanie populacji porostów w zależności od ekspozycji powierzchni kamieni, na których występują plechy.

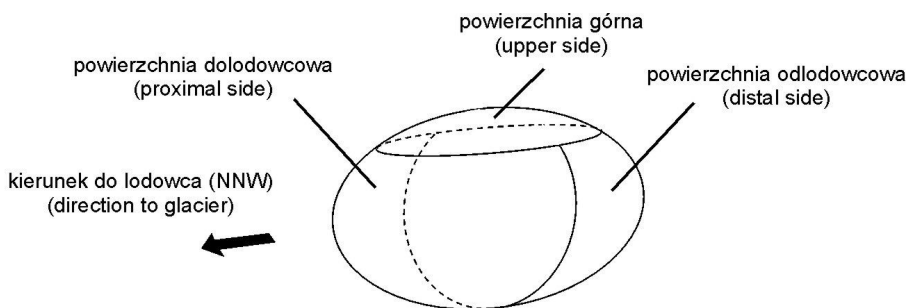
Teren badań

Lodowiec Fláa (Fláajökull) wypływa na południe z czaszy lodowej Vatna (Vatnajökull), a jego strefa marginalna wraz z morenami znajduje się na wysokości 50-80 m n.p.m. (ryc. 1). Wschodni łob tego lodowca usypał wyraźne wały czołowomorenowe, które od strony zachodniej sąsiadują z morenami lodowców Heinabergs (Heinabergsjökull) i Skalafells (Skalafellsjökull). Lodowce te w latach 1860-1870 tworzyły wraz z Fláajökull jedną wspólną stopę piedmontową (Evans i in. 1999). Rycina 1 (A i B) pokazuje sytuację przed otwarciem i po otwarciu się na wiosnę 2001 r. nowej bramy lodowcowej, która przyczyniła się do usypania grobli i zatopienia znacznej części strefy marginalnej lodowca.

Metody badań

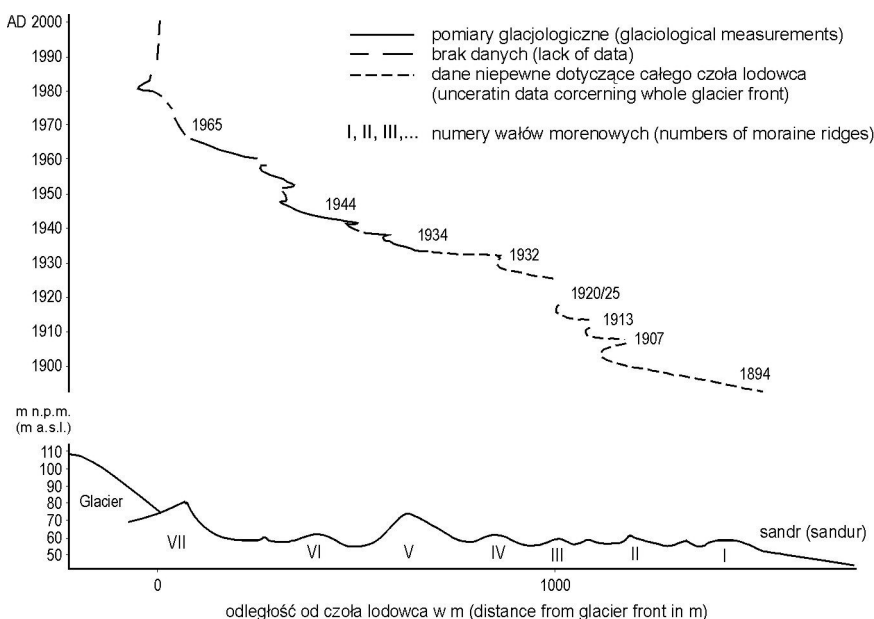
Pomiary porostów z rodzaju *Rhizocarpon* odbyły się latem 2005 r. z zastosowaniem następujących reguł: 1) mierzono jedynie najdłuższe osie (średnice okręgów opisanych) izolowanych plech o względnie okrągłych kształtach; 2) pomiary dokonywane były z użyciem linijki z dokładnością do 1 mm; 3) pola, w których mierzono porosty, wyznaczono wzdłuż grzbietów 5 różnowiekowych wałów morenowych; każde z pól miało powierzchnię 6000 m² (20 x 300 m); 4) mierzono tylko względnie największe napotkane plechy i równocześnie odnotowywano ekspozycję powierzchni kamienia, na której porost występował: powierzchnia dolodowcowa (N), odlodowcowa (S) lub górna (ryc. 2); 5) pomiarów dokonywano na wszystkich typach skał, głównie na bazaltach, dolerytach i diabazach. Na każdym wale pomierzono od 497 do 942 plech porostów, a całkowita liczba pomiarów wyniosła 3877.

Procedura przetwarzania danych była taka, jaką stosowali T. Bradwell (2004) oraz K.M. McKinzey i in. (2004). Plechy podzielono na klasy co 3 mm i wykreślono histogramy rozkładu częstości dla każdej populacji. Następnie obliczono logarytm (u podstawy 10) z wartości częstości (wyrażonych w %), przy czym odrzucono porosty mniejsze od klasy o największej modzie. Dalej wykreślono krzywe regresji, stosując metodę najmniejszych kwadratów. Zgodnie z założeniami metody, im bardziej



Ryc. 2. Odnutowywane powierzchnie kamienia porośnięte przez mierzone plechy
 Fig. 2. Noted sides of stones on which lichens were measured

nachylona (stroma) jest ta krzywa, tym młodsza jest populacja porostów, zatem do dalszego postępowania wzięto gradienty rozkładów częstości (parametry m) ze wzorów krzywych regresji $y = mx + c$ (Dąbski 2005a). Gradienty pomnożono przez -1 i odniesiono do krzywej opracowanej przez T. Bradwella (2004) dla południowo-wschodniej Islandii. Taka procedura została zastosowana dla całych pomierzonych populacji porostów na każdym z wałów morenowych, a także oddzielnie dla populacji porostów występujących na dolodowcowych, odlodowcowych i górnych powierzchniach kamieni.



Ryc. 3. Przekrój topograficzny przez profil *Hólmsárgarður* (ryc. 1) i recesja lodowca Fláa (Dąbski 2002). Rysunek wykonany na podstawie stereoskopowej pary zdjęć lotniczych z 1989 r.
 Fig. 3. Topographic cross-section along the *Hólmsárgarður* profile (Fig. 1) and recession of Fláa-jökull (Dąbski 2002). Drawing based on stereoscopic pair of aerial photographs from 1989

Otrzymane daty lichenometryczne zostały zestawione z datami otrzymanymi z wcześniejszych badań wieku moren lodowca Fláa (Dąbski 2002; ryc. 3), które opierały się na: bezpośrednich pomiarach położenia czoła lodowca (co roku publikowanych przez Islandzkie Towarzystwo Glacjologiczne w czasopiśmie *Jökull*), porównaniu mapy topograficznej w skali 1:50 000 opracowanej na podstawie zdjęć lotniczych z 1946 r. ze zdjęciem lotniczym z 1989 r., materiałach historycznych (Ahlmann, Thorarinsson 1937, Thorarinsson 1943, Denton 1975) oraz na porównaniu z wynikami datowań stref marginalnych sąsiednich lodowców (Bradwell 2001, Jaksch 1975, Gordon, Sharp 1983, Kirkbridge, Dugmore 2001, Snorrason 1984, Maizels, Dugmore 1985, Thompson, Jones 1986, Thomson 1988, Evans i in. 1999).

Wyniki

Pomierzone populacje porostów na wałach morenowych I, II, III i IV (numer I oznacza najstarszy wał) są złożone i zawierają pojedyncze bardzo duże plechy, które powodują, że gradient częstości, tak jak i wskaźnik korelacji (R^2) mają niskie wartości (ryc. 4, linie ciągłe; tab. 1A). Wyjątkowo duża plecha (o średnicy 150 mm) na morenie III sugeruje, że ta powierzchnia jest starsza niż powierzchnia moreny II, co jest oczywiście niemożliwe. Z kolei pojedyncza największa plecha na morenie I sugeruje, że jej wzrost rozpoczął się, zanim powstał ten wał morenowy. Ta wyjątkowo duża plecha może być odziedziczona z okresu transportu supraglacialnego (Griffey 1978), jednakże Fláajökull nie ma żadnej znaczącej moreny środkowej, która umożliwiałaby taki transport przy względnie ustabilizowanym materiale powierzchniowym. Porost ten mógł być zatem inkorporowany do wału morenowego ze starszej powierzchni występującej przed wałem.

Tabela 1

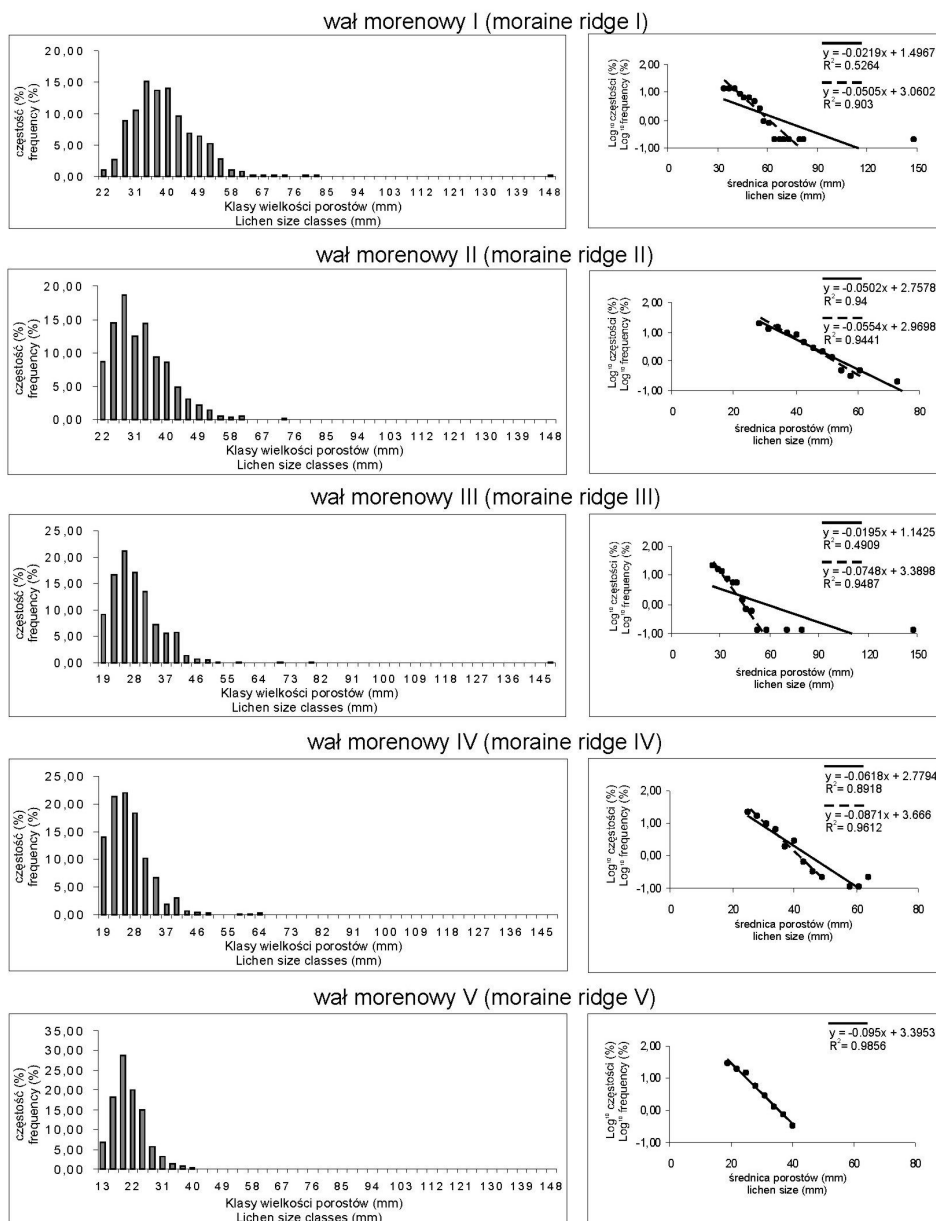
Zestawienie gradientów rozkładów częstości ($x - 1$), wartości R^2 oraz liczby pomierzonych porostów dla: A) całych populacji porostów, B) dla populacji bez wyjątkowo dużych plech
 Frequency gradients ($x - 1$), R^2 values and number of measured lichens for: A) the whole lichen populations, B) populations without exceptionally large lichens

A

morena	grad. (-1)	R2	n
I	0,0219	0,5264	497
II	0,0502	0,9400	942
III	0,0195	0,4909	702
IV	0,0618	0,8918	846
V	0,0950	0,9856	890

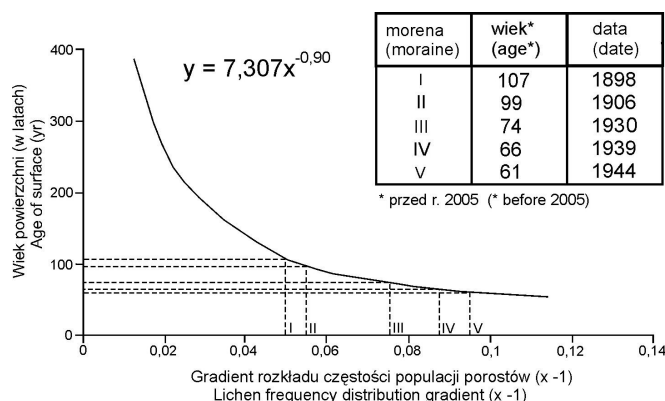
B

morena	grad. (-1)	R2	n
I	0,0505	0,9030	496
II	0,0554	0,9441	940
III	0,0748	0,9487	701
IV	0,0871	0,9612	842
V	0,0950	0,9856	890



Ryc. 4. Rozkłady częstości plech porostów oraz krzywe regresji rozkładów częstości (Bradwell 2004) dla poszczególnych moren lodowca Flåa – ryc. 3 (wał I jest najstarszy). Linie ciągłe – krzywe regresji dla całych populacji, linie przerywane – krzywe regresji dla populacji bez wyjątkowo dużych plech

Fig. 4. Lichen size-frequency distributions and plots according to Bradwell (2004) for consecutive Flåajökull moraine – fig. 3 (ridge I is the oldest). Solid lines – regression lines for the whole populations, dashed lines – regression lines for populations without exceptionally large lichens



Ryc. 5. Krzywa służąca do datowania porostowego (opracowana przez Bradwella 2004) i wynikające z niej daty formowania się wałów morenowych lodowca Fláa

Fig. 5. Lichen dating curve (according to Bradwell 2004) and dates of Fláajökull moraine ridges formation

W celu otrzymania sensownych wyników postanowiono odrzucić największe plechy w następujący sposób. Jeżeli w rozkładzie częstości danej populacji występuje przerwa szerokości co najmniej dwóch klas (6 mm), wtedy odrzucone zostają wszystkie plechy występujące na prawo od tej przerwy (plechy większe). Po dokonaniu takiego zabiegu wykreślono nowe krzywe regresji (ryc. 4, krzywe przerywane). Nowe gradienty rozkładu częstości dają się wówczas zestawić w sensowny ciąg (ryc. 4, tab. 1B). Wartości wskaźnika korelacji (R^2) także układają się logicznie i rosną od najstarszej do najmłodszej moreny (tab. 1B). Populacja porostów zmierzona na wale morenowym V ma strukturę prostą, nie zawiera żadnych wyjątkowo dużych plech i dlatego opisana powyżej procedura redukcji populacji nie musiała być zastosowana.

Gradienty rozkładu częstości (po dokonaniu opisanej redukcji) odniesiono do krzywej opracowanej przez T. Bradwella (2004) o wzorze: $y = 7,307 x^{-0,9}$, co umożliwiło obliczenie wieku moren (ryc. 5). Nowe daty powstania starszych moren są bardzo podobne do dat otrzymanych podczas wcześniejszych badań (Dąbski 2002; ryc. 3), jednakże w przypadku wałów młodszych istnieją rozbieżności (tab. 2).

Wyniki analizy gradientu rozkładu częstości populacji porostów z wyszczególnieniem populacji rosnących na dolodowcowych, odlodowcowych i górnych powierzchniach kamieni są przedstawione na rycinach 6-11. Zaobserwowano następujące regularności:

- 1) porosty rosnące na dolodowcowych (północnych) powierzchniach kamieni stanowią najmniejsze populacje na każdej morenie. Jednakże procentowy udział tych porostów w ogólnej liczbie pomierzonych plech na każdym z wałów wzrasta od 16-19% do 26%, ku coraz starszym morenom;

- 2) poza jednym wyjątkiem – najstarszego wału – największe plechy występują na ciepłych (górnym lub odlodowcowym i południowym) powierzchniach kamieni;
- 3) populacje na powierzchniach dolodowcowych wykazują najmniejszy gradient rozkładu częstości w stosunku do pozostałych populacji na morenach młodych. Ku morenom starszym gradient ten się stosunkowo zwiększa i na najstarszej morenie jest największy (ryc. 11), co sugeruje, że cecha ta jest zależna od wieku moren;
- 4) populacja dolodowcowa na każdej morenie charakteryzuje się najmniejszymi wartościami wskaźnika korelacji R^2 .

Tabela 2

Zestawienie największych porostów oraz daty formowania wałów morenowych lodowca Fláa, obliczone różnymi lichenometrycznymi metodami

Largest lichens and dates of Fláajökull moraine ridges formation according to different lichenometric methods

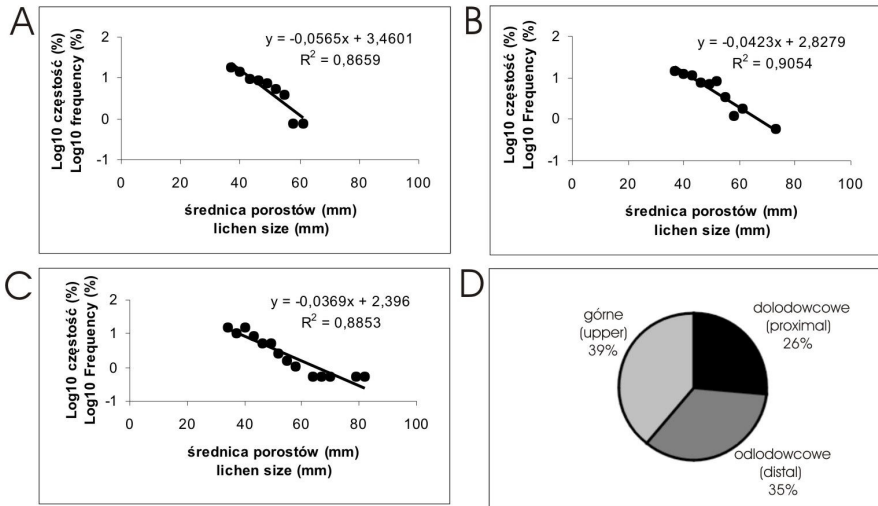
wał morenowy (moraine ride)	I	II	III	IV	V
SL	150	74	150	66	40
SL*	83	74	80	66	40
1-in-1000	80	72	59	54	46
5	83, 80, 73, 70, 69	74, 73, 63, 63, 62	80, 70, 60, 59, 53	66, 64, 62, 58, 51	40, 40, 40, 39, 39
average 5	75	67	64,4	60,2	39,6
A	1905	1915	1918	1923	1949
B	1791	1832	1806	1862	1927
C	1804	1841	1884	1898	1915
D	1898	1906	1930	1939	1944
E	1870/94	1907	1920/25	1932/33	1934/35

SL – największa plecha; SL* – największa plecha bez pojedynczej wyjątkowo dużej (o średnicy 150 mm); 1-in-1000 – pojedyncza przewidywana plecha (Lock i in. 1979); 5 – 5 największych plech (bez wyjątkowo dużych); average 5 – średnia z 5 największych plech; A – daty obliczone metodą stosowaną przez Evansa i in. (1999), na podstawie średniej z 5 największych plech; B – daty obliczone z zastosowaniem krzywej Bradwella (2001) na podstawie pojedynczej największej plechy; C – daty obliczone z zastosowaniem krzywej Bradwella (2001) oraz pojedynczej przewidywanej plechy “1-na-1000” (Lock i in. 1979); D – daty uzyskane w tym badaniu, obliczone z zastosowaniem gradientu rozkładu częstości (Bradwell 2004) z redukcją opisaną w tekście; E – daty otrzymane w poprzednim badaniu (Dąbski 2002)

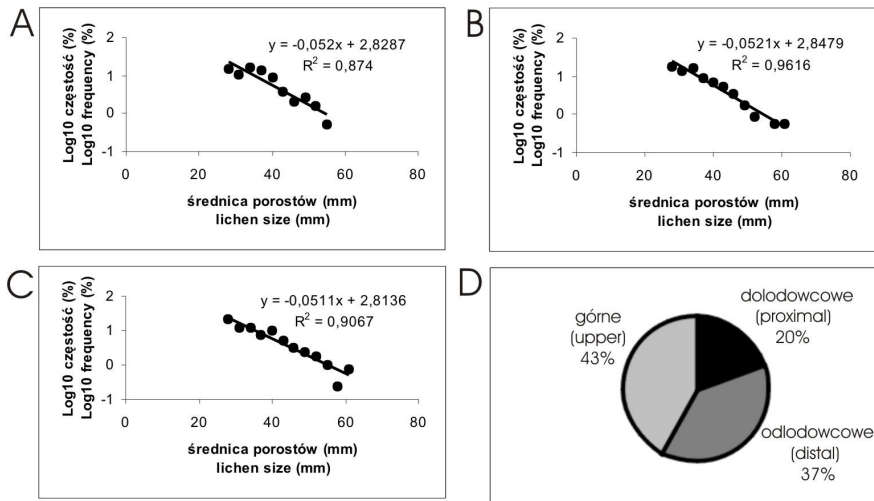
L – largest thallus; SL* – largest thallus without single exceptionally large lichens (diameter 150 mm); 1-in-1000 – the single predicted thallus (Lock et al. 1979); 5 – 5 largest thalli (without exceptionally large ones); average 5 – average of 5 largest thalli; A – dates calculated with the method used by Evans et al. (1999) based on average of 5 largest thalli; B – dates calculated with use of the Bradwell’s (2001) dating curve (based on single largest thallus); C – dates calculated with use of the Bradwell’s (2001) dating curve and use of predicted “1-in-1000” thallus (Lock et al. 1979); D – dates obtained in this research, calculated with use of the frequency gradient (Bradwell 2004) with reduction described in the text; E – dates obtained in the previous research (Dąbski 2002)

Dyskusja

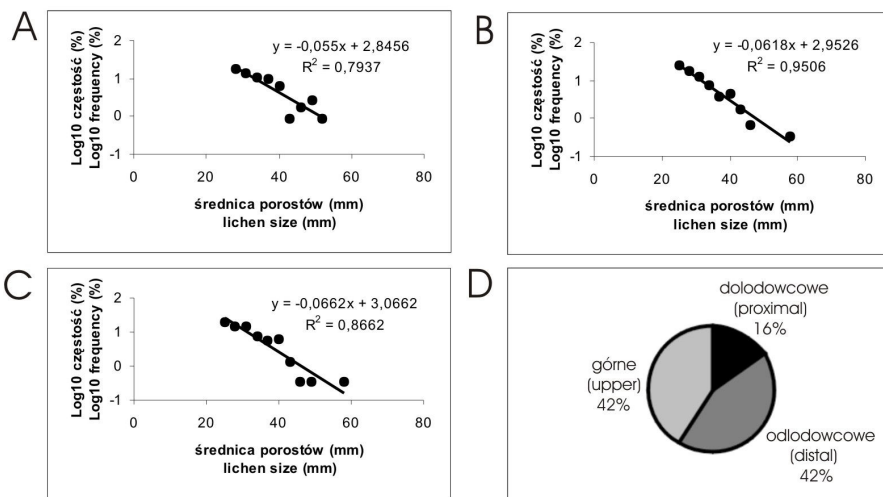
T. Bradwell (2004) oraz K.M. McKinzey i in. (2004) otrzymali lichenometryczne gradienty rozkładu częstości dla moren lodowców w południowo-wschodniej Islandii, wykorzystując do analizy plechy nie mniejsze od klasy modalnej (także te pojedyncze największe porosty). Jednakże dla jednej z moren Hólárjökull T. Bradwell (2004)



Ryc. 6. Statystyki populacji porostów na I wale morenowym lodowca Fláa. A – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji dolodowcowych, B – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji odlodowcowych, C – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji na górnych powierzchniach kamieni, D – udział poszczególnych populacji w ogólnej liczbie porostów
 Fig. 6. Lichen population statistics for Fláajökull moraine ridge I. A – size-frequency plots for proximal sides of stones, B – size-frequency plots for distal sides of stones, C – size-frequency plots for upper sides of stones, D – share of proximal, distal and upper populations in the total number of measured lichens

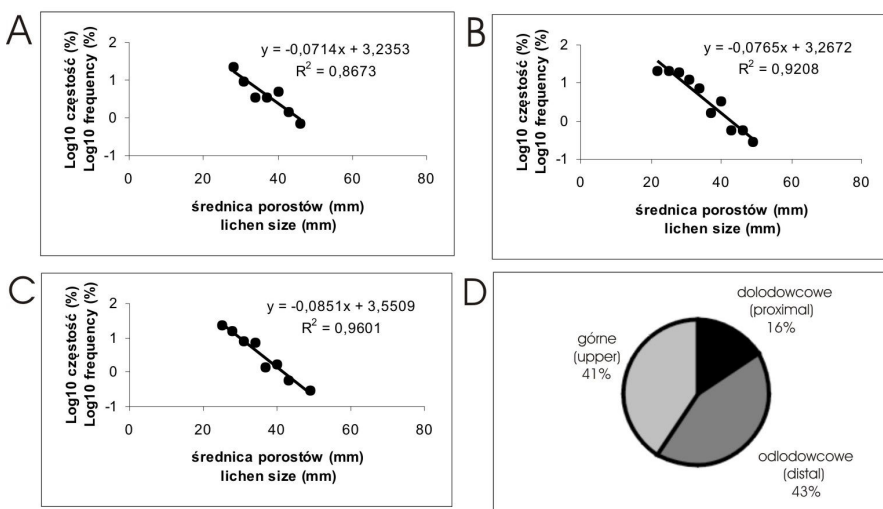


Ryc. 7. Statystyki populacji porostów na II wale morenowym lodowca Fláa. A – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji dolodowcowych, B – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji odlodowcowych, C – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji na górnych powierzchniach kamieni, D – udział poszczególnych populacji w ogólnej liczbie porostów
 Fig. 7. Lichen population statistics for Fláajökull moraine ridge II. A – size-frequency plots for proximal sides of stones, B – size-frequency plots for distal sides of stones, C – size-frequency plots for upper sides of stones, D – share of proximal, distal and upper populations in the total number of measured lichens



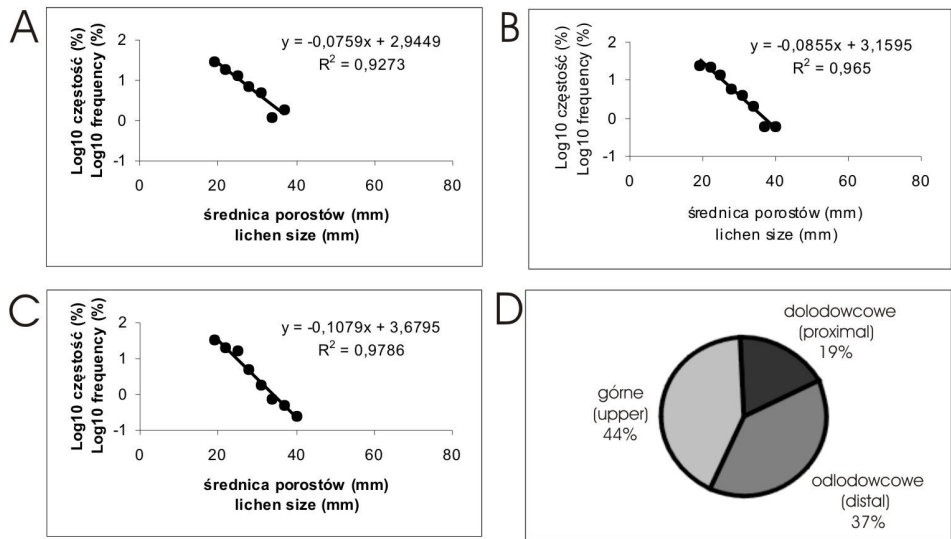
Ryc. 8. Statystyki populacji porostów na III wale morenowym lodowca Fláá. A – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji dolodowcowych, B – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji odlodowcowych, C – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji na górnych powierzchniach kamieni, D – udział poszczególnych populacji w ogólnej liczbie porostów

Fig. 8. Lichen population statistics for Fláajökull moraine ridge III. A – size-frequency plots for proximal sides of stones, B – size-frequency plots for distal sides of stones, C – size-frequency plots for upper sides of stones, D – share of proximal, distal and upper populations in the total number of measured lichens



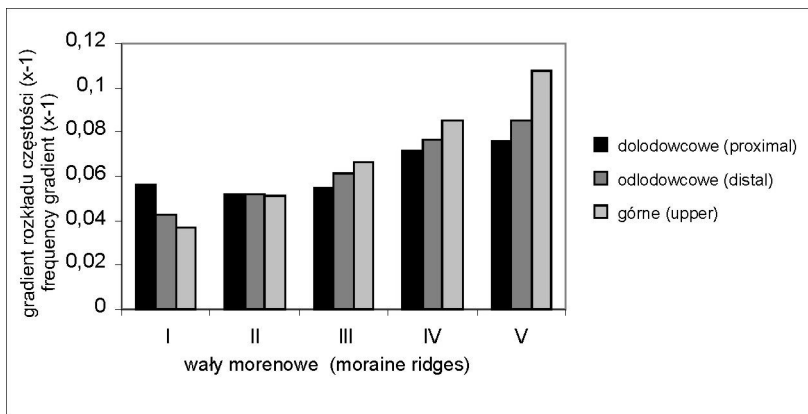
Ryc. 9. Statystyki populacji porostów na IV wale morenowym lodowca Fláá. A – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji dolodowcowych, B – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji odlodowcowych, C – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji na górnych powierzchniach kamieni, D – udział poszczególnych populacji w ogólnej liczbie porostów

Fig. 9. Lichen population statistics for Fláajökull moraine ridge IV. A – size-frequency plots for proximal sides of stones, B – size-frequency plots for distal sides of stones, C – size-frequency plots for upper sides of stones, D – share of proximal, distal and upper populations in the total number of measured lichens



Ryc. 10. Statystyki populacji porostów na V wałe morenowym lodowca Fláa. A – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji dolodowcowych, B – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji odlodowcowych, C – krzywa regresji rozkładu częstości dla populacji na górnych powierzchniach kamieni, D – udział poszczególnych populacji w ogólnej liczbie porostów

Fig. 10. Lichen population statistics for Fláajökull moraine ridge V. A – size-frequency plots for proximal sides of stones, B – size-frequency plots for distal sides of stones, C – size-frequency plots for upper sides of stones, D – share of proximal, distal and upper populations in the total number of measured lichens



Ryc. 11. Gradienty rozkładów częstości dla populacji porostów: dolodowcowych, odlodowcowych i występujących na górnych powierzchniach kamieni

Fig. 11. Frequency gradients of lichens' populations on: proximal, distal and upper sides of stones

otrzymał niewłaściwy wiek z powodu pojedynczej największej plechy, która powinna zostać, jego zdaniem, pominięta. Jeżeli weźmie się pod uwagę wszystkie największe plechy występujące na morenach Fláajökull, otrzymane daty w sposób oczywisty stają się niewłaściwe, gdyż wał III nie może być starszy niż wał II (ryc. 3, 4). Względnie wysokie podobieństwo pomiędzy poprzednio otrzymanymi datami (Dąbski 2002) dla wałów I-IV oraz datami otrzymanymi z pominięciem największych plech wskazuje na słuszność dokonanego zabiegu ograniczenia danych wyjściowych do analizy gradientu częstości. Niewielkie, jednak stałe obniżanie się wartości wskaźnika korelacji R^2 w kierunku najstarszego wału morenowego jest logiczne i daje się wytłumaczyć rosnącym wiekiem populacji porostów. T. Bradwell (2004) oraz K.M. McKinzey i in. (2004), badając moreny Fjallsjökull, Hólárjökull, Skálafellsjökull i Heinabergsjökull (sąsiadujące z morenami Fláajökull), odkryli taką samą zależność R^2 od wieku moren. Należy podkreślić, że jeżeli weźmie się do analizy także największe plechy występujące na morenach Fláajökull, to ani wartości gradientu częstości, ani wskaźnika R^2 nie będą układały się w logiczne ciągi. Metoda odrzucenia największych plech pozwala na uzyskanie sensownych dat dla badanych moren (tab. 2).

Zastosowana w odniesieniu do wału morenowego V metoda pozwoliła uzyskać datę AD 1944, która jest o 9-10 lat młodsza od daty uzyskanej w poprzednim badaniu (Dąbski 2002; tab. 2). Ta rozbieżność nie jest spowodowana redukcją największych plech, gdyż na tym wale takie nie występują (ryc. 4). Materiał powierzchniowy na wale V został zdeponowany w latach 1934/35, co wiadomo na podstawie bezpośrednich pomiarów glaciologicznych (Sigurdsson 2000), prowadzonych wzdłuż profilu *Hólmsárgarður*, położonego w południowo-zachodniej części badanych moren (Dąbski 2002). Data ta określa zatem położenie czoła dokładnie wzdłuż tego profilu. Glaciologiczne pomiary wykazały w roku 1941 transgresję czoła o 59 m, po której nastąpiła dalsza recesja. Biorąc pod uwagę następujące fakty: 1) pole testowe dla pomiarów lichenometrycznych obejmowało aż 300 m długości grzbiety wału, 2) czoło lodowca Fláa charakteryzuje się licznymi, bardzo małymi lobami, 3) w 1941 r. doszło do wspomnianego wahnięcia położenia czoła, trzeba stwierdzić, że kilkuletnia niedokładność w określeniu wieku materiału powierzchniowego V wału morenowego wydaje się usprawiedliwiona.

Różnice pomiędzy datami otrzymanymi przez uśrednianie 5 największych plech (Evans i in. 1999) a datami otrzymanymi w tym badaniu i w badaniu poprzednim (Dąbski 2002; tab. 2 A, D, E) wynikają z różnic metodycznych. Możliwa niestabilność powierzchni moreny wynikająca ze zróżnicowanego tempa wytapiania się zagrzebanego lodu (Everest, Bradwell 2003) może przyczyniać się do rozbieżności w datach, jednakże bryły zagrzebanego lodu lodowcowego zostały odkryte jedynie na najmłodszym wale morenowym Fláajökull. Innymi utrudnieniami w lichenometrycznym datowaniu tych moren są: niepewność co do czasu opóźnienia kolonizacji (czasu wkroczenia pierwszych porostów po depozycji moreny), zmieniające się warunki środowiskowe (głównie klimatyczne) oraz procesy peryglacialne (Dąbski, Gryglewicz 1998, Dąbski 2002, 2005b).

Daty otrzymane z użyciem krzywej T. Bradwella (2001), opierającej się na pojedynczej największej plechy (ale z pominięciem pojedynczej wyjątkowo dużej plechy),

sugerują, że wały moreny Fláajökull o numerach: I, II, III i IV zostały zdeponowane w XIX w. (tab. 2B), co w świetle innych danych (Dąbski 2002; tab. 2E) wydaje się niemożliwe. Ekstrapolacja krzywej regresji na wykresie rozkładu częstości pozwoliła na uzyskanie „1 na 1000” (ang. 1-in-1000) plechy w każdej z populacji (tab. 2; Lock i in. 1979). Daty obliczone z wykorzystaniem tej metody i z użyciem krzywej T. Bradwella (2001; tab. 2C), wskazują, że najstarszy wał morenowy Fláajökull został opuszczony przez lodowiec na początku XIX w., co byłoby argumentem potwierdzającym wyniki badań K.M. McKinzey i in. (2004). Jednakże tak otrzymane daty nie mogą zostać zaakceptowane ze względu na to, że nie zgadzają się z bezpośrednimi pomiarami glaciologicznymi w przypadku wału V (ryc. 3; tab. 2E).

Lodowce wypływające na południe z czaszy Vatna podczas małej epoki lodowej osiągnęły swoje maksymalne pozycje pod koniec XIX w., jak sądzą H.W. Ahlmann i S. Thorarinsson (1937), S. Thorarinsson (1943), H.J. Guðmundsson (1997) oraz D.J.A. Evans i in. (1999). Z poglądem tym nie zgadzają się M.P. Kirkbridge i A.J. Dugmore (2001), T. Bradwell (2001, 2004) oraz K.M. McKinzey i in. (2004), którzy obliczają wiek najstarszych moren czołowych tych lodowców na wcześniejszy. K.M. McKinzey i in. (2004) uważają jednak, że Skálafellsjökull osiągnął swoją maksymalną pozycję na początku XIX w., natomiast sąsiadujący z nim od wschodu Heinabergsjökull nieco później. Biorąc zatem pod uwagę fakt, że Fláajökull jest kolejnym lodowcem występującym na wschód od Heinabergsjökull, wydaje się prawdopodobne, że lodowiec ten osiągnął swoje maksimum jeszcze później – pod koniec XIX w. (na co wskazują wyniki niniejszego badania lichenometrycznego). Ta sekwencja w transgresjach poszczególnych sąsiadujących ze sobą lodowców może być wytłumaczona stopniowym przemieszczaniem się w kierunku północno-wschodnim strefy zwiększonej akumulacji śniegu na polu firnowym Vatnajökull.

Mała liczba porostów występujących na dolodowcowych stronach kamieni (ryc. 6-10D) może być efektem panujących warunków mikroklimatycznych (ekspozycja NNW, wpływ katabatycznych wiatrów lodowcowych), które mogą niekorzystnie wpływać na rozwój porostów. Ocienione strony gładów w Północnej Walii mają także stosunkowo niewielkie pokrycie plechami *Rhizocarpon* (Pentecost 1979). Jednakże na młodych morenach Fláajökull dolodowcowe populacje porostów mają najmniejszy gradient częstości (ryc. 11) oraz najmniejsze wartości wskaźnika korelacji R^2 , co wskazuje na ich starszy wiek w porównaniu z populacjami występującymi na odlodowcowych i górnych częściach kamieni. Wynika z tego, że pionierskie plechy kolonizują najpierw strony zacienione kamieni (dolodowcowe), ale później ich liczba ustępuje szybko rosnącej populacji porostów na ciepłych stronach kamieni. Wyniki te zgadzają się z wynikami R.A. Armstronga (2002), który wykazał, że ściany skalne o ekspozycji północno-zachodniej szybciej pokrywają się młodymi plechami *Rhizocarpon geographicum* w porównaniu ze ścianami o ekspozycji południowo-wschodniej, ale równocześnie śmiertelność wśród plech porastających ściany północne jest większa. W stronę coraz starszych wałów morenowych różnice pomiędzy poszczególnymi populacjami pomierzonych plech maleją. Zastanawiające jest odwrócenie się wspomnianej tendencji zmiany gradientu częstości oraz „odmłodzenie” polodowcowej populacji porostów na najstarszym wale morenowym (ryc. 11). Wytłumaczenie tego zjawiska wymaga przeprowadzenia dalszych szczegółowych badań.

Wnioski

Lichenometryczna krzywa T. Bradwella (2004) opracowana dla południowo-wschodniej Islandii, opierająca się na gradiencie rozkładu częstości, została przetestowana na wcześniej wydatowanych wałach morenowych lodowca Fláa. Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski:

1. Wyjątkowo duże plechy z rodzaju *Rhizocarpon*, dające się przedstawić jako prawe krańce wykresu rozkładu częstości populacji porostów, nie powinny być brane do datowania moren z wykorzystaniem krzywej T. Bradwella (2004). Dla moren Fláajökull wydaje się właściwe odrzucenie wszystkich plech występujących na prawo od pierwszej (najbliżej do klasy modalnej) przerwy w wykresie rozkładu częstości szerokości co najmniej 6 mm. Tylko taki zabieg pozwala osiągnąć logiczną sekwencję wiekową datowanych moren. Daty otrzymane na podstawie przeprowadzonej w ten sposób analizy rozkładu częstości porostów mają stosunkowo wysoki stopień zgodności z datami z wcześniejszego datowania, opartego na danych glaciologicznych, kartograficznych i historycznych (Dąbski 2002).
2. Potwierdza się wystąpienie maksimum zasięgu lodowca Fláa podczas małej epoki lodowej pod koniec XIX w.
3. Metoda analizy gradientu rozkładu częstości populacji porostów z rodzaju *Rhizocarpon* pozwala uchwycić różnice pomiędzy populacjami porostów z zależności od ekspozycji ścian kamieni. Wyniki analizy wskazują, że badane porosty szybciej wkraczają na zacienione części kamieni, ale później ich liczba ustępuje gwałtownie rozwijającej się populacji porostów na ciepłych stronach kamieni. Wyniki przeprowadzonej analizy lichenometrycznej rzucają nowe światło na pytanie wysunięte przez R.H. Haines-Young (1983), dotyczące ekologicznych uwarunkowań rozwoju porostów służących do lichenometrycznego datowania w geomorfologii.

Podziękowania

Autor pragnie podziękować uczestnikom wyprawy na Islandię, zorganizowanej przez 99. Warszawską Drużynę Wędrowniczą „Druidzi”, za pomoc w żmudnych pomiarach lichenometrycznych. Szczególnej pomocy w badaniach terenowych i w dyskusji nad wynikami udzielili: Julia Budziszewska, Janek Kaseja oraz Aleksander Tittenbrun, za co Im serdecznie dziękuję. Przeprowadzenie badań terenowych było możliwe dzięki finansowej pomocy Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych UW oraz dzięki firmie Leclerc.

Literatura

Ahlmann H.W., Thorarinsson S., 1937, *Previous investigations of Vatnajökull, Marginal oscillations of its Outlet-Glaciers and General Description of its Morphology*, Geografiska Annaler, 19 A, s. 176-211

- Armstrong R.A., 2002, *The effect of rock surface aspect on growth, size structure and competition in the lichen Rhizocarpon geographicum*, Environmental and Experimental Botany, 48, s. 187-194
- Bajgier M., 1992, *Zastosowanie lichenometrii w datowaniu osuwisk w Beskidzie Śląskim*, Annales Societatis Geologorum Poloniae, 62, s. 339-346
- Bajgier-Kowalska M., 2002, *Zastosowanie lichenometrii w datowaniu stoków osuwiskowych w Beskidzie Żywieckim (Karpaty fliszowe)*, Czasopismo Geograficzne, 73, 3, s. 215-230
- Bajgier-Kowalska M., 2003, *The application of lichenometry in dating of the landslide slopes in the Flysch Carpathians*, Geomorfologia Slovaca, 3, 1, s. 16-18
- Benedict J.B., 1967: *Recent glacial history of an alpine area in the Colorado Front Range, USA. I. Establishing a lichen growth curve*, Journal of Glaciology, 6, s. 817-832
- Benedict J.B., 1985, *Arapaho Pass: glacial geology and archeology at the crest of the Colorado Front Range*, Center for Mountain Archeology, Research Report, 3
- Beschel R., 1950, *Flechten als Altersmaßstab rezenter Moränen*, Zeitschrift für Gletcherkunde und Glazialgeologie, 1, s. 152-161
- Bradwell T., 2001, *A new lichenometric dating curve for southeast Iceland*, Geografiska Annaler, 83 A, s. 91-101
- Bradwell T., 2004, *Lichenometric dating in southeast Iceland: the size-frequency approach*, Geografiska Annaler, 86 A, s. 31-41
- Caseldine C.J., 1990, *A review of dating methods and their application in the development of a chronology of Holocene glacier variations in northern Iceland*. W: *Gletscher- und landschaftsgeschichtliche Untersuchungen im Nordisland*. Münchner Geographische Abhandlungen, B 8, s. 59-82
- Caseldine C. J., 1991, *Lichenometric dating, lichen population studies and Holocene glacial history in Tröllaskagi, northern Iceland*. W: *Environmental Change in Iceland: Past and Present. Glaciology and Quaternary Geology*, Dordrecht, s. 219-233
- Dąbski M., 2002, *Dating of the Fláajökull moraine ridges, SE – Iceland; comparison of the glaciological, cartographic and lichenometrical data*, Jökull, 51, s. 17-24
- Dąbski M., 2005a, *Zastosowanie lichenometrii w badaniach geomorfologicznych*, Monitoring Środowiska Przyrodniczego, 6, s. 41-45
- Dąbski M., 2005b, *Small-scale Sorted Nets on Glacial Till, Fláajökull (Southeast Iceland) and Elisbreen (Northwest Spitsbergen)*, Permafrost and Periglacial Processes, 16, s. 305-310
- Dąbski M., Gryglewicz E., 1998, *Selected forms of frost sorting in the marginal zone of Fláajökull (Iceland)*, Biuletyn Peryglacjalny, 37, s. 19-34
- Dąbski M., Fabiszewski B., Pękalska A., 1998, *Marginal zone of Fláajökull (Iceland). Initial result of Research*, Miscellanea Geographica, 8, s. 47-54
- Denton G.H., 1975, *Glaciers of Iceland*. W: *Mountain Glaciers of the Northern Hemisphere*, Vol. 2. Corps of Engineers, US Army, Hannover, s. 834-864
- Evans D.J.A., Archer S., Wilson D.J.H., 1999, *A comparison of the lichenometric and Schmidt hammer dating techniques based on data from the proglacial areas of some Icelandic glaciers*, Quaternary Science Reviews, 18, s. 13-41
- Everest J., Bradwell T., 2003, *Buried glacier ice in southern Iceland and its wider significance*, Geomorphology, 52, s. 347-358
- Gordon J.E., Sharp M., 1983, *Lichenometry in dating recent glacial landforms and deposits, southern Iceland*, Boreas, 12, s. 191-200
- Griffey N.J., 1978, *Lichen growth on supraglacial debris and its implication for lichenometric studies*, Journal of Glaciology, 20, s. 163-172
- Gudmundsson H. J., 1997, *A Review of the Holocene Environmental History of Iceland*, Quaternary Science Reviews, 16, s. 81-92

- Haines-Young R.H., 1983, *Size variation of Rhizocarpon on Moraine Slopes in Southern Norway*, Arctic and Alpine Research, 15, s. 295-305
- Innes J.L., 1982: *Lichenometric use of an aggregated Rhizocarpon species*, Boreas, 11, s. 53-57
- Innes J.L., 1983a: *Lichenometric dating of debris-flow deposits in the Scottish Highlands*, Earth Surface Processes and Landforms, 8, s. 579-588
- Innes J.L., 1983b: *Size-frequency distributions as a lichenometric technique: an assessment*, Arctic and Alpine Research, 15, s. 285-294
- Innes J.L., 1985, *Lichenometry*, Progress in Physical Geography, 9, s. 187-254
- Jaksch K., 1975, *Das Gletschervorfeld des Solheimajökull*, Jökull, 25, s. 34-38
- Kirkbridge M.P., Dugmore A.J., 2001, *Can lichenometry be used to date the "little Ice Age" glacial maximum in Iceland?*, Climatic Change, 48, s. 151-167
- Kotarba A., 1988, *Lichenometria i jej zastosowanie w badaniach geomorfologicznych w Tatrach*, Wszechświat, 89, 1, s. 13-15
- Kotarba A., 2001, *Lichenometryczne oznaczanie wieku form rzeźby wysokogórskiej*, Prace Geograficzne, 179, s. 197-208
- Kotarba A., 2004, *Holocenijskie przemiany środowiska przyrodniczego Tatr Wysokich*. W: *Przyroda-Człowiek-Bóg*, Kraków, s. 57-67
- Lock W.W., Andrews J.T., Webber P.J., 1979, *A manual for lichenometry*, British Geomorphological Research Group, Technical Bulletin, 26
- Maizels J.K., Dugmore A.J., 1985, *Lichenometric dating and tephrochronology of sandur deposits, Sólheimajökull area, southern Iceland*, Jökull, 35, s. 6978
- McKinze K.M., Orwin J.F., Bradwell T., 2004, *Re-dating the moraines at Skálafellsjökull and Heinabergsjökull using different lichenometric methods: implications for the timing of the Icelandic Little Ice Age maximum*, Geografiska Annaler, 86 A, s. 319-335
- Pentecost A., 1979, *Aspect and slope preference in a saxicolous lichen community*, Lichenologist, 11, s. 81-83
- Sigurdsson O., 2000, *Glacier variations 1930-1960, 1960-1990 and 1996-1997*, Jökull, 48, s. 63-69
- Snorrason S., 1984, *Mýrarjökklar og Vatnsdalur*, Uniwersytet Oslo, maszynopis pracy magisterskiej
- Thompson A., 1988, *Historical Development of the Proglacial Landforms of Svinafellsjökull and Skaftafellsjökull, Southeast Iceland*, Jökull, 38, s. 17-30
- Thompson A., Jones A., 1986, *Rates and causes of proglacial river terrace formation in southeast Iceland: an application of lichenometric dating techniques*, Boreas, 15, s. 231-246
- Thorarinsson S., 1943, *Oscillations of the Icelandic Glaciers in the last 250 years. Vatnajökull*, Scientific Results of the Swedish-Icelandic Investigation 1937-38-39, Geografiska Annaler, 1-2, s. 1-54

Summary

A recently elaborated lichenometric dating curve for SE Iceland based on an analysis of the size-frequency gradient has been tested on moraines of Fláajökull, a southeastern outlet glacier flowing from the Vatnajökull ice-cap. The moraines were previously dated based on different sources of information, mostly: glaciological, cartographical and historical. In summer 2005, 3877 thalli of *Rhizocarpon agg.* were measured on 5 testing fields, each on a single moraine ridge deposited since the Little Ice Age maximum. It was found that there are ex-

ceptionally large lichens which should not be used for lichenometrical dating of Fláajökull moraines. The method of large thalli reduction in data processing was proposed for the moraines. The obtained data relatively well correlate with previous dating and confirm late 19th c. maximum of LIA for Fláajökull. There is a consistent difference in the size-frequency gradient between lichen populations growing on proximal, distal and upper sides of stones which allow to infer that pioneer lichens colonise shaded and damp areas (proximal sides of stones) but later they are outnumbered by lichens growing on the sunny sides on stones. This sheds further light on the use of the size-frequency gradient method and provides some information on lichen dynamics dependant on ecological conditions.