

ZMIANY W STRUKTURZE OSADÓW PIASZCZYSTYCH I PYLASTYCH PO 1000 CYKLACH ZAMARZANIA I ROZMARZANIA – WSTĘPNE WYNIKI EKSPERYMENTU LABORATORYJNEGO

Changes in the structure of sandy and silty sediments after 1000 freeze-thaw cycles –
– preliminary results from laboratory experiment

IGOR ŚNIADY¹ 

Zarys treści. Eksperyment laboratoryjny obejmował analizę zmian zachodzących w strukturze osadów, które wynikają z reorganizacji ziaren osadów poddawanych powtarzającym się cyklom zamarzania i rozmarzania. Wykorzystano do tego urządzenie zamrażająco-rozmrażające pracujące w zakresie temperatur od -5°C do $+10^{\circ}\text{C}$. W pięciu przezroczystych cylindrach z pleksi umieszczono w kolejności od dna następujące osady: piasek gruboziarnisty, piasek drobnoziarnisty, pył i ponownie piasek drobnoziarnisty. W każdym z cylindrów stopień wilgotności osadów był inny. Obserwacje zmian przeprowadzono makroskopowo na podstawie fotograficznej dokumentacji cylindrów wykonanej przed rozpoczęciem eksperymentu oraz po 250, 500, 750 i 1000 cyklach zamarzania i rozmarzania. Wykazano, iż największą reorganizacją cechuje się osad pyłowy, a najmniejszą piasek gruboziarnisty. Ponadto, istotny wpływ na reorganizację ziaren miała wilgotność próbki. Największa liczba struktur powstała na granicach pomiędzy piaskiem drobnoziarnistym i pyłem w cylindrach o największej wilgotności.

Słowa kluczowe: permafrost, krioturbacje, cykle zamrażania-rozmrażania, eksperyment laboratoryjny, reorganizacja ziaren

Abstract. The laboratory experiment included analysis of the changes in sediment structure resulting from the reorganization of sediment grains subjected to repeated freeze-thaw cycles. A freeze-thaw device operating in temperatures ranging from -5°C to $+10^{\circ}\text{C}$ was used for this purpose. In five transparent plexiglass cylinders were placed, in order from bottom to top, the following sediments: coarse sand, fine sand, silt and again fine sand. The degree of sediment hydration differed for each of the cylinders. Observations of changes were made macroscopically on the basis of photographic documentation of the cylinders taken before the start of the experiment and after 250, 500, 750 and 1000 cycles of freezing and thawing. The highest grain reorganization was found for silty sediment and the lowest for coarse sand. In addition, the reorganization of grains was significantly affected by the sample hydration. The highest number of structures was formed at the boundaries between fine sand and silt in the cylinders with the highest hydration.

Key words: permafrost, cryoturbation, freeze-thaw cycles, laboratory experiment, grain reorganization

Wstęp

Obszar występowania permafrostu obejmuje około 35% całkowitej powierzchni lądów na świecie (French 2017), to jest środowisko arktyczne i subarktyczne oraz środowisko gór niskich i średnich szerokości geograficznych (Ballantyne

2018). Procesy zachodzące w permafroście są zależne od warunków klimatycznych (np. Matsuoka 2011), a stopień zależności tych procesów związany jest między innymi z rodzajem osadu (Górska i in. 2023a). Szczególnie podatne na zmiany temperatury są osady źle wysortowane, w których woda porowa względnie łatwo może migrować między ziarnami, wskutek czego mogą się

¹ Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, Instytut Geologii, ul. Bogumiła Krygowskiego 12, 61-680 Poznań; e-mail: igosni@st.amu.edu.pl, ORCID: 0009-0002-5651-6324

tworzyć soczewki lodu (lód segregacyjny). W efekcie zamarzania wody w osadzie zwiększa się objętość tego osadu. Powodować to może procesy deformacyjne, które wynikają z reorganizacji ziaren w osadzie, zachodzące na skutek cyklicznego zamarzania i rozmarzania osadu. Może do nich dochodzić na przykład w czasie falowania mrozowego, osiadania osadu po odwilży czy przemieszczenia gruntu wywołanego rozwojem lub degradacją ciał lodowych (French 2017). Wszystkie wymienione wyżej procesy prowadzić mogą do rozwoju deformacji osadu nazywanych krioturbacjami, osiągającymi wysokość nawet do 2 m (Vandenbergh 2016). Krioturbacje tworzą się w warstwie czynnej (ang. *active layer*) w wyniku cyklicznego rozmarzania i zamarzania (French 2017). Krioturbacje zostały sklasyfikowane przez Vandenbergh'a (2013) pod względem warunków ich powstawania na: (1) deformacje kriogeniczne związane z rozmarzaniem, które powodują powstanie struktur obciążeniowych, (2) deformacje kriogeniczne związane z zamarzaniem i działaniem ciśnienia hydrostatycznego wpływającym na zróżnicowaną penetrację mrozu w osadzie oraz (3) deformacje kriogeniczne wywołane ciśnieniem kriohydrostatycznym.

Symulacje warunków zbliżonych do peryglacjalnych były niejednokrotnie prowadzone w warunkach laboratoryjnych przy wykorzystaniu urządzeń zamrażająco-rozmrażających (np.: Wright 2000; Wang i in. 2007; Zhou i in. 2018; Górska i in. 2022, 2023a, b). Naprzemienne cykle zamarzania i rozmarzania prowadzą do wygenerowania wystarczającej ilości energii, aby wywołać zmiany właściwości fizycznych oraz chemicznych osadów (Liu i in. 2016; Górska, Woronko 2022). Reorganizacja ziaren w osadzie oraz ich niszczenie wskutek cyklicznych zmian temperatury może prowadzić do zmiany niektórych parametrów osadu, na przykład wytrzymałości, przepuszczalności, odkształcalności i kąta tarcia wewnętrznego (Liu i in. 2016). Zmiana właściwości osadu jest szczególnie istotna podczas planowania inwestycji inżynierskich na terenach znajdujących się w obrębie permafrostu, wśród których można wymienić projektowanie kolei dużych prędkości, autostrad czy tuneli (Lai i in. 2010). International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE 1989) uznaje za osady podatne na działanie mrozu (tzw. wysadzinowe) te, które zawierają >1% ziaren mniejszych od 0,002 mm, >3% ziaren mniejszych od 0,02 mm oraz >8% ziaren 0,074 mm. Osady wysadzinowe podlegają kriosukcji, czyli procesowi przemieszczania się niezamarzniętej wilgoci w kierunku frontu zamar-

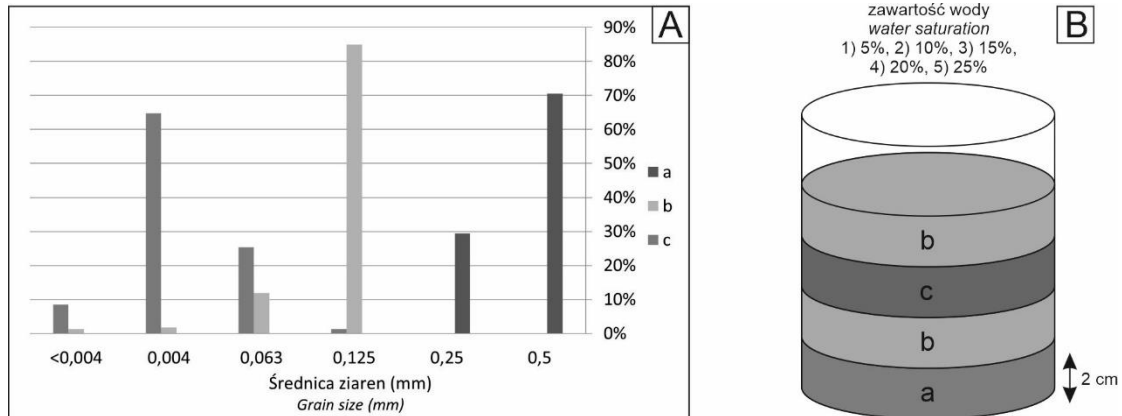
zania. Związane jest to z powstawaniem ujemnego gradientu potencjału wody (ang. *gradient in water potential*) w momencie przejścia wody ze stanu ciekłego w stan stały (Flerchinger i in. 2005). Wskutek tego procesu objętość powstałego lodu w gruncie jest większa niż pierwotna łączna objętość przestrzeni między ziarnami, a to może doprowadzać do pęcznienia gruntu (Migoń 2012).

Celem niniejszego artykułu jest określenie:

- wpływu uziarnienia osadów na sposób reorganizacji ziaren przy wielokrotnym zamarzaniu i rozmarzaniu osadów,
- wpływu wilgotności osadów na rozwój struktur deformacyjnych przy wielokrotnym zamarzaniu i rozmarzaniu osadów,
- zmian w reorganizacji ziaren zachodzących w czasie, w tym przypadku po: 250, 500, 750 oraz 1000 cyklach.

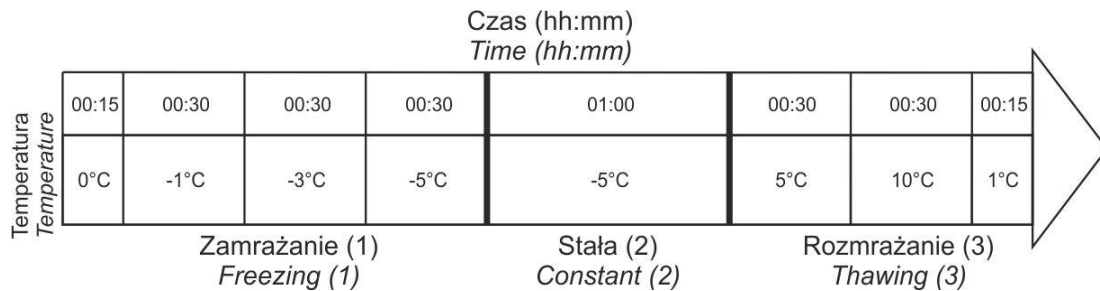
Material i metody

W eksperymencie laboratoryjnym wykorzystano osady pyłowe oraz drobno- i grubopiaszczyste (rys. 1A) odpowiadające klasyfikacji Wentworth'a (1922). Granulometria osadów wykorzystanych do eksperymentu została przeanalizowana przy pomocy dyfrakcji laserowej z zastosowaniem urządzenia Mastersizer 2000 z przystawką wodną firmy Malvern Panalytical Inc. Tak przygotowane osady zostały następnie wyspane do pięciu cylindrów wykonanych z przezroczystego pleksi o średnicy 10 cm każdy (rys. 1B). Osady umieszczano w cylindrze jeden na drugim w taki sposób, by miąższość każdej warstwy wynosiła 2 cm. We wszystkich cylindrach sekwencja osadów była identyczna – od dna cylindra znajdowały się kolejno: piasek gruboziarnisty, piasek drobnoziarnisty, pył i ponownie piasek drobnoziarnisty. Wraz z wypełnianiem cylindrów osady były nawadniane wodą destylowaną tak, by w każdym z cylindrów wilgotność osadów była inna i wynosiła odpowiednio: 5%, 10%, 15%, 20% i 25%. Podczas eksperymentu woda nie była uzupełniana, jednak cylindry były od góry zabezpieczone nieprzepuszczalną folią uniemożliwiającą jej wyparowanie. Należy zwrócić uwagę, iż zastosowanie wody destylowanej zmniejszyło ryzyko wytrącania się minerałów rozpuszczonych, co mogłoby wpłynąć na tempo mieszania się ziaren. Następnie cylindry umieszczono w urządzeniu zamrażająco-rozmrażającym. Urządzenie zostało wyposażone w specjalne oprogramowanie umożliwiające automatyczne zmiany temperatury w zakresie od -5°C



Rys. 1. Charakterystyka osadów użytych do eksperymentu
 A – Procentowy udział poszczególnych frakcji w osadach wykorzystanych w eksperymencie
 a – piasek gruboziarnisty, b – piasek drobnoziarnisty, c – pył
 B – Kolejność ułożenia osadów w cylindrach
 a – piasek gruboziarnisty, b – piasek drobnoziarnisty, c – pył

Features of sediments used for the experiment
 A – Grain-size diagram of the sediments used in the experiment
 a – coarse-grained sand, b – fine-grained sand, c – silt
 B – Diagram showing the order of sediments in the plexiglass cylinder
 a – coarse-grained sand, b – fine-grained sand, c – silt



Rys. 2. Schemat przebiegu eksperymentu z uwzględnieniem zmian temperatur w urządzeniu zamrażająco-rozmrażającym oraz czasu trwania poszczególnych etapów

Schematic diagram of the experiment with temperature changes in the freeze-thaw device and the duration of each stage

do +10°C (rys. 2). Taki zakres temperatur miał na celu symulowanie zmian zachodzących w środowisku zbliżonym do peryglacjalnego, ponadto odpowiadał na zakresowi temperatur, które były stosowane podczas analogicznych, wcześniejszych badań (Murton i in. 2000; Górska i in. 2022, 2023a, b). Urządzenie zostało przystosowane do stałego odprowadzania pary wodnej w celu uniknięcia jej kondensacji oraz wyposażono je w automatyczne odszranianie, aby zapobiec krystalizacji lodu.

Wewnętrzne półki urządzenia posiadały indywidualny system chłodzenia oraz ogrzewania, co zapewniało jednakowe warunki temperaturowe i wilgotnościowe na każdej z nich. Każdy zaprogramowany cykl przejścia od -5°C do +10°C trwał cztery godziny i podzielony był na trzy etapy (rys. 2). Pierwszy etap zamrażania trwał łącznie 105 minut, drugi etap stałej temperatury – 60 minut, zaś trzeci etap rozmrażania – 75 minut. Odpowiednio przed rozpoczęciem eksperymentu, a następnie po 250, 500, 750 i 1000 cyklach zamarzania

Tabela 1

Opis zmian zachodzących w osadach z uwzględnieniem różnego stopnia wilgotności na podstawie dokumentacji fotograficznej (CZR – cykle zamrażania-rozmrażania)

Description of the changes in the sediments taking into account the different degrees of hydration based on photographic documentation (CZR – freeze-thaw cycles)

Wilgotność/ Hydration	Powierzchnia stropowa/ Top surface	Piasek drobny/ Fine-grained sand	Granica piasek drobny/pył/ Fine-grained sand /silt boundary	Pył/ Silt	Granica pył/ piasek drobny/ Silt/fine-grained sand boundary	Piasek drobny/ Fine-grained sand	Granica piasek drobny/piasek gruboziarnisty/ Fine-grained sand/coarse- grained sand boundary	Piasek grubo- ziarnisty/ coarse- grained sand
5%	pojawienie się pierwszych spękań przy 250 CZR – wzrost liczby spękań wraz ze wzrostem CZR; w efekcie powstają duże wieloboki (rys. 3A)	-	powstanie struktur V-kształtnych przy 500 CZR (rys. 3E) – wzrost liczby struktur wraz ze wzrostem liczby CZR	<ul style="list-style-type: none"> reorganizacja ziaren; powstanie spękań wertykalnych (rys. 3E); powstanie spękań horyzontalnych i subhoryzontalnych; wzrost udziału mniejszych spękań łącznie wraz ze wzrostem liczby CZR; kurczenie objętościowe pyłu i wysypanie się piasku pomiędzy ścianką cylindra a osad 	<ul style="list-style-type: none"> undulujący falisty kontakt (rys. 3F); powstanie spękań horyzontalnych 	-	-	-
10%	pojawianie się spękań w pobliżu ścianek cylindra; liczba pęknięć wzrasta wraz z liczbą CZR (rys. 3B)	<ul style="list-style-type: none"> wyrównanie górnej powierzchni; zanik struktur powstałych podczas wsypywania piasku 	<ul style="list-style-type: none"> powstanie struktury przypominającej „dajkę neptuniczną” (rys. 3G); reorganizacja ziaren; przy 750 CZR powstanie struktur świadczących o ruchu ziaren ku górze (rys. 3G) 	powstanie pustych przestrzeni pomiędzy ścianką a osadem (rys. 3G) spowodowanych kurczeniem objętościowym pyłu	<ul style="list-style-type: none"> reorganizacja ziaren; powstawanie spękań o przebiegu falistym (rys. 3H) 	-	reorganizacja ziaren (rys. 3I)	-
15%	pojawianie się spękań biegnących od ścianek cylindra do centralnej części cylindra wraz ze wzrostem liczby CZR	reorganizacja ziaren wewnątrz piasku prowadząca do zaniku form powstałych podczas wsypywania go do cylindra	<ul style="list-style-type: none"> pojawiają się iniekcje (rys. 3J); powstanie spękań horyzontalnych; bardzo wyraźna reorganizacja ziaren 	znaczące kurczenie objętościowe pyłu; wsypywanie ziaren osadu wyżej ległego pomiędzy ścianki cylindra a osad	<ul style="list-style-type: none"> powstanie spękań subwertykalnych biegnących od pyłu w kierunku piasku drobnego (rys. 3J); wyraźna reorganizacja ziaren 	powstanie spękań horyzontalnych (rys. 3K)	-	-
20%	po 250 CZR pojawiły się nierówności powierzchni w kształcie „kopuła” z niewielką liczbą spękań (rys. 3C)	-	<ul style="list-style-type: none"> wyraźna reorganizacja ziaren; granica jest zacierana; powstanie pojedynczych struktur świadczących o ruchu pyłu ku górze (rys. 3L) 	znaczące kurczenie objętościowe pyłu; wsypywanie ziaren osadu wyżej ległego pomiędzy ścianki cylindra a osad – kurczenie pyłu postępuje wraz ze wzrostem CZR	<ul style="list-style-type: none"> wyraźna reorganizacja ziaren – zatarcie granic (rys. 3L) powstanie spękań horyzontalnych (rys. 3M) 	-	powstanie horyzontalnych i subhoryzontalnych spękań (rys. 3L)	-
25%	<ul style="list-style-type: none"> niewielka liczba spękań pojawiła się po 750 CZR wraz z nierównościami powierzchni w kształcie „kopuła” oraz śladami po obecności kryształków lodu; po 1000 CZR liczba spękań rośnie (rys. 3D) 	-	<ul style="list-style-type: none"> rozmycie granic; bardzo wyraźne zmiany na granicy spowodowane reorganizacją ziaren (rys. 3N) 	<ul style="list-style-type: none"> bardzo duża kurczliwość; powstanie licznych pustek pomiędzy ścianką cylindra a osadem; kurczenie objętościowe pyłu spowodowało wysypanie się dużej ilości osadu wyżej ległego pomiędzy osad a ścianki cylindra – obserwowana miąższość pyłu widocznego przy ściankach znacznie maleje (rys. 3N) 	<ul style="list-style-type: none"> rozmycie granic (rys. 3N); pojawianie się pogrązków (rys. 3O) 	-	-	-

nia i rozmrażania, cylindry były wyjmowane z urządzenia w celu wykonania dokumentacji fotograficznej i opisu makroskopowego zaistniałych zmian (tab. 1).

Wyniki badań

Granulometria osadów

W efekcie przeprowadzonego eksperymentu laboratoryjnego zaobserwowane zostały zarówno pionowe, jak i poziome zmiany w strukturze osadów, szczególnie widoczne na granicach osadów o różnej granulometrii (tab. 1). Uziarnienie osadu miało znaczący wpływ na reorganizację ziaren. Najbardziej zauważalne efekty zmian charakteryzowały warstwę pylastą. Wykazywała ona znaczną kurczliwość prowadzącą do powstawania pustych przestrzeni przy ściankach cylindra, w które wsypywał się osad leżący powyżej (rys. 3N). Znaczna reorganizacja ziaren pyłu przyczyniła się także do powstawania: (1) licznych struktur na granicy z wyżej leżącym i z niżej leżącym piaskiem drobnoziarnistym, takich jak struktury V-kształtne (rys. 3E), (2) licznych spękań o zróżnicowanym kształcie (rys. 3E, J, M), (3) struktur iniekcyjnych (rys. 3J), (4) pogrążów (rys. 3O), jak również wpłynęła na (5) zacieranie się (amalgamację) granic pomiędzy osadami o różnej frakcji (rys. 3L, N). Warstwy piasku drobnoziarnistego ulegały zmianom przede wszystkim na granicy z warstwą pylastą. Większą dynamikę zmian zaobserwowano jednak na granicy piasku drobnoziarnistego z pyłem leżącym powyżej niż piasku drobnoziarnistego leżącego na pyłe. Wewnątrz warstw piaszczystych praktycznie nie wykształciły się struktury deformacyjne poza niewielką liczbą spękań. Najmniejszej zmienności podlegał piasek gruboziarnisty, którego ziarna nie poddawały się zauważalnej makroskopowo reorganizacji. Na powierzchni stropowej profilu zbudowanej z piasku drobnoziarnistego powstały przede wszystkim liczne spękania (rys. 3A), a także formy kopułowe (rys. 3C).

Wilgotność osadów

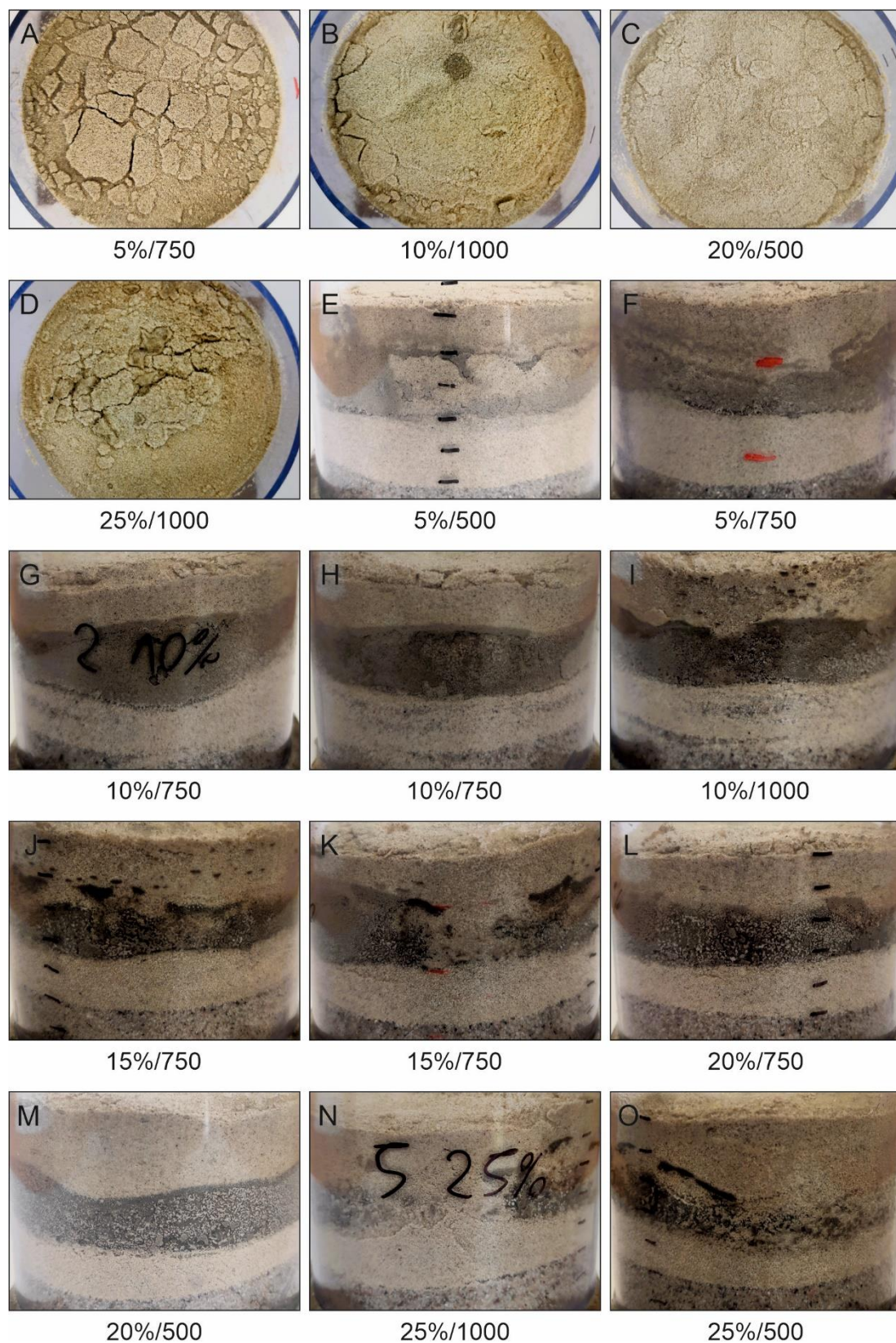
Wilgotność osadów znacząco wpływała na charakter powstających struktur. W cylindrach,

w których osad miał wilgotność od 5% do 15%, powstały przede wszystkim spękania o różnym kształcie i orientacji oraz niewielkich rozmiarów struktury o charakterze gęstościowym, wskazujące na reorganizację ziaren na granicy pyłu z wyżej leżącym i niżej leżącym piaskiem drobnoziarnistym. Przy wilgotności osadu 20–25% reorganizacja ziaren była znacznie większa i dochodziło między innymi do zatarcia granic pomiędzy piaskiem drobnoziarnistym i pyłem (rys. 3L, N).

We wszystkich cylindrach, bez względu na wilgotność, dochodziło do kurczenia warstwy pyłu, jednak proces ten był najintensywniejszy w osadach o największej wilgotności. Wilgotność determinowała również charakter struktur powstających na powierzchni profilu. Przy 5% wilgotności na całej powierzchni powstawały spękania, tworząc wieloboki (rys. 3A), przy 10% spękania powstawały jedynie przy ściankach cylindra (rys. 3B), a przy 15% spękania powstawały początkowo przy ściankach cylindra, a następnie pojawiły się również w centralnej części powierzchni profilu. Przy wilgotności 20–25% liczba spękań była niewielka, ale towarzyszyły im struktury kopułowe (rys. 3C, D).

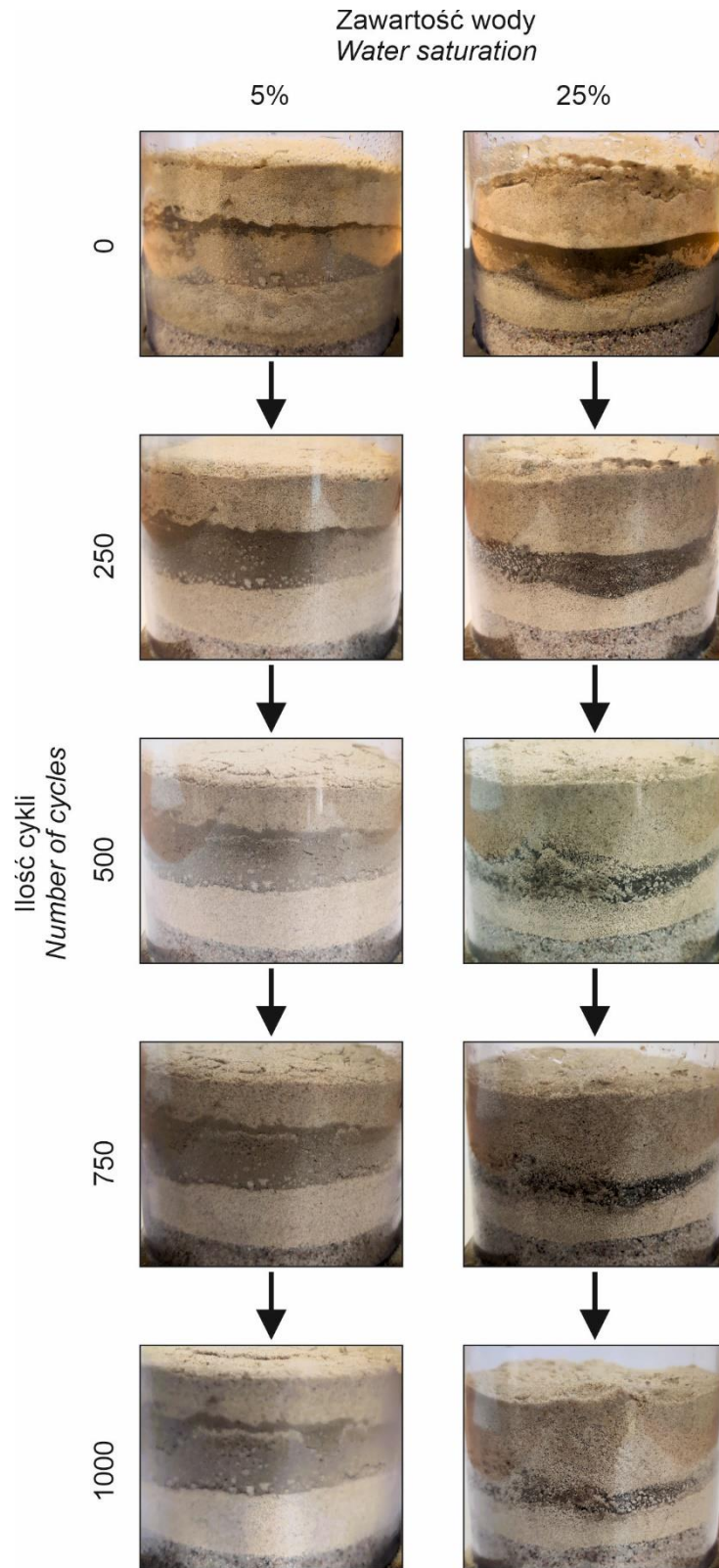
Liczba cykli zamrażania-rozmrażania

Zaobserwowane makroskopowo zmiany w strukturze osadów postępowały wraz ze wzrostem liczby cykli zamrażania-rozmrażania (rys. 4). Najwięcej zmian zaobserwowano po 250 cyklach, kiedy to doszło do wykształcenia pierwszych struktur. Wraz ze wzrostem liczby cykli dochodziło do rozwoju wykształconych wcześniej struktur oraz zwiększała się kurczliwość pyłu. Przy wilgotności 15–25% zaobserwowano znaczącą reorganizację ziaren na granicach piasku drobnego z pyłem, prowadzącej do zatarcia granic pomiędzy tymi osadami. Struktury powstałe w osadach o wilgotności w zakresie 15–25% uwidoczniły się jeszcze bardziej po 750 cyklach. Natomiast po 1000 cyklach zaobserwowano wyraźne zatarcie wcześniej utworzonych struktur oraz znaczne mieszanie się ziaren na granicach pyłu z piaskiem drobnoziarnistym we wszystkich próbkach za wyjątkiem cylindra, w którym wilgotność osadów wynosiła 5%.



Rys. 3. Wybrane zdjęcia z dokumentacji fotograficznej (wilgotność/liczba cykli)

Selected images from photographic documentation (hydration/number of cycles)



Rys. 4. Zmiany zachodzące w strukturze osadów w cylindrach z najmniejszą (5%) oraz największą (25%) zawartością wody z uwzględnieniem wzrostu liczby cykli zamarzania i rozmarzania

Changes in sediment structure in cylinders with the lowest (5%) and highest (25%) water content, taking into account the increase in the number of freeze-thaw cycles

Dyskusja

Liczne badania prowadzone w osadach/gruntach/glebach w strefie występowania permafrostu wykazały, iż osady poddane takim warunkom wykształcają szereg cech diagnostycznych o różnej skali (Bryan 1946; Everett 1987; Van Vliet-Lanoë 1988, 1991; Vandenberghe 1988, 1992, 2013; Bockheim, Tarnocai 1998; Tarnocai 2009). Na przebieg procesów związanych z występowaniem permafrostu ma wpływ szereg czynników, w tym m. in.: średnia roczna temperatura powietrza i powierzchni gruntu (Frauenfeld i in. 2004; Haberkorn i in. 2021), dostępność wody (Matsuoka 1995), ekspozycja stoku (Matsuoka i in. 1997; Matsuoka 2005), wysokość terenu nad poziomem morza (Lewkowicz i in. 2012), nasłonecznienie i zachmurzenie (McFadden i in. 2005), wysokość opadów atmosferycznych (Mekonnen i in. 2021), prędkość wiatru (Xie i in. 2017), pokrywa śnieżna (Luetschg i in. 2008), podłoże skalne (Matsuoka 2001; Nicholson 2008) oraz zmiany składu chemicznego wody (Szopińska i in. 2016a, b). W związku ze złożonością procesów wpływających na tworzenie się struktur w warunkach naturalnych oraz braku możliwości precyzyjnej oceny czasu penetracji mrozu w osad i określenia liczby cykli zamarzania-rozmarzania nie jest możliwe wierne odtworzenie ich w warunkach laboratoryjnych (por. Górską i in. 2023a). Zatem wyniki eksperymentu mają na celu jedynie przybliżenie dynamiki zmian wobec zmienności dwóch czynników: granulacji oraz wilgotności osadu.

Dotychczas prowadzone badania najczęściej wykazywały większą reorganizację ziaren frakcji drobnych (Zhai i in. 2021; Górską i in. 2023a), gdyż ze względu na mniejszą porowatość w stosunku do większych frakcji, silniej oddziałuje na nie zmiana objętości wody po przejściu w stan stały. Osady zbudowane z takich ziaren odznaczają się również dużo lepszą migracją wody w kierunku frontu zamarzania ze względu na lepszą przewodność w stanie nienasyconym (Flerchinger i in. 2005). Powiązanie reorganizacji ziaren ze zmianami objętości wody, której migracja i przemiany fazowe odpowiadają za zmiany w strukturze osadu, pozwoliło też wykazać trend intensyfikacji tego procesu wraz ze wzrostem wilgotności (Górską i in. 2023a; Pan i in. 2023). Obydwa te wnioski pokrywają się z wynikami przeprowadzonego eksperymentu.

Zaobserwowana niewielka reorganizacja ziaren piasku gruboziarnistego może wynikać ze względnie niskiej wilgotności osadu, której

przejścia fazowe wody między stanami ciekłym i stałym nie wytworzyły odpowiedniej energii do przemieszczenia ziaren o większych średnicach. Corte (1963) w badaniach eksperymentalnych zaobserwował, iż do wprawienia w ruch ziaren o większej średnicy wymagane jest wolniejsze tempo zamarzania i rozmarzania próbki niż ma to miejsce w przypadku mniejszych ziaren. Dodatkowo, wolniejsza penetracja mrozu w osad wiąże się z większą migracją wody w kierunku frontu zamarzania (Everett 1987). Wnioskować można zatem, iż analogiczny eksperyment mający na celu zaobserwowanie intensywniejszej reorganizacji ziaren piasku gruboziarnistego wymagałby większej wilgotności osadu oraz wydłużenia czasu trwania cykli zamarzania i rozmarzania. Reorganizacja piasku drobnoziarnistego najbardziej uwidoczniła się w spągach i stropach, które sąsiadowały z warstwą pyłu. Związane jest to z dużą zdolnością pyłu do zmiany objętości w warunkach falowania mrozowego, co jest szczególnie istotne w kontekście planowania inwestycji inżynierskich (Górska-Pawliczuk 2017), a także podczas tworzenia się struktur wewnątrz profilu gruntowego.

Zdecydowanie najczęściej pojawiającymi się strukturami podczas eksperymentu były liczne spękania, których powstawanie związane może być z wielokrotnym tworzeniem się i degradacją kryształków lodu oraz migracją wilgoci, co wpływa na względne osuszanie niektórych partii osadu. Powstawanie struktur związanych z grzęnięciem na granicach warstw pyłu z piaskiem drobnoziarnistym może być efektem tworzenia się lodu segregacyjnego, którego wykształcenie może skutkować czasowymi zmianami gęstości osadów (Vandenberghe 2013). Świątek i in. (2023) na podstawie analizy licznych próbek nieskonsolidowanych osadów czwartorzędowych określili zależność pomiędzy strukturami powstałymi w efekcie upłynnienia a procentową zawartością poszczególnych frakcji. Zastosowany w niniejszym eksperymencie osad pyłowy można uznać jako podatny na tworzenie się struktur wklęsłych w górę (ang. *concave up structures*; Świątek i in. 2023). Potwierdzają to także zaobserwowane w przeprowadzonym eksperymencie struktury iniekcyjne (rys. 3J) oraz V-kształtne (rys. 3E) powstałe na granicy między osadem pyłowym a osadem drobnopiaszczystym.

Eksperymentalne badania, które pozwalają opisać i wyjaśnić dynamikę oraz mechanizmy prowadzące do powstawania struktur w warunkach permafrostu, są ważnym elementem rozwoju wiedzy zarówno w geoinżynierii (Wang i in. 2015; Liu i in. 2016), jak i w badaniach paleośrodowis-

kowych (Hallet i in. 1991; Schwamborn i in. 2012). Wyniki uzyskane na podstawie przeprowadzonego eksperymentu potwierdzają wnioski uzyskane przez innych badaczy. Wyniki te pozwalają także doprecyzować opis zachowywania się osadów pylastych w różnych wariantach ich położenia w profilu osadowym, które wcześniej nie były badane.

Wnioski

Przeprowadzony eksperyment polegający na poddaniu cyklom zamrażania i rozmrażania (odpowiednio: 250, 500, 750, 1000 cykli) osadów pyłowych, drobnopiaszczystych i grubopiaszczystych w cylindrach o różnej wilgotności (5%, 10%, 15%, 20%, 25%) pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

- największym zmianom (reorganizacji) podlegały ziarna pylaste, a najmniejszym ziarna piasku gruboziarnistego,
- przy wielokrotnym rozmrażaniu i zamrażaniu największa reorganizacja ziaren nastąpiła w cylindrach z największą wilgotnością,
- dynamika postępujących zmian w strukturze osadów pomiędzy cyklami rozkładała się w miarę równomiernie, jednak największe zmiany można było zaobserwować po 250 oraz 750 cyklach zamrażania i rozmrażania,
- zmiany na powierzchni stropowej profilu osadowego obejmowały tworzenie się spękań przy mniejszej wilgotności (5–15%) oraz form kopułowych przy większej wilgotności (20–25%),
- w trakcie eksperymentu najczęściej zaobserwowanymi strukturami były spękania. Ich powstawanie może być rezultatem krystalizacji, a następnie degradacji ciał lodowych oraz migracji wilgoci, która prowadzi do lokalnego osuszania partii osadu,
- wielokrotne poddanie osadu działaniu cykli zamrażająco-rozmrażających prowadziło zarówno do powstawania, jak i zacierania się struktur wynikających z migracji wody w przestrzeniach porowych osadu.

Podziękowania

Publikacja powstała w efekcie tutoringów naukowego realizowanego na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu pod opieką

Małgorzaty Pisarskiej-Jamroży. Chciałbym złożyć serdeczne podziękowania Pani Profesor za nieocenione wsparcie oraz udzielone wskazówki podczas powstawania artykułu. Dziękuję Szymonowi Świątkowi za pomoc w pracach laboratoryjnych. Składam także podziękowania Recenzentom – Barbarze Woronko i anonimowemu Recenzentowi za cenne uwagi zawarte w recenzjach. Publikacja nie powstałaby, gdyby nie możliwość przeprowadzenia eksperymentu w urządzeniu zamrażająco-rozmrażającym zakupionym w ramach grantu Preludium nr 2019/33/N/ST10/00021.

Literatura

- Ballantyne C.K. 2018. Periglacial Geomorphology. Wiley-Blackwell, Chichester: 11-22.
- Bockheim J.G., Tarnocai C. 1998. Recognition of cryoturbation for classifying permafrost-affected soils. *Geoderma* 81 (3–4): 281-293. DOI: 10.1016/S0016-7061(97)00115-8
- Bryan K. 1946. Cryopedology, the study of frozen ground and intensive frost-action, with suggestions on nomenclature. *American Journal of Science* 244 (9): 622-642. DOI: 10.2475/ajs.244.9.622
- Corte A.E. 1963. Particle Sorting by Repeated Freezing and Thawing. *Science* 142(3591): 499-501. DOI:10.1126/science.142.3591.499
- Everett K.R. 1987. Cryoturbation structures. W: *Structural Geology and Tectonics. Encyclopedia of Earth Science*. Springer: 177-183. DOI: 10.1007/3-540-31080-0_25
- Flerchinger G.N., Lehrsch G.A., McCool D.K. 2005. Freezing and thawing processes. W: D. Hillel (red.). *Encyclopedia of Soils in the Environment*, Elsevier: 104-110. DOI: 10.1016/B0-12-348530-4/00365-9
- Frauenfeld O.W., Zhang T., Barry R.G., Gilchinsky D. 2004. Interdecadal changes in seasonal freeze and thaw depths in Russia. *Journal of Geophysical Research* 109 (D5): 1-12. DOI: 10.1029/2003JD004245
- French H.M. 2017. The Periglacial Environment. Fourth Edition. Wiley, Chichester.
- Górska-Pawliczuk A. 2017. Grunty wysadzino-we – wyzwanie dla drogownictwa. *Magazyn Autostrady* 5: 116-122.
- Górska M.E., Woronko B. 2022. Multi-stage evolution of frost-induced microtextures on the

- surface of quartz grains – An experimental study. *Permafrost and Periglacial Processes* 33(4): 470-489. DOI: 10.1002/ppp.2164
- Górska M.E., Woronko B., Kossowski T.M., Pisarska-Jamroży M. 2022. Micro-scale frost-weathering simulation – Changes in grain-size composition and influencing factors. *Catena* 212: 106106. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106106
- Górska M.E., Skolasińska K., Świątek S., Pisarska-Jamroży M. 2023a. Frost-induced changes in the structure of sediments – results after 500, 1000, 1500 experimental freeze-thaw cycles. *Catena* 232: 107355. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107355
- Górska M.E., Woronko B., Kossowski T.M. 2023b. Factors influencing the development of microtextures on cold-climate aeolian quartz grains revealed by experimental frost action. *Permafrost and Periglacial Processes* 34(2): 259-283. DOI: 10.1002/ppp.2179
- Haberkorn A., Kenner R., Noetzli J., Phillips M. 2021. Changes in Ground Temperature and Dynamics in Mountain Permafrost in the Swiss Alps. *Frontiers in Earth Science* 9. DOI: 10.3389/feart.2021.626686
- Hallet B., Walder J.S., Stubbs C.W. 1991. Weathering by segregation ice growth in micro-cracks at sustained subzero temperatures: verification from an experimental study using acoustic emission. *Permafrost and Periglacial Processes* 2(4): 283-300. DOI: 10.1002/ppp.3430020404
- ISSMFE. 1989. International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Work report 1985–1989. W: Proceedings of International Symposium On Frost in Geotechnical Engineering, 13–15.03.1989. VTT Symposium 94, Technical Committee on Frost, TC-8, Saariselka, Finlandia: 15-70.
- Lai Y., Yang Y., Chang X. 2010. Strength criterion and elasto-plastic constitutive model of frozen silt in generalized plastic mechanics. *International Journal of Plasticity* 26(10): 1461-1484. DOI:10.1016/j.ijplas.2010.01.002010.01.007
- Lewkowicz A.G., Bonnaventure P.P., Smith S.L., Kuntz Z. 2012. Spatial and thermal characteristics of mountain permafrost, northwest Canada. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 94(2): 195-213. DOI: 10.1111/j.1468-0459.2012.00462.x
- Liu J., Chang D., Yu Q. 2016. Influence of freeze-thaw cycles on mechanical properties of a silty sand. *Engineering Geology* 210: 23-32. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.05.019
- Luetschg M., Lehning M., Haeberli W. 2008. A sensitivity study of factors influencing warm/thin permafrost in the Swiss Alps. *Journal of Glaciology* 54(187): 696-704. DOI:10.3189/002214308786570881
- Matsuoka N. 1995. Rock weathering process and landform development in the Sør Rondane Mountains, Antarctica. *Geomorphology* 12 (4): 323-339. DOI: 10.1016/0169-555X(95)00013-U
- Matsuoka N. 2001. Direct observations of frost weathering in alpine bedrock. *Earth Surface Processes and Landforms* 26(6): 601-614. DOI: 10.1002/esp.208
- Matsuoka N. 2005. Temporal and spatial variations in periglacial soil movements on alpine crest slopes. *Permafrost and Periglacial Processes* 30(1): 41-58. DOI: 10.1002/esp.1125
- Matsuoka N. 2011. Climate and material controls on periglacial soil processes: Toward improving periglacial climate indicators. *Quaternary Research* 75(2): 356-365. DOI: 10.1016/j.yqres.2010.12.014
- Matsuoka N., Hirakawa K., Watanabe T., Moriwaki K. 1997. Monitoring of periglacial slope processes in the Swiss Alps: the first two years of frost shattering, heave and creep. *Permafrost and Periglacial Processes* 8(2): 155-177. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1530(199732)8:2<155::AID-PPP248>3.0.CO;2-N
- McFadden L.D., Eppes M.C., Gillespie A.R., Hallet B. 2005. Physical weathering in arid landscapes due to diurnal variation in the direction of solar heating. *Geological Society of America Bulletin* 117(1–2): 161-173. DOI: 10.1130/B25508.1
- Mekonnen M.A., Riley W.J., Grant R.F., Romanovsky V.E. 2021. Changes in precipitation and air temperature contribute comparably to permafrost degradation in a warmer climate. *Environmental Research Letters* 16: 024008. DOI: 10.1088/1748-9326/abc444
- Migoń P. 2012. *Geomorfologia*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa: 329-347.
- Murton J.B., Coutard J.P., Lautridou J.P., Ozouf J.C., Robinson D.A., Williams R.B.G., Guillemet G., Simmons P. 2000. Experimental design for a pilot study on bedrock weathering near the permafrost table. *Earth Surface Processes and Landforms* 25(12): 1281-1294. DOI: 10.1002/1096-9837(200011)25:12<1281::AID-ESP137>3.0.CO;2-U

- Nicholson D.T. 2008. Rock control on micro-weathering of bedrock surfaces in a periglacial environment. *Geomorphology* 101(4): 655-665.
DOI: 10.1016/j.geomorph.2008.03.009
- Pan Z., Yang G., Ye W., Liu H., Liang B., Yang Q., Li G. 2023. Effect of Freeze-Thaw Cycles and Initial Water Content on the Pore Structure and Mechanical Properties of Loess in Northern Shaanxi. *Sustainability* 15(14): 10937. DOI: 10.3390/su151410937
- Schwamborn G., Schirrmeister L., Frütsch F., Diekmann B. 2012. Quartz Weathering In Freeze-Thaw Cycles: Experiment And Application To The El'gygytgyn Crater Lake Record For Tracing Siberian Permafrost History. *Geografiska Annaler: Series A – Physical Geography* 94(4): 481-499.
DOI: 10.1111/j.1468-0459.2012.00472.x
- Szopińska M., Dymerski T., Polkowska Ż., Szumińska D., Wolska L. 2016a. The chemistry of river-lake systems in the context of permafrost occurrence (Mongolia, Valley of the Lakes). Part II. Spatial trends and possible sources of organic composition. *Sedimentary Geology* 340: 84-95.
DOI: 10.1016/j.sedgeo.2016.03.001
- Szopińska M., Szumińska D., Polkowska Ż., Machowiak K., Lehmann S., Chmiel S. 2016b. The chemistry of river-lake systems in the context of permafrost occurrence (Mongolia, Valley of the Lakes). Part I. Analysis of ion and trace metal concentrations. *Sedimentary Geology* 340: 74-83.
DOI: 10.1016/j.sedgeo.2016.03.004
- Świątek S., Belzyt S., Pisarska-Jamroży M., Woronko B. 2023. Sedimentary records of liquefaction: Implications from field studies. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 128: e2023JF007152.
DOI: 10.1029/2023JF007152
- Tarnocai C. 2009. Arctic Permafrost Soils. W: R. Margesin (red.) *Permafrost Soils. Soil Biology* 16: 3-16.
DOI: 10.1007/978-3-540-69371-0_1
- Vandenberghe J. 1988. Cryoturbations. W: M.J. Clark (red.) *Advances in Periglacial Geomorphology*. Wiley, Chichester: 179-198.
- Vandenberghe J. 1992. Cryoturbations: A sediment structural analysis. *Permafrost and Periglacial Processes* 3(4): 343-352.
DOI: 10.1002/ppp.3430030408
- Vandenberghe J. 2013. Cryoturbation structures. *Encyclopedia of Quaternary Science* 3: 430-435.
- Vandenberghe J. 2016. The reconstruction of past permafrost: recent results, present-day gaps and future challenges. W: F. Günther, A. Morgenstern (red.) XI International Conference On Permafrost – Book of Abstracts, 20-24.06.2016, Poczdam, Niemcy. Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein: 338.
DOI: 10.2312/GFZ.LIS.2016.001
- Van Vliet-Lanoë B. 1988. The significance of cryoturbation phenomena in environmental reconstruction. *Journal of Quaternary Science* 3(1): 85-96.
DOI: 10.1002/jqs.3390030110
- Van Vliet-Lanoë B. 1991. Differential frost heave, load casting and convection: Converging mechanisms; a discussion of the origin of cryoturbations. *Permafrost and Periglacial Processes* 2 (2): 123-139.
DOI: 10.1002/ppp.3430020207
- Wang D., Ma W., Yonghong N., Chang X., Wen Z. 2007. Effects of cyclic freezing and thawing on mechanical properties of Qinghai-Tibet clay. *Cold Region Science Technology* 48(1): 34-43.
DOI: 10.1016/j.coldregions.2006.09.008
- Wang T.L., Liu Y.J., Yan H., Xu L. 2015. An experimental study on the mechanical properties of silty soils under repeated freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology* 112: 51-65.
DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.01.004
- Wentworth C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology* 30(5): 377-392.
- Wright J.S. 2000. The spalling of overgrowths during experimental freeze-thaw of a quartz sandstone as a mechanism of quartz silt production. *Micron* 31(6): 631-638. DOI: 10.1016/S0968-4328(99)00074-8
- Xie S., Qu J., Xu X., Pang Y. 2017. Interactions between freeze-thaw actions, wind erosion desertification, and permafrost in the Qinghai-Tibet Plateau. *Natural Hazards* 85: 829-850. DOI: 10.1007/s11069-016-2606-4
- Zhai J., Zhang Z., Melnikov A., Zhang M., Yang L., Jin D. 2021. Experimental Study on the Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Mineral Particle Fragmentation and Aggregation with Different Soil Types. *Minerals* 11: 913. DOI: 10.3390/min11090913

Zhou Z., Ma W., Zhang S., Mu Y., Li G. 2018. Effect of freeze-thaw cycles in mechanical behaviors of frozen loess. *Cold Region Science and Technology* 146: 9-18. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.11.011

Summary

The article aims at presenting results of a laboratory experiment conducted to study changes in the structure of sediments subjected to repeated freeze-thaw cycles, simulating changes in the permafrost zone. A freeze-thaw device, generating 6 freeze-thaw cycles per day in temperatures ranging from $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, was utilised for the purpose of this experiment. The tested sediments were placed in plexiglass cylinders, arranged from bottom to top as follows: coarse sand (0.5–1.0 mm), fine sand (0.125–0.25 mm), silt ($<0.063\text{ mm}$), and fine sand at the top (Fig. 1B). The degree of hydration of the sediment differed for each of the cylinders and amounted to 5%, 10%, 15%, 20% and 25%, respectively. The experiment results included macroscopic analysis of photographic documentation of the cylinders. Pictures were taken before the start of the experiment and after 250, 500, 750, 1000 freeze-thaw cycles.

The experiment was limited to only two factors: granulation and sediment hydration. The limit was introduced due to the complexity of the factors that result in the formation of structures under natural conditions, as well as the inability to reproduce them under laboratory conditions. The outcomes indicated that granulation had a significant impact on the intensity of grain reorganization. The main changes were formed at the boundaries of fine sand and silt. They primarily included formation of cracks (Fig. 3E, J, M),

blurring of the boundaries between the sediments (Fig. 3L, N) and injections and plunges (Fig. 3J, O). Additionally, the silt showed high shrinkage, causing the higher-lying fine sand to pour in between the silt and the cylinder wall (Fig. 3N). Inside the fine sand layer, few structures were formed, mainly cracks, while the coarse sand underwent virtually no reorganization.

Furthermore, the hydration of the sediment had a substantial influence on the structures formed. At hydration rates of 5%, 10% and 15%, the changes observed in the sediments were mainly the formation of cracks and minor changes at the silt ridge with fine sand, indicating grain reorganization. At hydration rates of 20% and 25%, greater grain reorganization occurred, along with blurring of the boundaries between silt and fine sand. Moreover, hydration had a significant effect on silt shrinkage. The higher the hydration, the more intense the process was. The structures formed on the top surface of the profile were also determined by the hydration level, consisting primarily of cracks at hydration levels of 5%, 10% and 15% (Fig. 3A). Additionally, dome-shaped structures were observed at hydration levels of 20% and 25% (Fig. 3B, C).

The number of cycles proved crucial in the samples with hydrations of 15%, 20% and 25%, while much lower dynamics of change were observed in the samples with hydrations of 5% and 10% (Fig. 4). In most of the samples, the formation of structures took place after just 250 cycles. After 750 cycles, the development of structures occurred, while the visible smearing of structures appeared after 1000 cycles.