

Ruchy masowe na obszarze wieloletniej zmarzliny wyspowej w dobie zmian klimatu (Olchon, wschodnia Syberia)*

*Mass movements in an isolated area of permafrost in the era
of climate change (Olkhon, East Siberia)*

SEBASTIAN TYSZKOWSKI^a, HALINA KACZMAREK^a
MICHAŁ SŁOWIŃSKI^a, ELENA KOZYREVA^b, DARIUSZ BRYKAŁA^a
ARTIOM RYBČENKO^b, VIKTORIA A. BABIČEVA^b

^aInstytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN
87-100 Toruń, ul. Kopernika 19; sebastian@geopan.torun.pl; halina@geopan.torun.pl;
michal@geopan.torun.pl; darek@geopan.torun.pl

^bLaboratorium Geologii Inżynierskiej i Geoekologii, Oddział Syberyjski, Instytut Skorupy
Ziemskiej, RAN, Lermontowa 128, 664033, Irkuck, Rosja
kozireva@crust.irk.ru, rybchenko@crust.irk.ru, khak@crust.irk.ru

Zarys treści. W pracy przedstawiono charakterystykę współczesnych osuwisk kriogenicznych rozwijających się na obszarze wyspy Olchon na jeziorze Bajkał (wschodnia Syberia). Przeanalizowano parametry morfometryczne i budowę geologiczną tych form oraz czynniki ich rozwoju z uwzględnieniem obserwowanych na tym obszarze zmian klimatu oraz spiętrzenia jeziora Bajkał.

Słowa kluczowe: Wyspa Olchon, Bajkał, osuwiska kriogeniczne, degradacja wieloletniej zmarzliny, warstwa czynna, zmiany klimatu.

Wprowadzenie

Wyspa Olchon, największa na jeziorze Bajkał, to jeden z najbardziej aktywnych geodynamicznie obszarów wschodniej Syberii. Pod względem ryzyka osuwiskowego, pas zapadliska bajkałskiego zaliczany jest do terenów o umiarkowanym i średnim stopniu ryzyka (Nadim i inni, 2006), co wynika z wysokiej aktywno-

* Praca powstała w ramach projektu "Exogenic processes as anthropopression indicators in water reservoirs' influence zone – continuation (2011-2013)". Ponadto, prace częściowo finansowane były w ramach projektu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (granty N N306 033033 w 2007-2009, N N306 086037 i N N306 085037 w 2009-2012) oraz Virtual Institute of Integrated Climate and Landscape Evolution (ICLEA), Helmholtz Association, Niemcy.

ści sejsmicznej (na podstawie map Peak Ground Acceleration wg Światowego Programu Ryzyka Sejsmicznego GSHAP). Na rozwój osuwisk w tym obszarze oddziałuje również czynnik klimatyczny wyrażany poprzez obecność wieloletniej zmarzliny oraz głębokiego sezonowego zamarzania i rozmarzania gruntu (Tyszkowski i inni, 2015).

Zanikanie wieloletniej zmarzliny pod wpływem globalnych zmian klimatu jest szczególnie wyraźne w wysokich szerokościach geograficznych Północnej Rosji (Smith i inni, 2005) oraz na obszarze Jukonu w Kanadzie (Huscroft i inni, 2004; Wang i inni, 2009), zauważalne jest również na Syberii (Koven i inni, 2012). Głównym czynnikiem powodującym jej zanikanie są zmiany temperatury powietrza (Koven i inni, 2012). Na terytorium Przybajkała w XX wieku średnia roczna wartości zmian temperatury 1,5 do 2,0 razy przewyższyła wartości zmian globalnych (Voropay i inni, 2011).

Obserwowane w ostatnich dekadach na świecie zmiany klimatu – szczególnie związane z globalnym ociepleniem – skutkujące m.in. wytapianiem wieloletniej zmarzliny, powodują wzrost aktywności osuwisk (Crozier, 2010).

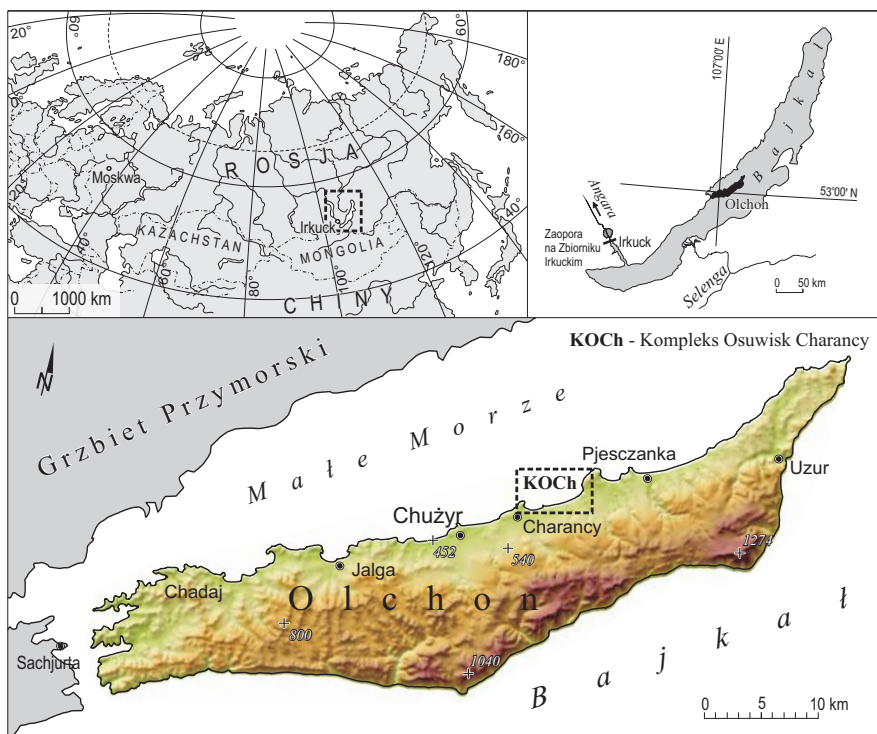
Omówione w artykule badania miały na celu rozpoznanie geomorfologiczne Olchonu pod kątem obecności osuwisk i określenie czy występujące tu osuwiska należą do form kriogenicznych, i czy współczesne zmiany klimatyczne mogą sprzyjać ich rozwojowi.

Obszar badań

Historia polskich eksploracji Bajkału i terenów przyległych rozpoczęła się już w XIX wieku. Były one prowadzone głównie przez zesłańców, wśród których znaleźli się tacy badacze jak Benedykt Dybowski, Wiktor Godlewski czy Aleksander Czekanowski. Także współcześnie trwają badania geograficzne z udziałem polskich naukowców w tym rejonie (m.in. Pulina, 1968; Szczypek i inni, 2004; Trzcinskij i inni, 2009; Kaczmarek i inni, 2012, Tyszkowski i inni, 2015).

Olchon jest największą wyspą położoną na jeziorze Bajkał (wschodnia Syberia), jednym z największych i najstarszych jezior na świecie. Wyspa ma powierzchnię 742 km², długość 71 km i szerokość 12 km. Długość linii brzegowej wynosi 225 km (ryc. 1). Od strony zachodniej, oddzielona jest od lądu płytką, szeroką cieśniną, zwaną Małym Morzem. Wysokość terenu wynosi od 455 do 1274 m n.p.m. Południową część wyspy i prawie całe zachodnie wybrzeże o łagodnej rzeźbie i dominujących nachyleniach 5-15 stopni, zajmują stepy, a górzystą, północno-wschodnią część wyspy porastają lasy typu tajgi zdominowane przez sosnę i modrzew. Trzon wyspy stanowią silnie zmetamorfizowane skały wczesnopaleozoiczne: marmury, kwarcyty, gnejsy, granitognejsy i amfibolity (Konoplev, 1964; Lunina i inni, 2010). Skały te porozcinane są licznymi uskokiemi tektonicznymi, z których wiele jest aktywnych i należy do najważniejszych w tym rejonie świata (Ivanov i inni, 2013). Lokalnie, wzdłuż zachodniego

wybrzeża na powierzchni występują neogeńskie mułki i ropy oraz czwartorzędowe piaski i żwiry jeziorno-rzeczne, stanowiące pozostałość wyniesionej terasy Bajkału. Wyspa Olchon, leżąca w obrębie Bajkalskiej Strefy Ryftowej, jest jednym z najbardziej sejsmicznie aktywnych regionów Rosji. Zdarzały się tu trzęsienia ziemi o intensywności X-XI w skali MSK-64 i (magnitudzie) $M > 7,6$ (Mel'nikowa i inni, 2010).



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań

Opracowanie własne, podobnie pozostałe ryciny.

Location of study area

Authors' own elaboration, as well as the other figures.

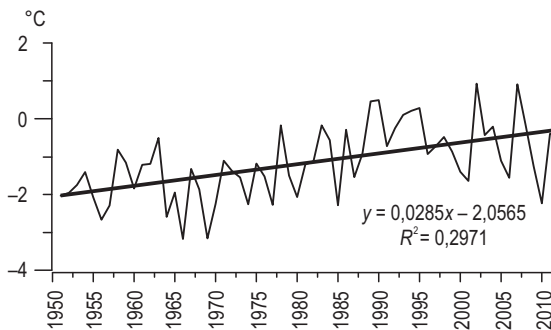
Zróznicowana budowa geologiczna i morfologia warunkuje odmienne procesy geomorfologiczne na obszarze wyspy. W części wschodniej występują liczne pozostałości starych potoków gruzowych i gruzowo-błotnych zwanych *sielami*, schodzących z wysoko wyniesionych masywów skalnych. Brzeg ma postać wysokich stromych ścian z licznie występującymi obrywami. W części zachodniej wyspy występują formy związane z procesami eolicznymi i osuwiskowymi (Tyszkowski i inni, 2015), a zdecydowanie łagodniejszy brzeg ma charakter abrazyjno-akumulacyjny.

Olchon jest położony w strefie klimatu wybitnie kontynentalnego z ujemnymi wartościami średniej rocznej temperatury powietrza, wahającymi się od $-0,4$ w środkowej do $-1,3^{\circ}\text{C}$ w północnej części wyspy (Berkin i inni, 2009). Ujemna średnia miesięczna temperatura powietrza notowana jest od listopada do kwietnia, z najniższymi wartościami w styczniu i lutym, do -20°C . Średnie temperatury najcieplejszego miesiąca – lipca osiągają blisko 15°C (Galazij, 1993). Średnia roczna suma opadów wynosi 225 mm, a 90% tej wartości jest notowane w okresie od kwietnia do października. Pokrywa śnieżna na Olchonie osiąga małe miąższości, w różnych latach od 2 do 29 cm (Trofimova, 2006). Klimat wyspy cechują niższe opady oraz łagodniejsze zimy i chłodniejsze lata w stosunku do otoczenia Bajkału.

Olchon to obszar długotrwałego sezonowego przemarzania gruntu, trwającego 7 miesięcy i sięgającego głębokości 2,4-2,8 m (Trofimova, 2006). Temperatura do -5°C przenika do głębokości 1-1,3 m; a -10°C – do 0,3-0,5 m. Notowane temperatury maksymalne wynoszą natomiast: na głębokości 0,2 m – $18-16^{\circ}\text{C}$; na 0,8 m – 15°C ; 2,6 m – 10°C i na 3,2 m – $9-7^{\circ}\text{C}$ (Trofimova, 2006). Najniższe wartości temperatury gleby na głębokości 3,2 m notowane są najczęściej w maju, a najwyższe w październiku. Opóźnienie występowania temperatury maksymalnej wraz z głębokością wynosi około 30 dni na każdy metr głębokości.

Okres, w którym przypowierzchniowa warstwa gruntu rozmarza wynosi 5-6 miesięcy i trwa od maja do października. W okresie tym gwałtownie wzrasta temperatura powietrza, której maksymalne dobowe wartości już w maju przekraczają 20°C . Stan taki utrzymuje się do końca sierpnia (*Raspisanije pogody*).

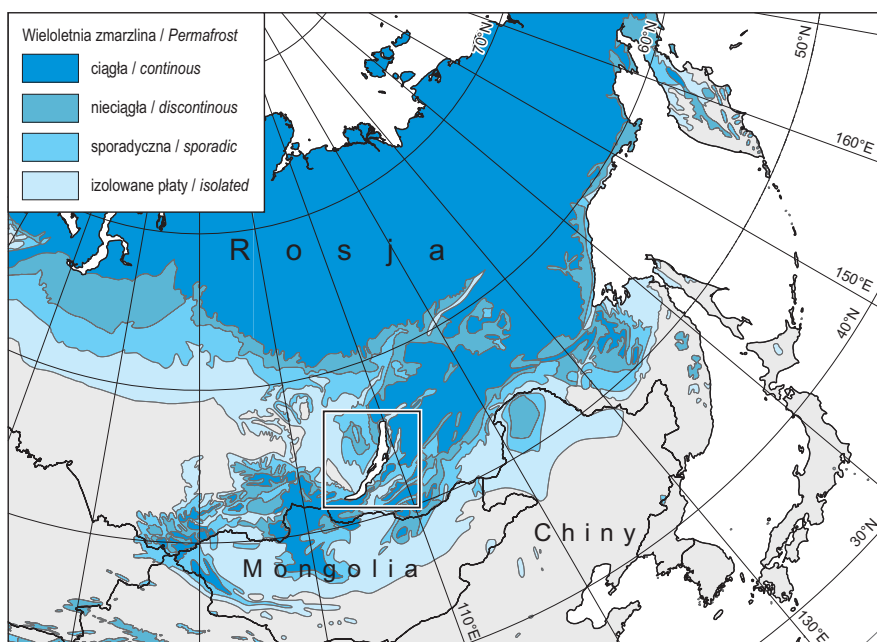
Podobnie jak na wielu obszarach globu obserwuje się tutaj wzrostową tendencję temperatury powietrza (ryc. 2). Średnia roczna temperatura powietrza na Olchonie w latach 1966-2006 w stosunku do lat 1947-1965 wzrosła o około 1°C , z $-1,4^{\circ}\text{C}$ do $-0,4^{\circ}\text{C}$ w północnej części wyspy i z $-2,2^{\circ}\text{C}$ do $-1,3^{\circ}\text{C}$ w części środkowej.



Ryc. 2. Średnia roczna temperatura powietrza w latach 1951-2011 na stacji meteorologicznej Chuzhir na Olchonie (za Tyszkowski i inni, 2015, zmienione)
Mean air temperature in 1951-2011 for the weather station in Khuzhir on Olkhon (after Tyszkowski *et al.*, 2015, changed)

wej (Berkin i inni, 2009). Ocieplenie klimatu oraz wzrost ilości opadów szczególnie w okresie zimowym skutkuje podniesieniem temperatury gruntu, co sprzyja degradacji wieloletniej zmarzliny (Šerštůkov, 2008; Sherstyukov i inni, 2008)

Teren badań położony jest na południowym skraju wyspowego, rzadkiego zasięgu wieloletniej zmarzliny (ryc. 3) (Brown i inni, 1998, uzupełnione 2001), która występuje w dolinach rzek, na obszarach zabagnionych i na stokach o ekspozycji północnej. Jej miąższość dochodzi do 30 m. Warstwa czynna osiąga miąższość 0,5-1,0 m w gruntach zatorfionych oraz do 3 m i więcej w gruntach mineralnych. Wieloletnia zmarzlina na tym obszarze jest w stanie skrajnie niestabilnym. Jej temperatura waha się od $-0,2^{\circ}\text{C}$ do $-0,5^{\circ}\text{C}$ i przy niewielkich zmianach warunków klimatycznych bardzo szybko ulega degradacji (Pal'shin, 1968).

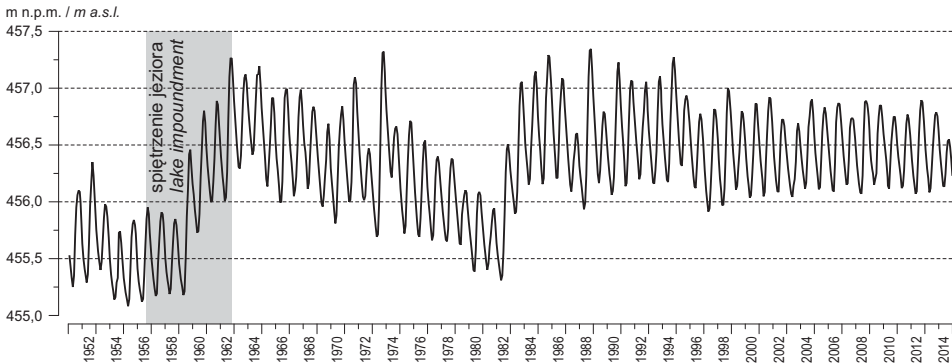


Ryc. 3. Mapa zasięgu zmarzliny (dane źródłowe za Brown i inni, 1998)

Map of permafrost range (source data from Brown *et al.*, 1998)

Istotne znaczenie dla współczesnych procesów geomorfologicznych zachodzących w strefie brzeżnej wyspy Olchon mają wahania poziomu wody w jeziorze Bajkał. W 1956 r. w Irkucku oddano do użytku pierwszy z pięciu zaplanowanych stopni wodnych kaskady Angary, jedyne go wypływu z jeziora Bajkał. Stopień ten zlokalizowany jest na 65 km biegu rzeki. Jego budowa miała na celu spiętrzenie górnego odcinka Angary i jego przekształcenie w Zbiornik Irkucki. Napełnianie

zbiornika, które miało miejsce w latach 1956-1958 skutkowało podniesieniem poziomu wody w Bajkale o 1,2 m (ryc. 4), w stosunku do średniej wieloletniej (Trzcinskij i inni, 2009). W efekcie funkcjonowania zbiornika zmianie uległy roczne wahania poziomu wody w jeziorze: przed powstaniem zbiornika wahania te nie przekraczały 0,80 m, podczas gdy w latach 1956-2001 zmieniały się w zakresie od 0,62 (1972) do 1,83 (1973) przy maksymalnej amplitudzie 2,21 m. Od 2001 r. mieszczą się one w zakresie od 0,62 do 0,93 m (Uroven ozera..., 2008).



Ryc. 4. Średni miesięczny poziom wody na Bajkale

Dane źródłowe za okres 1951-2008 – Uroven..., 2008;
za okres 2008-2010 Gosudarstvennyj doklad...; za okres 2010-2014 Eżednevnyje srednije...

Avarange monthly water level in Lake Baikal

Source data periods: 1951-2008 Uroven..., 2008; 2008-2010 Gosudarstvennyj doklad...;
2010-2014 Eżednevnyje srednije...

W wyniku spiętrzenia na brzegu jeziora Bajkał obserwowano liczne podtopienia plaż i ujściowych fragmentów rzek oraz intensyfikację procesów brzegowych. Procesy te obecnie ulegają wyraźnemu wygaszeniu.

Metody

Wstępny wybór obszarów do badań szczegółowych nastąpił na podstawie analizy archiwalnych zdjęć lotniczych z lat 1950. i współczesnych obrazów satelitarnych. Dalsze prace prowadzone bezpośrednio w terenie obejmowały głównie kartowanie geologiczne i geomorfologiczne w obrębie badanych osuwisk i ich najbliższego otoczenia, wraz z wykonaniem wierceń geologicznych. Wykonano pomiary geodezyjne osuwisk określając wielkość i nachylenie form oraz wysokość i orientację skarp osuwiskowych. Z wkopów i odsłoniętych ścian osuwisk pobrano próbki gruntu do badań geotechnicznych i granulometrycznych. Wykonano także pomiar tempera-

tury gruntu do głębokości 3,5 m. Wielkość obecnych przemieszczeń powierzchniowych i wgłębnych pomierzono z wykorzystaniem założonej sieci reperów.

Wyniki

Osuwiska na Olchonie występują niemal wyłącznie w strefie brzegowej wyspy, a ich charakter pozostaje w ścisłym związku z budową geologiczną i morfologią terenu.

Dominującą formą ruchów masowych na wysokich, skalistych brzegach są obrywy. Pojawiają się na stromym południowo-wschodnim brzegu, którego wysokości względne wahają się od 150 do ponad 500 m, a nachylenie stoków wynosi od 25 do ponad 50 stopni (fot. 1). Wysokie, okresowo aktywne skarpy występują

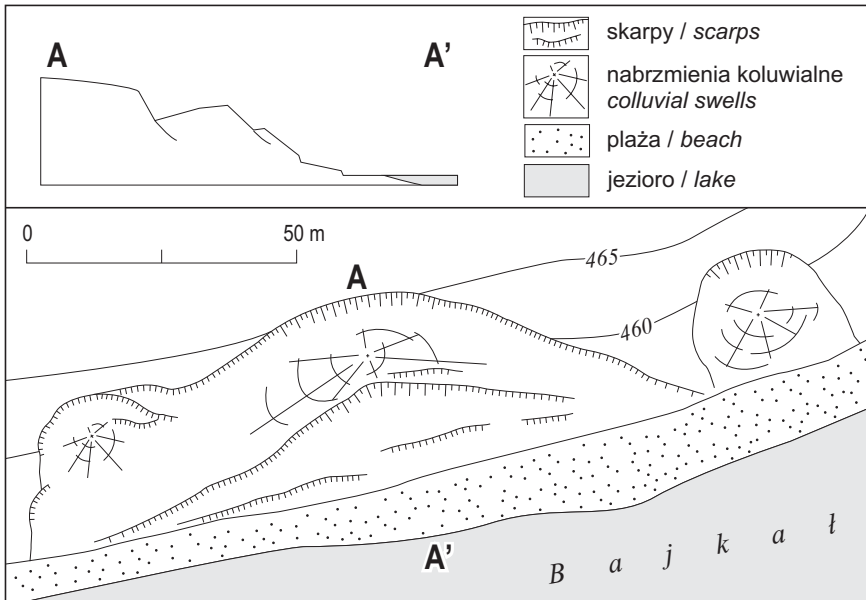


Fot. 1. Fragment południowego, skalistego brzegu Olchonu
Part of the southern, rocky shore of Olkhon
(Fot. – wszystkie/Photo – all of them: S. Tyszkowski)

na długości blisko 35 km południowo-wschodniego brzegu, co stanowi 17% całkowitej długości linii brzegowej wysp. Lokalnie, w tej części wybrzeża obserwowane są również spływy gruzowe i skalne. Formy tego typu powstają co kilkanaście lat w efekcie nawalnych opadów deszczu lub podczas intensywnych roztopów. Obrywy występują również w klifach północno-zachodniego brzegu, w miejscach wychodni skał krystalicznych. Tam też obserwowane są nieliczne osypiska luźnych, zwie-

trzałych skał. Bezpośrednim powodem aktywizacji tego typu ruchów masowych na szerszą skalę są w tym obszarze najczęściej wstrząsy sejsmiczne.

Na północno-zachodnim, łagodnym brzegu wyspy, na zadarnionych stokach o nachyleniu od 9 do 20 stopni występują osuwiska rotacyjne. Są to formy niewielkie o powierzchni od około 500 do 2500 m², których deniwelacja wynosi od 5 do 20 metrów, przy średnim nachyleniu powierzchni koluwiów 10-15 stopni i ich miąższości od 1 do 3 metrów (ryc. 5, fot. 2).



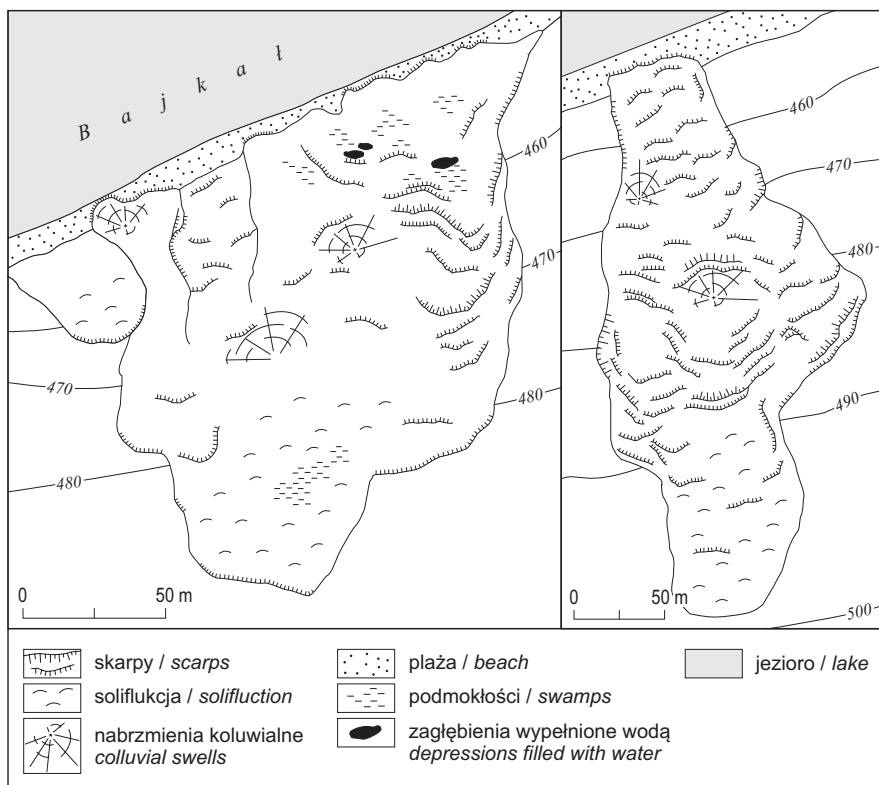
Ryc. 5. Szkic osuwiska rotacyjnego
Sketch of a rotational landslide

W morfologii tych osuwisk zaznacza się wyraźnie skarpa główna, o wysokości od 2 do 4 m i nachyleniu 45-55 stopni. Często występują również 2-3 skarpy wtórne. Jęzory koluwialne zdecydowanej większości osuwisk schodzą bezpośrednio do Bajkału. W okresach sztormowych, szczególnie przy wysokim poziomie wody w jeziorze, utwory te są rozmywane, a czołowe partie jęzorów osuwiskowych przyjmują postać niewielkich, wysokich na około 0,5 m pionowych klifów. Osuwiska te rozwijają się najczęściej w wyniku przemieszczenia w formie zsuwu rotacyjnego pakietów materiału, przy zachowaniu ich struktury wewnętrznej. Wykonane wiercenia wskazują, że formy te funkcjonują poza lokalnym zasięgiem zwierciadła wód gruntowych. Zdecydowana większość z nich rozwija się w obrębie pokrywy glin zwietrzelinowych. Obserwowane osuwiska rotacyjne są

formami różnowiekowymi. W większości przypadków po wystąpieniu głównego ruchu osuwiskowego nie dochodzi do wtórnych przemieszczeń.

Szczególnie interesujące z punktu widzenia współczesnych procesów geomorfologicznych są osuwiska związane z uwarunkowaniami klimatycznymi, tj. obecnością wieloletniej zmarzliny i funkcjonowaniem warstwy czynnej. Formy o takiej genezie rozwijają się na zachodnim brzegu wyspy, niemal wyłącznie na stokach schodzących bezpośrednio do Bajkału, których nachylenie nie przekracza 12-15 stopni. Najliczniej występują w środkowej części zachodniego wybrzeża wyspy w pobliżu miejscowości Charancy, nad zatoką Charałgaj i Bajan-Szungen, tworząc Kompleks Osuwisk Charancy (KOCh).

Wchodzące w jego skład osuwiska mają powierzchnię od 4000 do 135 000 m², w większości sąsiadują ze sobą, a granice pomiędzy poszczególnymi formami wyróżnić można na podstawie zróżnicowania aktywności. Długość osuwisk wynosi 150-300 m przy szerokości od 140 do 460 m (ryc. 6). Różnice wysokości wynoszą od 20 do 55 m. Zarówno granice, jak i morfologia w części dolnej i śród-



Ryc. 6. Szkic osuwisk z okolic Charancy
Sketch of landslides in the Kharantsy area



Fot. 2. Małe osuwiska w strefie brzegowej Olkhonu
Small landslides along the Olkhon shore line



Fot. 4. Obniżenia w górnej części osuwiska, okresowo wypełniane wodą
Depressions temporary filled with water in the top of the landslide



Fot. 3. Jedno z osuwisk Kompleksu Osuwisk Charancy
One of the landslides forming the Kharantsy Landslides Complex

kowej są bardzo wyraźne, natomiast w przypadku wielu form skarpa główna jest słabo wyrażona. Osuwiska zaczynają się niewielkimi nabrzmieniami terenu, które w części centralnej przechodzą w deniwelacje rzędu 2 m, podkreślone skarpami wtórnymi, rozcięte licznymi szczelinami, dochodzącymi do głębokości 0,5 m (fot. 3). W osuwiskach przejawiających większą aktywność w górnej części stoku występują wysięki wód gruntowych (fot. 4), które następnie gromadzą się często w niewielkich obniżeniach poniżej skarpy wtórnych.

Na obszarze KOCh wyróżniono dwa główne mechanizmy rozwoju ruchów masowych, często spotykane w obrębie jednego osuwiska. Pierwszy z nich związany jest z obecnością wieloletniej zmarzliny, procesem jej rozmarzania i zanikania. Pod względem morfologii i genezy osuwiska te są podobne do opisywanych przez M.O. Leibman (1995) *shearing slides*¹ (*active layer detachment failures* wg klasyfikacji Associate Committee on Geotechnical Research (*Glossary...*, 1988), a także *active layer glide* i *slumps* opisywanych przez A.G. Lewkowicza (1988).

Osuwiska powstałe w ten sposób są silnie wyrażone w morfologii terenu. Powierzchnie poślizgu mają zasięg głębokości do 3-5 metrów, a wysokość skarpy głównych wynosi nawet 5 m. Formy aktywne często graniczą z nieaktywnymi. Osuwiska powstają wskutek zmniejszenia spójności gleby spowodowanego przez wodę pochodzącą z wytopienia lodu gruntowego, co jednocześnie umożliwia infiltrację wilgoci w głębsze warstwy gruntu. Proces ten staje się bardziej intensywny w przypadku gdy powierzchnia poślizgu znajduje się na powierzchni stropu wieloletniej zmarzliny. Osuwiska takie funkcjonują tak długo, aż nie wyczerpie się potencjał związany z obecnością bądź oddziaływaniem wieloletniej zmarzliny, wówczas przemieszczenia stają się mniej wyraźne bądź ustają.

Drugą przyczyną ruchów masowych na Olchonie jest soliflukcja, szczególnie wyraźna w górnych partiach nadbrzeżnych stoków położonych na północnym brzegu wyspy. Zasięg wgłębny warstwy czynnej w tym procesie dynamicznie zwiększa się w ciągu roku wraz ze wzrostem temperatury powietrza. Grubość przemieszczonych w ten sposób mas gruntu wynosi około 0,5 m w górnej części stoku, a następnie rośnie w wyniku kumulacji nawet do 3 m u jego podstawy, w pobliżu brzegu jeziora. Z uwagi na trudności w ocenie tempa przemieszczeń, w wielu przypadkach problematyczne jest odróżnienie fragmentów transformowanych w wyniku soliflukcji od tych przekształconych przez ruchy typu *skinflows*.

Czynniki geologiczne

Zbocze, w obrębie którego rozwijają się osuwiska Kompleksu Osuwisk Charancy, buduje kompleks neogeńsko-czwartorzędowych utworów ilastych stanowiących wyniesione tektonicznie poziomy jeziorne Bajkału, fragmentarycznie występują także gliny zwiertzelinowe. Utwory te rozciągają się wzdłuż brzegu na

¹ W przypadku gdy brak jest jednoznacznego tłumaczenia terminu w języku polskim lub nie występuje on w słowniku Van Everdingen (2005), użyto terminów anglojęzycznych z literatury źródłowej.

długości 10 km przy szerokości 2,0-2,5 km, zalegając bezpośrednio na podłożu krystalicznym.

Dominujące neogeńskie ily jeziorne cechują się bardzo dobrym wysortowaniem. Ich frakcję stanowi ił (46%) i drobny pył (48%). Grunty te mają również bardzo niskie parametry mechaniczne (m.in. granica plastyczności $w_p=35\%$, granica płynności $w_L=94\%$, wskaźnik plastyczności $I_p=59\%$). Wysoka aktywność gruntu (wg Skemptona) $A=1,26$ wskazuje, że grunty są bardzo wrażliwe na obecność wody. W przypadku wielu osuwisk warstwa powierzchniowa gruntu do 0,5 m znajduje się w stanie plastycznym. Grunty charakteryzuje zróżnicowana gęstość objętościowa (do $1,9 \text{ g cm}^{-3}$) i wilgotność wagowa do 90%.

Ponadto cechują się bardzo wysoką potencjalną ekspansywnością (wg nomogramu Van der Merwe, 1964), potencjałem pęcznienia około 15% na podstawie nomogramu Seeda i innych (1962) oraz ekstremalnie wysoką plastycznością (wg Head, 1992).

Rozwój osuwisk KOCh uwarunkowany jest głównie przez funkcjonowanie warstwy czynnej wieloletniej zmarzliny. Wiercenia wykonywane w centralnych częściach osuwiska, w lipcu i sierpniu 2009 r., w pełni sezonu letniego, potwierdziły obecność pozostałości sezonowo zamrożonych gruntów na głębokości od 2,0 do 3,5 m. Ich zmierzona temperatura wynosiła $-0,2^\circ\text{C}$.

W okresie letnim osuwiska zasilane są wodami opadowymi, ich maksimum przypada na sierpień i wrzesień, w których łączna suma wynosi 60-100 mm, tj. 40-50% sumy rocznej (lata 2010-2012; *Raspisanije pogody*). Zasięg powierzchniowego spływu wód opadowych poszczególnych osuwisk jest niewielki, jednak w trakcie nawalnych opadów woda niemal w całości spływa z położonych powyżej stoków, zasilając osuwiska.

Woda występująca w obrębie osuwisk pochodzi także z wiosennego rozmarzania lodu gruntowego. Wraz z postępującym coraz głębiej rozmarzaniem gruntu, wody te powoli infiltrują głównie za pośrednictwem licznych spękań i szczelin w koluwiach. Wilgoć jest dostarczana do głębszych warstw – to powoduje osłabienie ich parametrów wytrzymałościowych.

Zarejestrowane między 2010 a 2012 rokiem wielkości przemieszczeń poziomych w jedynej z monitorowanych pod tym kątem form, w 10-centymetrowej, przypowierzchniowej warstwie gruntu, wynoszą od 70 mm w górnej części osuwiska, do 30 mm w części środkowej. Wgłębny zasięg przemieszczeń waha się od 1,15 m w górnej części osuwiska do 0,64 m w części środkowej. Jęzory osuwiskowe wszystkich występujących tutaj form wkraczają na powierzchnię plaży, na odległość do 5-10 m, gdzie ulegają rozmywaniu wodami Bajkału. Zakończenia jęzorów osuwiskowych przyjmują formę aktywnych klifów o wysokości od kilkunastu centymetrów do 3 m. Na podstawie analizy archiwalnych zdjęć lotniczych z 1953 r., tj. z okresu poprzedzającego spiętrzenie jeziora oraz współczesnych obrazów satelitarnych z 2006 r. stwierdzono powiększanie się form wcześniej istniejących, jak również pojawienie się nowych form osuwiskowych w obszarach wcześniej stabilnych.

Dyskusja

Większość opisanych osuwisk jest w ściśle powiązana z warunkami klimatycznymi i obecnością wieloletniej zmarzliny oraz procesami mrozowymi. A.G. Lewkowicz (1988) wyraźnie zaznacza, że wyniki uzyskane na podstawie badań fragmentu stoku objętego kriogenicznymi ruchami masowymi mogą być reprezentatywne tylko dla obszaru o bardzo zbliżonym zespole czynników klimatycznych, geologicznych, geomorfologicznych, hydrologicznych i wegetacyjnych, co sprawia, że są one reprezentatywne tylko dla niewielkich obszarów geograficznych. Olchon cechuje się łagodniejszym klimatem niż tereny, na których najczęściej opisywane są osuwiska kriogeniczne – jak północna Syberia (obszar Jamalu) czy Kanada (delta Mackenzie). Ponadto w obszarach północnych najczęściej zmarzlina ma charakter ciągły i jest bogata w lód (*ice-rich permafrost*), co w przypadku nagłego jej wytapiania przekłada się na większą spektakularność procesów osuwiskowych. Niemniej w przypadku osuwisk kriogenicznych na Olchonie można zaobserwować pewne podobieństwa do innych form znanych z literatury.

Osuwiska typu *active layer detachment* rozwinięte głównie w górnej i środkowej części nadbrzeżnych stoków Olchonu mają wspólne cechy z obiektami opisywanymi przez M.O. Leibman (1995, 1997) i A.G. Lewkowicza (1988) jako *skinflow*. Rozwijają się podobnie na stokach o nachyleniu 6-12 stopni, na Olchonie formy mają większą miąższość niż na Jamale (Leibman, 1995, 1997; Khomutov i Leibman, 2014) gdzie sięgają 0,25-1,0 m. A.G. Lewkowicz (1988) tym bardziej uważa, że miąższości osuwisk rzędu 1,5-2,0 m można uznać za typowe dla obszarów położonych bardziej na południe, wiążąc to z wyższymi temperaturami powietrza.

Z kolei formy występujące w środkowej i dolnej części stoków mają charakter przemieszczeń typu zsuwów bardziej niż spływów, analogicznie do *active layer glide* i *slumps* opisanych przez A.G. Lewkowicza (1988). Powstają one również przy udziale warstwy czynnej, ale przy nachyleniach stoku powyżej 10 stopni. Lewkowicz ponadto wskazuje, że takie przemieszczenia (tj. *active layer glide*) są odpowiednikiem mechanizmu powstawania form typu *block slide*, *detachment failure* i *active layer detachment*. Ich pochodzenie przypisuje się zazwyczaj obecności wieloletniej zmarzliny z dużą zawartością lodu (*ice-rich permafrost*) i wystąpieniu nagłych roztopów, pożarów czy ulewnych deszczy (Lewkowicz, 1988; Leibman, 1995). Ponadto M.O. Leibman (1995) podkreśla znaczącą rolę wód pochodzących z topienia lodu gruntowego (*ground ice meltwater*), które powodują szybsze tajanie warstwy czynnej.

Wpływ budowy geologicznej, właściwości gruntu oraz spiętrzenia jeziora

Przestawione wcześniej parametry gruntu, w obrębie których rozwijają się osuwiska KOCh, wskazują na dużą podatność gruntu na utratę stabilności. Uwagę na zależność między obecnością drobnoziarnistych gruntów a powstawaniem osuwisk kriogenicznych zwracali m.in. L.D. Dyke (2004), R.R. Lyle i inni (2004) czy A.G. Lewkowicz (1988). Właściwości gruntów spoistych, takie jak wytrzymałość na ścinanie czy ściśliwość w dużym stopniu są determinowane przez ich współdziałanie z wodą. Ponadto do obniżenia parametrów wytrzymałościowych ilów dochodzi w wyniku przemarzania, który to proces powoduje obniżenie wartości granicy płynności i granicy plastyczności poprzez zmiany mikrostruktury gruntu (Choma-Moryl, 2007; Kumor, 1985, 1989). W wyniku przemrożenia granica płynności zmienia się od 2-3 do kilkudziesięciu procent, a największe zmiany obserwowane są po 1-3 takich cyklach. Grunty przemrożone prędzej przechodzą w stan płynny, a trzykrotny cykl zamarzania i odmarzania powoduje największy wzrost przepuszczalności (Kumor, 1989; Choma-Moryl, 2007).

Wraz z obniżaniem się stropu wieloletniej zmarzliny coraz głębsze warstwy gruntu włączane są w proces oddziaływania warstwy czynnej. Cykliczne zamarzanie gruntu prowadzi m.in. do zwiększenia infiltracji i skutkuje rozwojem coraz głębszych osuwisk. Największych zmian w morfologii terenu można spodziewać się w pierwszych latach po naruszeniu długoletniej równowagi termicznej gruntu.

Na wpływ współczesnych zmian klimatu na procesy stokowe w obszarach występowania wieloletniej zmarzliny zwracali w ostatnich latach uwagę m.in. L.D. Dyke i G.R. Brooks (2000), C.A. Huschorf i inni (2004), Lyle i inni (2004). Na Olchonie od połowy lat 1960. obserwuje się wzrost temperatury powietrza (Berkin i inni, 2009), wzrost grubości pokrywy śnieżnej (Anisimov i inni, 2007; Sherstyukov, 2008) oraz powolny wzrost temperatury gruntu (Trofimova, 2006). Olchon to obszar, na którym sezonowe przemarzanie gruntu sięga na głębokość do 2,4-2,8 m i trwa do 7 miesięcy, latem zaś intensywnie rozmarza. Temperatura -5°C przenika na głębokość 1,0-1,3 m; a -10°C na głębokość 0,3-0,5 m. Maksymalna temperatura gleby wynosi na głębokości 0,2 m $18-16^{\circ}\text{C}$, na 0,8 m -15°C ; na 2,6 m 10°C i $9-7^{\circ}\text{C}$ na 3,2 m. Opóźnienie występowania temperatury maksymalnej wraz z głębokością wynosi około 30 dni na każdy metr głębokości (Trofimova, 2006). Oznacza to, że maksymalna temperatura na powierzchni terenu jest rejestrowana w lipcu, a na głębokości 3,2 m w październiku.

Średnia roczna temperatura w całym 3,2 m profilu gruntu na Olchonie za lata 1964-2000 wynosiła $2,9^{\circ}\text{C}$ i podobnie jak w przypadku temperatury powietrza obserwuje się jej wyraźny wzrost, średnio o $0,45^{\circ}\text{C}$ na 10 lat. W latach 1990. wzrost ten był znacznie wyższy i wyniósł $0,6^{\circ}\text{C}$, natomiast średnia roczna tem-

peratura powietrza w tym okresie wzrosła o 0,36°C. Temperatura gleby w dolnej części profilu, na głębokości 3,2 m, bardzo długo pozostawała stabilna. Wyraźny, trwały jej wzrost zaznaczył się od 1989 r. (Trofimova, 2006).

Grunt rozmarza do głębokości 1,6 m na okres 5-6 miesięcy, od maja do października (Trofimova, 2006). Na początku tego okresu temperatura powietrza gwałtownie wzrasta. Wartości maksymalne powyżej 20°C występują już pod koniec maja i utrzymują się do końca sierpnia (*Raspisanije pogody*).

Można założyć, iż przy zachowaniu tendencji do ocieplania klimatu w rejonie Przybajkała (Voropay i inni, 2011), temperatura gleby będzie wzrastała, a warstwa aktywnej akumulacji ciepła w gruncie rozszerzy się w efekcie obniżenia stropu zmarzliny. Zmiany te mogą spowodować degradację wieloletniej zmarzliny, który to proces obserwowany jest już w regionie Bajkału, w Mongolii i Chinach (Gavrilova, 2007). Pozwala to przypuszczać, że zmiany warunków klimatycznych prowadzące do pogłębiania czynnej warstwy gruntu spowodują wzrost aktywności osuwisk i procesów soliflukcyjnych.

Ważnym czynnikiem rozwoju osuwisk na Olchonie było również wspomniane podniesienie poziomu wody w jeziorze Bajkał o 1,2 m. Spowodowało to jednocześnie wzrost poziomu wód gruntowych w strefie brzegowej, co lokalnie mogło skutkować przyspieszeniem procesu rozmarzania gruntu oraz wydłużyć okres oddziaływania soliflukcji. Podobne zjawisko opisał O.L. Hughes (1972) w strefie występowania wieloletniej nieciągłej zmarzliny w dolinach rzecznych, w których następowało podcinanie jeziorów koluwalnych przez erozję rzeczną. Niemniej już samo podniesienie poziomu wody w zbiorniku wystarcza aby wyraźnie aktywizować nadbrzeżne ruchy masowe (Wei i inni, 2006; Banach i inni, 2013). Obecnie proces abrazji czoł osuwisk na Olchonie obserwowany jest głównie w okresie wysokich stanów wody w jeziorze oraz w trakcie burz i sztormów.

Jak zauważył M.J. Crozier (2010), monitoring ruchów masowych w obszarach wrażliwych, tzw. geoindykatorach, do jakich należą obrzeża występowania wieloletniej zmarzliny czy strefy brzegowe akwenów, może dostarczyć cennych danych dotyczących mechanizmów i tempa zachodzących współcześnie zmian w środowisku. Wiele wskazuje, że Olchon jest jednym z takich miejsc.

Podsumowanie

Na obszarze Olchonu stwierdzono występowanie różnego typu ruchów masowych: obrywów, spływów gruzowych i skalnych, osuwisk rotacyjnych oraz osuwisk kriogenicznych. Przedmiotem szczegółowych badań były osuwiska kriogeniczne występujące w okolicach miejscowości Charancy, tworzące Kompleks Osuwisk Charancy. Ich rozwój uwarunkowany jest obecnością wieloletniej zmarzliny i funkcjonowaniem warstwy czynnej. Rozwojowi form kriogenicznych sprzyja w tym obszarze występowanie iłw plioceńskich, wyniesionych dawnych teras jeziora Bajkał. Na obszarze KOCh wyróżniono dwie główne przyczyny

występowania ruchów masowych: pierwszą jest obecność zmarzliny, proces jej rozmarzania i zanikania, drugą zaś jest soliflukcja, szczególnie wyraźna w górnych partiach stoków na północnym brzegu wysyp. Dodatkowym czynnikiem intensyfikującym te procesy może być podpiętrzenie jeziora w latach 1950.

Obserwowany od lat 1960. na obszarze Olchonu wzrost temperatury powietrza powoduje wzrost temperatury gruntu, a co za tym idzie wzrost miąższości warstwy czynnej gruntu i degradację wieloletniej zmarzliny. Jeśli tendencja zmian klimatu się utrzyma, można spodziewać się dalszego intensywnego rozwoju osuwisk na obszarze wyspy.

Piśmiennictwo / References

- Anisimov O.A., Lobanov V.A., Reneva S.A., 2007, *Analysis of changes in air temperature in Russia and empirical forecast for the first quarter of the 21st century*, Russian Meteorology and Hydrology, 32, 10, s. 620-626. doi: 10.3103/s1068373907100020.
- Banach M., Kaczmarek H., Tyszkowski S., 2013, *Rozwój osuwiska w strefie brzegowej sztucznych zbiorników wodnych na przykładzie osuwiska centralnego w Dobrzyniu nad Wisłą, zbiornik włocławski*, Przegląd Geograficzny, 85, 3, s. 397-415.
- Berkin N.S., Makarov A.A., Rusinek O.T., 2009, *Bajkalovedenije: učebnoje posobije*, Irkutskij Gosudarstvennyj Universitet, Irkutsk.
- Brown J., Ferrians Jr. O.J., Heginbottom J.A., Melnikov E.S., 1998, revised February 2001, *Circum-arctic Map of Permafrost and Ground Ice Conditions*, Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center. Digital media.
http://nsidc.org/data/docs/fgdc/ggd318_map_circumarctic/#5. (7.09.2015)
- Choma-Moryl K., 2007, *Ocena wpływu ujemnych temperatur na plastyczność i pęcznienie wybranych gruntów spoistych*, Geologos, 11, s. 439-446.
- Crozier M.J., 2010, *Deciphering the effect of climate change on landslide activity: a review*, Geomorphology, 124, 3-4, s. 260-267. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.04.009
- Dyke L.D., 2004, *Stability of frozen and thawing slopes in the Mackenzie Valley, Northwest Territories*, [w:] *Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference, Quebec City, Quebec*, Session 1G, ISSMGE, Quebec City, s. 31-38.
- Dyke L.D., Brooks G.R. (red.), 2000, *The Physical Environment of the Mackenzie Valley, Northwest Territories: A Base Line for the Assessment of Environmental Change*, Geological Survey of Canada Bulletin, 547.
- Ežednevnyje srednje urovni vody ozera Bajkal*;
http://sputnik.irk.ru/alt/bajkal_level/html/201502.html (7.09.2015)
- Galazij G.I. (red.), 1993, *Bajkal atlas*, Izdatelstvo Federalnoj służby geodezii i kartografii Ros-sii, Moskwa.
- Gavrilova M., 2007, *Air temperature change in permafrost regions: East Siberia–Mongolia–China*, [w:] *Proceedings of the International Symposium, Asian Collaboration in IPY 2007-2008, 1st March 2007*, Tokyo, Japan.
- Glossary of permafrost and related ground-ice term*, 1988, National Research Council of Canada, Associate Committee on Geotechnical Research, Technical Memorandum, 142.
- Gosudarstvennyj doklad o sostojanii ozera Bajkal i mierach po ego ochranie v 2008 godu*,
http://geol.irk.ru/bajkal/bajkal/rep_2008/pdf/bajkal2008_p1-1-1-1.pdf (7.09.2015)

- GSHAP, *Global Seismic Hazard Assessment Program*, <http://www.seismo.ethz.ch/static/gshap/neurasia/> (7.09.2015)
- Head K.H., 1992, *Manual of Soil Laboratory Testing. Vol. 1, Soil Classification and Compaction Tests*, Pentech Press, London.
- Hughes O.L., 1972, *Surficial geology and land classification, Mackenzie Valley transportation corridor*, [w:] *Proceedings of the Canadian North Pipeline Research Conference, Ottawa, February 1972*, Associate Committee on Geotechnical Research, National Research Council of Canada, Technical Memorandum, 104, s. 17-24.
- Huscroft C.A., Lipovsky P., Bond J.D., 2004, *Permafrost and landslide activity: case studies from southwestern Yukon Territory*, [w:] D.S. Emond, L.L. Lewis (red.), *Yukon Exploration and Geology 2003*, Yukon Geological Survey, Whitehorse, Yukon, s. 107-119.
- Ivanov A.V., Gladkochub D.P., Déverchère J., Ernst R.E., 2013, *Introduction to special issue: geology of the Lake Baikal region*, *Journal of Asian Earth Sciences*, 62, s. 1-3. doi: 10.1016/j.jseaes.2012.12.010.
- Kaczmarek H., Mazaeva O.A., Kozyreva E. A., Khak V., 2012, *Stacjonarne badania procesów egzogenicznych w strefie brzegowej Zbiornika Brackiego (południe Syberii Wschodniej)*, *Landform Analysis*, 20, s. 47-59.
- Khomutov A., Leibman M., 2014, *Assessment of landslide hazards in a typical tundra of Central Yamal, Russia*, [w:] W. Shan, Y. Guo, F. Wang, H. Marui, A. Strom (red.), *Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change*, Environmental Science and Engineering, Springer International Publishing, Switzerland, s. 271-290. doi: 10.1007/978-3-319-00867-7_20.
- Konoplev S.P. (red.), 1964, *Geologičeskaja karta SSSR, masštab 1:200 000, Pribajkalskaja serija*, Gosudarstvennyj geologičeskij komitet SSSR, Nedra, Moskva.
- Koven C.D., Riley W.J., Stern A., 2012, *Analysis of permafrost thermal dynamics and response to climate change in the CMIP5 earth system models*, *Journal of Climate*, 26, 6, s. 1877-1900. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00228.1
- Kumor M.K., 1985, *Zmiany wytrzymałości i struktury iltu plioceńskiego pod wpływem zamrażania*, *Archiwum Hydrotechniki*, 32, 3/4.
- Kumor M.K., 1989, *Zmiany mikrostruktury iltów monomineralnych i iltu plioceńskiego pod wpływem cyklicznego przemrażania i odmrażania*, *Rozprawy*, 34, Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz.
- Leibman M.O., 1995, *Cryogenic landslides on the Yamal Peninsula, Russia: preliminary observations*, *Permafrost Periglacial Processes*, 6, 3, s. 259-264. doi: 10.1002/ppp.3430060307.
- Leibman M.O., 1997, *Kriolitologičeskije osobennosti sezonntalogo sloja na sklonach s procesom kriogennogo opolzanija*, *Kriosfera Zemli*, 1, 2, s. 50-55.
- Lewkowicz A.G., 1988, *Slope processes*, [w:] M.J. Clark (red.), *Advances in Periglacial Geomorphology*, Wiley, Chichester, UK, s. 325-368.
- Lunina O.V., Gladkov A.S., Szerstiankin P.P., 2010, *Novaja elektronmaja karta aktivnych razlomov juga Vostočnoj Sibiri*, *Doklady RAN*, 433, 5, s. 662-667.
- Lyle R.R., Hutchinson D.J., Preston Y., 2004, *Landslide processes in discontinuous permafrost, Little Salmon Lake (NTS 105L/1 and 2), south-central Yukon*, [w:] D.S. Emond, L.L. Lewis, G.D. Bradshaw (red.), *Yukon Exploration and Geology 2004*, Yukon Geological Survey, s. 193-204.
- Mel'nikova V.I., Gileva N.A., Radziminovich N.A., Masal'skii O.K., Chechel'nikskii V.V., 2010, *Seismicity of the Baikal rift zone for the digital recording period of earthquake observation (2001-2006)*, *Seismic Instruments*, 46, 2, s. 193-206. doi: 10.3103/S0747923910020076

- Nadim F., Kjekstad O., Peduzzi P., Herold C., Jaedicke C., 2006, *Global landslide and avalanche hotspots*, *Landslides*, 3, 2, s. 159-173. doi:10.1007/s10346-006-0036-1.
- Paľšín G.B., 1968, *Inženernaja geologija Pribajkalja*, Nauka, Moskva.
- Pulina M., 1968, *The Eastern Siberian karst*, *Geographia Polonica*, 14, s. 109-118.
- Raspisanije pogody*, <http://rp5.ru> (7.09.2015)
- Seed H.B., Woodward R.J., Lundgren R., 1962, *Prediction of swelling potential for compacted clays*, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 88, SM-3, 1, s. 53-87.
- Šerstúkov A.B., 2008, *Korrelacija temperatury počvogruntov s temperaturoj vozduha i vysotoj snežnogo pokrova na territorii Rossii*, *Kriosfera Zemli*, 12, 1, s. 79-87.
- Sherstyukov A.B., Sherstyukov B.G., Groisman P.Y., 2008, *Impact of surface air temperature and snow cover depth on the upper Soil temperature variations in Russia*, [w:] D.L. Kane, K. M. Hinkel, *Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, University of Alaska Fairbanks, June 29–July 3, 2008*, 2, s. 1643-1646.
- Smith L.C., Sheng Y., MacDonald G.M., Hinzman L.D., 2005, *Disappearing arctic lakes*, *Science*, 308, s. 1429. doi: 10.1126/science.1108142.
- Szczypek T., Wika S., Snytko W. A., 2004, *Bajkał*, Beskidzka Wyższa Szkoła Turystyki, Żywiec.
- Trofimova I.E., 2006, *Sovremennoje sostojanije i tendencii mnogoletnich izmenenij merzlotno-termičeskogo režima počv Pribajkalja*, *Geografia i prirodnyje resursy*, 4, s. 38-45.
- Trzcinskij J.B., Kozyriewa E.A., Szczypek T., 2009, *Wahania poziomu Bajkału a proces zabagniania jego wybrzeży (na przykładzie przesmyku Czewyrkujskiego – Miagkaja Karga – i jego okolic*, [w:] A.T. Jankowski, D. Absalon, R. Machowski, M. Ruman (red.), *Przeobrażenia stosunków wodnych w warunkach zmieniającego się środowiska*, Sosnowiec University, Sosnowiec, s. 279-291.
- Tyszkowski S., Kaczmarek H., Słowiński M., Kozyreva E., Brykała D., Rybchenko A., Babičeva V.A., 2015, *Geology, permafrost, and lake level changes as factors initiating landslides on Olkhon Island (Lake Baikal, Siberia)*, *Landslides*, 12, s. 573-583. doi: 10.1007/s10346-014-0488-7.
- Uroven' ozera Bajkał, Ocenka kolebanij ozera v 2008 godu*, 2008, *Bulleten GEM*, http://geol.irk.ru/bajkał/bajkał/bulletins/levelbaik_08/public.htm
- Uroven ozera*, 2012, [w:] *O sostojanii ozera Bajkał i mierach po ego ochrane v 2011 godu – gosudarstvennyj doklad*, Moskva, s. 11-16; <http://geol.irk.ru/bajkał/bajkał.htm>
- Van Everdingen R. O. (red.), 2005, *Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms*, International Permafrost Association, The Arctic Institute of North America, University of Calgary, Calgary, Alberta, Kanada.
- Van der Merwe D.H., 1964, *The prediction of heave from the plasticity index and percentage clay fraction of soils*, *Civil Engineering*, South Africa, 6, 6, s. 103-106.
- Voropay N.N., Maksyutova E.V., Balybina A.S., 2011, *Contemporary climatic changes in the Predbaikalie region*, *Environmental Research Letters*, 4, 045209. doi: 10.1088/1748-9326/6/4/045209.
- Wang B., Paudel B., Li H., 2009, *Retrogression characteristics of landslides in fine-grained permafrost soils, Mackenzie Valley, Canada*, *Landslides*, 6, 2, s. 121-127. doi: 10.1007/s10346-009-0150-y.
- Wei M., Fujun N., Satoshi A., Dewu J., 2006, *Slope instability phenomena in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau, China*, *Landslides*, 3, 3, s. 260-264. doi:10.1007/s10346-006-0045-0.

SEBASTIAN TYSZKOWSKI, HALINA KACZMAREK, MICHAŁ SŁOWIŃSKI, ELENA KOZYREVA, DARIUSZ BRYKAŁA, ARTIOM RYBČENKO, VIKTORIA A. BABIČEVA

MASS MOVEMENTS IN AN ISOLATED AREA
OF PERMAFROST IN THE ERA OF CLIMATE CHANGE
(OLKHON, EAST SIBERIA)

Olkhon Island, the largest on Lake Baikal, is one of the most geodynamically active areas of Eastern Siberia. Our research aimed to recognise Olkhon's geomorphology as regards the presence of landslides, and to determine whether they are cryogenic, whether they respond to climate change, and whether climate change may contribute to their development. The analyses extended to the morphometric parameters and geological structure of these forms, as well as the factors influencing their development, without account taken of climate change in the area and a rise in the water level in the lake brought about by damming.

The dominant forms of mass movements on high, rocky shores of the island are rock falls. Locally, rock and debris flows are also observed along this part of the lake shore. On the gentle north-western shore of the island, rotational slides occur on the turf-covered slopes of gradients 9-20°. The landslides associated with climatic conditions, i.e. the presence of permafrost and the functioning of its active layer, are particularly interesting from the point of view of modern geodynamic processes. Such landslides occur most often in the middle of the western coast of the island near the town of Kharantsy on the Bay of Kharaldal and Bayan-Shungen, creating the Kharantsy Landslide Complex (KLC). The slope on which the landslides of the KLC develop is built of Neogene-Quaternary clay, which is a tectonically-elevated lacustrine Baikal level.

The clays in question are characterised by very good sorting, the major fractions being clay (46 %) and very fine silt (48 %). Relevant mechanical parameters are plastic limit ($P_L=35$ %), liquid limit ($L_L=94$ %), and plasticity index ($P_I=59$ %).

High Skempton activity ($A=1.26$) makes the soils highly sensitive to the presence of water. They are characterised by gravimetric water content up to 90 %.

In terms of morphology and origin, the landslides are similar to those described by M.O. Leibman (1995) as shearing slides (active-layer detachment failures according to the ACGR classification (*Glossary...*, 1988)), or the active-layer glides and slumps as described by A.G. Lewkowicz (1988). A second reason for the mass movements on Olkhon Island is solifluction, which is particularly pronounced in the upper sections of the coastal slopes situated on the northern shore of the island.

The development of the KLC landslides is mainly determined by the functioning of the permafrost active layer. Drilling carried out in the central parts of the landslide confirmed the presence of residues of seasonally frozen ground at a depth of 2.0 to 3.5 m. Their temperature was -0.2°C .

It can be assumed that with a further warming trend in the Baikal region (Voropay *et al.*, 2011), the ground temperature will increase and the active layer in which heat accumulates will expand down into the ground. These changes may cause degradation of permafrost, a process which is observed in regions around Lake Baikal, as well as in Mongolia and China (Gavrilova, 2007).

The observed climate change on Olkhon Island since the mid 1960s, e.g., a rise in air temperature (Berkin *et al.*, 2009) and snow-cover thickness (Anisimov *et al.*, 2007; Sherstyukov, 2008), is resulting in a slow increase in soil temperature (Trofimova, 2006). On Olkhon Island in 1964-2000 this was of 2.9 °C, and like air temperature, it is tending to increase, on average by 0.45 °C every 10 years. In the 1990s, the increase was much more marked, reaching 0.6 °C. This compared with an increase in mean annual air temperature for the period of 0.36 °C. Soil temperature in the lower part of the soil profile (at a depth of 3.2 m) remained stable for a very long period. However, a remarkable, continuous increase in this has also been observable since 1989 (Trofimova, 2006).

This allows us to assume that climate change leading to the deepening of the active layer will increase the activity of landslides and solifluction processes. A further important factor in the development of landslides on Olkhon Island was the aforementioned rise in the level of water in Lake Baikal by 1.2 m.

The increase in air temperature observed in the area of Olkhon since the 1960s causes an increase in ground temperature, and hence an increase in the thickness of the active layer of the ground, and in permafrost degradation. With a continuation of this trend towards climate change, a further intensive development of landslides in the area of Olkhon Island is to be anticipated, due to permafrost-thaw leading to a thickening of the active ground layer.

