

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-486-500>
УДК 551.343+551.435.627



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL PAPER

Классификация криогенно-оползневых форм рельефа для целей картографирования и прогноза

М.О. Лейбман^{1,2✉}, А.И. Кизяков³, Н.Б. Нестерова^{2,4,5}, И.И. Тарасевич^{1,2,3}

¹ Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН, Тюмень, Россия

² Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

³ Московский государственный университет им.М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴ Институт полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера,
отделение в Потсдаме, Германия

⁵ Университет Потсдама, Германия

✉ molejbman@utmn.ru

ИД МОЛ, 0000-0003-4634-6413; АИК, 0000-0003-4912-1850; НБН, 0000-0001-7055-9852;
ИИТ, 0000-0002-7581-731X

Аннотация. Разработана классификация криогенно-оползневых форм рельефа, сформированных криогенными оползнями течения (КОТФР), для картографирования их распространения и динамики. В основе лежит значительный объем полевых исследований и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли. Классификация включает генетические, морфологические и криолитологические особенности пород, определяющие морфологию и динамику КОТФР, их положение в рельефе, степень их активности, сочетание и комплексирование единичных КОТФР. Предложенная классификация и индикационные признаки используются для картографирования КОТФР на севере Западной Сибири.

Ключевые слова: классификация, криогенное оползнение, оползень течения, подземный лед, термотерраса, термоцирк, формы рельефа

Для цитирования: Лейбман М.О., Кизяков А.И., Нестерова Н.Б., Тарасевич И.И. Классификация криогенно-оползневых форм рельефа для целей картографирования и прогноза. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2023; 69(4): 486–500. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-486-500>

Поступила 23.10.2023

После переработки 17.11.2023

Принята 17.11.2023

Classification of cryogenic-landslide landforms for mapping and prediction

Marina O. Leibman^{1,2✉}, Alexander I. Kizyakov³, Nina B. Nesterova^{2,4,5},
Ilya I. Tarasevich^{1,2,3}

¹ *Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia*

² *University of Tyumen, Tyumen, Russia*

³ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

⁴ *Alfred Wegener Institute on polar and marine research, Potsdam Unit, Germany*

⁵ *University of Potsdam, Germany*

✉ moleibman@utmn.ru

ID ЛМО, 0000-0003-4634-6413; КАИ, 0000-0003-4912-1850; ННБ, 0000-0001-7055-9852;
ТИИ, 0000-0002-7581-731X

Abstract. A classification of cryogenic-landslide landforms is developed for mapping their distribution and dynamics. It is based on the previously suggested classification subdividing cryogenic landsliding into two main types: cryogenic translational landslides (or active-layer detachment slides), and cryogenic earth flows (or retrogressive thaw slumps). The increased proportion of retrogressive thaw slumps compared to active layer detachments in the North of West Siberia in the last decade creates the need for an expanded classification of cryogenic earth flows. One of the important issues is separating the process of landsliding and resulting landforms, which in English are covered by one term ‘retrogressive thaw slump’. In dealing with the landforms, we distinguish (1) open and (2) closed ones. Open cryogenic-landslide landforms are those formed by the retreating of the coast bluff due to the thaw of ice or ice-rich deposits with an additional impact from wave or stream action. Closed cryogenic-landslide landforms are those initiated on a slope landward, and thawed material is delivered to the coast or stream through an erosional channel. Morphologically we distinguish thermocirques and thermoterraces depending on the shape of the retreating headwall, crescent or linear, respectively. An important issue is the type of ground ice subjected to thaw: tabular, ice-wedge or constitutional ground ice are distinguished. Landforms can be active, stabilized or ancient. One can find both single landforms and their combination. The classification is based on a significant amount of field studies and interpretation of remote sensing data. Mapping of the cryogenic-landslide landforms is suggested using the proposed classification and indication features. The classification is based on the experience obtained mainly in the north of West Siberia. Applying it to other regions may require additional studies.

Keywords: classification, cryogenic landsliding, ground ice, landform, retrogressive-thaw slump, thermocirque, thermoterrace

For citation: Leibman M.O., Kizyakov A.I., Nesterova N.B., Tarasevich I.I. Classification of cryogenic-landslide landforms for mapping and prediction. *Arctic and Antarctic Research*. 2023; 69 (4):486–500. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2023-69-4-486-500>

Received 23.10.2023

Revised 17.11.2023

Accepted 17.11.2023

Введение

Известна и широко обсуждается активизация криогенных процессов, связанных с вытаиванием разных типов подземных льдов на фоне тренда повышения температуры воздуха. К таким процессам, в частности, относится криогенное оползание. Ранее, на основе изучения склоновых и береговых процессов западной части Российской Арктики, мы предложили классификацию криогенного оползания, связанного с вы-

таиванием подземного льда, основанную на причинах, триггерах и механизмах его активизации [1, 2]. На верхнем уровне классификации выделены криогенные оползни скольжения (КОС), связанные с вытаиванием льда в основании сезонно-талого слоя, и криогенные оползни течения (КОТ), связанные с вытаиванием залежеобразующих подземных льдов из толщи многолетнемерзлых пород. КОТ преобладали на морских побережьях и формировали специфические формы рельефа — термоцирки и термотеррасы [3], в то время как КОС преобладали вдали от побережий [2]. КОТ в глубине суши формировались локально только на берегах рек и крупных озер при дополнительном участии речной эрозии и озерной абразии, в то время как КОС были распространены повсеместно. Мы предположили, что со временем возможна смена типа процесса с КОС на КОТ в ложах оползневых цирков, а также и на стабильных склонах. Причиной этого может быть увеличение глубины протаивания или снос материала, связанный с активизацией деструктивных процессов на склонах (эрозия, нивация, солифлюкция, десерпция). В результате зона протаивания достигает кровли подземного залежеобразующего льда.

Последнее десятилетие с повторяющимися экстремально теплыми годами характеризуется резким увеличением числа КОТ [4–8]. В результате преобладающий генетический тип криогенного оползания изменился, в активной фазе после 2012 г. преобладают КОТ, соответствующие формы рельефа назовем КОТФР. Основным фактором пространственного распространения этого процесса является глубина залегания залежеобразующих подземных льдов [9]. Помимо анализа причин и триггеров процесса криогенного оползания потребовалось обновить также представления о результирующих формах рельефа, образованных КОС (КОСФР) и/или КОТФР, поскольку появилось множество новых публикаций с их описанием. Динамика публикационной активности по теме изучения КОТФР за последние 25 лет выглядит так: за период 1998–2011 гг. публиковалось примерно по 3 статьи в год, за период 2012–2019 — в среднем по 10 статей в год, а за период 2020–2022 гг. — уже по 23 статьи в год. Наибольшая часть публикаций посвящена вопросам применения данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) для картографирования КОТФР.

Анализ публикаций показал, что существует значительная терминологическая неопределенность как в русскоязычных статьях, так и в англоязычных. Разные научные группы пользуются разными терминами для обозначения одних и тех же объектов. КОТФР, как и процесс их формирования, в зарубежных работах именуется, как правило, *retrogressive thaw slumps* (RTS).

В последние годы в зарубежной литературе предпринимаются ограниченные попытки описания свойств выделяемых объектов и назначения им терминов (например, [10]). В большей части работ, посвященных картографированию RTS, основное внимание уделяется техническим вопросам их оконтуривания на космических снимках. Отмечается неточность в автоматическом выделении RTS, и предлагаются методы оценки и преодоления погрешностей [11–13].

Основным дешифровочным признаком RTS является смещение в пространстве отступающей стенки, устанавливаемое путем сопоставления разновременных ДДЗЗ. С уверенностью на снимке опознается только активная бровка, которая индицируется по значительной разнице спектральных характеристик по сравнению со стабильной поверхностью [11]. Поэтому автоматизированный метод картографирования активных RTS основывается на спектральных характеристиках космических снимков,

например Landsat [14]. Так как активная зона RTS представляет собой оголенную поверхность талых пород, лишенную растительного покрова, она легко определяется по спектральным характеристикам на синтезированном изображении в ложных цветах [14]. При дешифрировании учитывают видимые элементы изображения, такие как цвет, форма, оттенок, текстура, общая обстановка, а также морфометрия объектов выделения: стенка отрыва, боковые стенки, ложе и т. п. [14]. Применяют методы глубокого обучения [13], а также комплекс методов автоматизированного и ручного выделения RTS, подкрепленного полевыми данными [15, 16]. Установлено, что достаточная точность идентификации RTS достигается только в районах, для которых на основе полевых данных создается обучающая база [15]. Модель глубокого обучения оказалась менее достоверной для новых районов, к которым она применялась без локального обучения. Помимо идентификации RTS стоят и другие задачи, например определение площади и динамики конкретных объектов. В этом случае в [15] признают, что предпочтительно ручное оконтуривание. Существуют технические приемы идентификации нарушений поверхности КОТ. К ним относятся голубоватый оттенок на специально обработанных приемом tasseled cap снимках, характеризующих переход от заросших к влажным поверхностям, видимое углубление на цифровой модели рельефа, видимое оползневое нарушение на снимке сверхвысокого пространственного разрешения [16]. Несмотря на активные исследования, вопрос идентификации КОТФР, находящихся в стабилизированном состоянии, остается нерешенным.

Проблема отсутствия как общепризнанной классификации картографируемого явления, так и общепризнанной методики ручного выделения RTS вскрыта в эксперименте, проведенном в [17]. Объекты оконтуривались на фрагментах снимков для участка в Канаде и участка в России разными экспертами. Достаточно хорошие результаты получены при выделении активных RTS по пластовым льдам, имеющих специфическую серповидную форму, на канадском участке. Большие отличия выявлены при оконтуривании потока из КОТФР и при выделении заросших (стабилизировавшихся) частей КОТФР разными исследователями. Значительные расхождения в контурах получены для участка с КОТФР по полигонально-жильным льдам, преимущественно прямолинейной формы, на российском участке. Некоторые исследователи выделили формы иного происхождения, чем КОТФР, и не выделили некоторые установленные в поле КОТФР. Вывод авторов — необходима стандартизация процедур по оконтуриванию КОТФР, чтобы успешно расширить процедуры их автоматизированного картографирования на всю Арктику.

Основным заключением на основе имеющихся публикаций является то, что наиболее достоверно можно идентифицировать КОТФР в активной стадии, когда опознается крутая стенка отрыва и оголенная влажная поверхность скольжения. Очень много затруднений возникает с определением контуров стабилизировавшейся (сухой) или покрытой растительностью КОТФР. Это ограничивает возможности прогноза оценки активизации КОТ на более-менее длительный период времени. Часто также упускаются формы с линейной (невогнутой) стенкой отрыва, достаточно часто встречающейся, хотя и реже, чем с серповидной. Однако для решения задач определения площади КОТФР, а затем и пораженности (по соотношению численности или площади КОТФР и ненарушенной поверхности), а также динамики этих показателей во времени необходимо выделять и древние, и стабилизировавшиеся, и активные формы, а также их соотношение на каждый временной срез.

Идентификация КОТФР на местности в процессе полевой съемки не вызывает трудностей. Однако применение методов идентификации и картографирования КОТФР с использованием ДДЗЗ, включающих материалы спутниковой съемки и аэрофотосъемки, требует разработки признаков, по которым следует идентифицировать КОТФР и элементы этой формы не только в автоматизированном, но даже и в ручном режиме.

Картографирование КОТФР предпринималось неоднократно, в том числе последние 12 лет, после значительной активизации криогенного оползания по подземным льдам [16, 18–21]. Мы проанализировали более 3000 КОТФР на севере Западной Сибири, часть которых подверглась статистической обработке [7, 22], некоторые обследованы также и при полевой съемке [5]. На основе новых полевых и дистанционных материалов, на фоне наблюдающихся природных изменений, а также вследствие отсутствия установившейся терминологии, мы предлагаем новую подробную классификацию КОТФР. Она призвана способствовать унификации подходов к картографированию этих опасных явлений, возможности сопоставления данных, полученных разными исследователями, и их сведения в единую базу.

Методы и подходы

Опыт показывает, что картографирование следует проводить в несколько этапов. На начальном этапе сопоставлялись спутниковые изображения КОТФР на снимках высокого пространственного разрешения с БПЛА-изображениями, наземными фотографиями и полевыми описаниями на ключевых участках. Также оценивались те свойства изображений, которые не выражаются на ДДЗЗ меньшего разрешения. Выявлялись индикаторы разных стадий развития процесса, в том числе на основе обобщения опыта предыдущих исследований. Облик КОТФР, фиксируемый на снимках, в значительной степени зависит от времени последней активизации, степени затухания, выколаживания, заполнения осадками или, наоборот, углубления ложа под действием термокарста и его разрушения термоэрозией. Важнейшим индикатором стадии развития КОТФР является степень восстановления растительности после нарушения. Таким образом, через отличные от исходных растительные ассоциации (преобладание травянистой растительности над мохово-кустарниковой, разреженный маломощный мохово-лишайниковый покров и пр.) при картографировании удастся оценить и общее число КОТФР независимо от стадии развития, и число КОТФР разного возраста/активности. Поскольку в природе могут существовать не только отдельные единичные КОТФР, но и их слившиеся или объединившиеся в кластеры формы, а также КОТФР разного возраста активизации в пределах единого контура, то и эти признаки рассмотрены в рамках классификации.

Предлагаемая детальная классификация ограничивается формами рельефа, образованными КОТ и обозначенными нами как КОТФР. Их отдельное от криогенных оползней скольжения (КОС) рассмотрение связано с тем, что КОС и сформированные ими формы рельефа (КОСФР) развиваются крайне медленно, в течение столетий [1]. В случае если они вскрывают подземные льды, их следует уже рассматривать как триггеры КОТ, которые динамично развиваются и множатся, увеличивая размеры образующихся в течение нескольких последовательных лет или десятков лет КОТФР.

Описание криогенно-оползневых форм рельефа

Генетические типы КОТФР по залежеобразующим льдам. Открытые и закрытые формы отличаются по условиям вскрытия льда/льдистых пород (рис. 1): закрытые КОТФР образуются в условиях вскрытия подземных льдов или льдистых пород в глубине суши, оттаивающий материал стекает в виде потоков по эрозионным ложбинам к базису эрозии (берегу моря, озера, реки или перегибу склона) (см. рис. 1а). Такие формы чаще имеют серповидную бровку, реже — линейную. Открытые КОТФР образуются в условиях начального вскрытия подземных льдов непосредственно в береговых уступах (моря, озера, реки), оттаивающий материал стекает в виде потоков непосредственно к базису эрозии (см. рис. 1б). Чаще имеют линейную бровку, редко — серповидную.

Каждая из этих КОТФР может быть образована единичным оползнем течения, который еще не развился в полноценную форму или стабилизируется, не получив дальнейшего развития. Такие КОТФР называем эмбриональными.

Каждая КОТФР развивается во времени, проходя через стадии зарождения, расширения, зрелости, затухания, стабилизации, консервации и новой активизации. Это продолжается до тех пор, пока не выработается полностью ледяная залежь или исходная положительная форма рельефа, например [1, с. 85–86].

Строение и элементы КОТФР. Описываемые КОТФР, главным образом расположенные на берегах, могут иметь две отступающие стенки и соответствующие им бровки: задняя (тыловая) стенка отрыва и верхняя бровка расположены выше по склону на удалении от базиса эрозии; нижний уступ (уступ к пляжу/руслу) обращен непосредственно к базису эрозии, и ему соответствует нижняя бровка (см. рис. 1а). Нижний уступ может отсутствовать, например, если лед залегаet ниже базиса эрозии и ложе КОТФР снижается в результате термоэрозии или термокарста. Это в наибольшей степени характерно для условий морского побережья (см. рис. 1б). По форме бровки выделяют

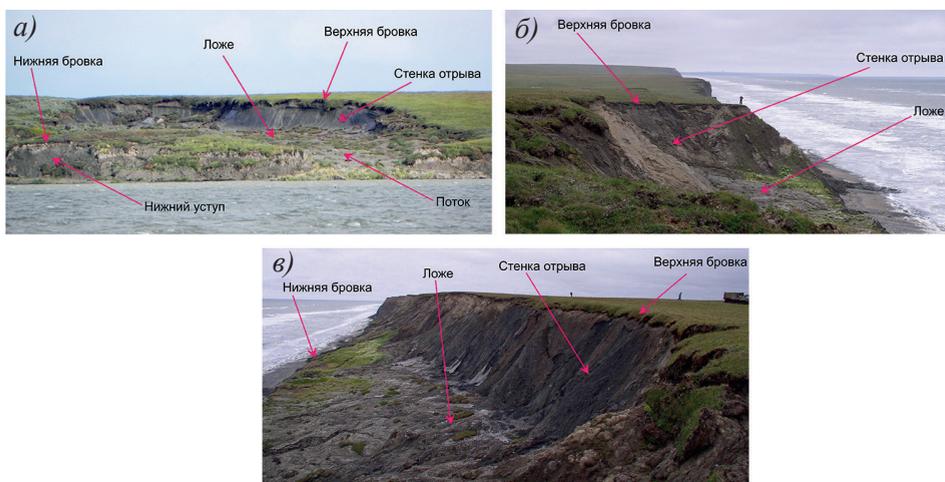


Рис. 1. Элементы строения закрытых термоцирков на полуострове Ямал (фото М.О. Лейбман)(а), открытых термоцирков (б) и термотеррас (в) на Югорском полуострове (фото А.И. Кизьякова)
Fig. 1. Structural elements of the closed thermocirques, Yamal peninsula (photo by M. Leibman) (а), open thermocirques (б), and thermoterraces (в), Yugorsky peninsula (photo by A. Kizyakov)

термоцирки (ТЦ) и термотеррасы (ТТ). Бровка ТЦ характеризуется подковообразной формой. У закрытых КОТФР такая форма преобладает (см. рис. 1а), но может встречаться и у открытых КОТФР (см. рис. 1б). Бровка ТТ — линейная (см. рис. 1в). У открытых КОТФР встречаются и подковообразная и линейная формы бровки, но линейная чаще.

Большим разнообразием отличается нижняя граница КОТФР. Это связано со значительной динамичностью этой формы не только в течение нескольких лет, но и нескольких дней, особенно на морских побережьях. Когда поток из КОТФР спускается в воду моря, озера, реки, мы предлагаем принять за нижнюю границу КОТФР урез воды. В случае «висячей» формы нижняя граница КОТФР определяется границей потока, представленного либо влажной, либо уже сухой породой, наложенного на ненарушенную поверхность склона, в случае активной формы. Нижняя граница определяется по видимой деформации поверхности, отличающейся также по характеру растительности в случае стабильной формы.

Тип залежеобразующего или текстурообразующего льда (криолитологический разрез) определяет размер, строение, скорость развития и затухания КОТФР, объем выносимого материала. В классификации мы выделяем КОТФР по залежеобразующему льду (пластовому или полигонально-жильному) и по текстурообразующему льду (рис. 2).

Характеристика типа льда может быть достоверно (в поле, при бурении) или предположительно описана количественно — это мощность или видимая мощность льда или сильнольдистого горизонта, глубина от поверхности, макрольдистость

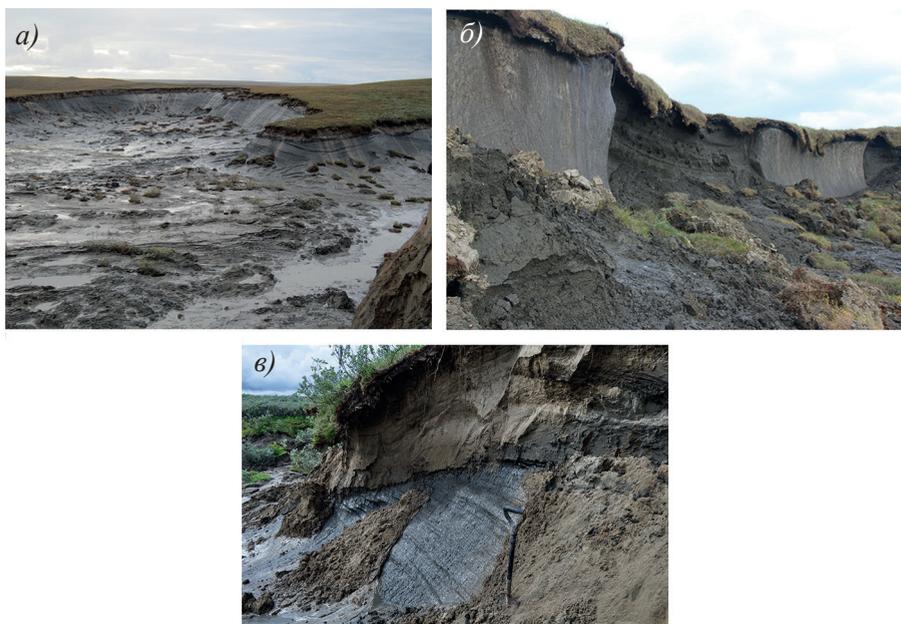


Рис. 2. Типы подземного льда в стенках КОТФР: а) пластовые на полуострове Ямал (фото Ю.А. Дворникова); б) полигонально-жильные на Быковском полуострове (фото А.И. Кизякова); в) текстурообразующие на полуострове Ямал (фото М.О. Лейбман)

Fig. 2. Types of ground ice in the headwall of RTS: а) tabular ice, Yamal peninsula (photo by Yu. Dvornikov); б) polygonal ice wedges, Bykovsky peninsula (photo by A. Kizyakov); в) constitutional, Yamal peninsula (photo by M. Leibman)

и объемная льдистость во вскрытой толще (соотношение льда и вмещающей породы в видимом разрезе).

Положение в рельефе (особенности базиса эрозии) определяет различие КОТФР, спускающихся к берегу моря, к берегу озера, к берегу реки, к временному водотоку (талъвегу оврага), а также не выходящих за пределы склона (так называемые «висячие» КОТФР) (рис. 3).

КОТФР на морском побережье поставляют материал в море, либо непосредственно (открытые КОТФР), либо через выводящие овраги (закрытые КОТФР) (см. рис. 3а и б).

КОТФР, расположенные на склонах долин, на берегах постоянных и временных водотоков, отличаются тем, что первичное поступление материала осуществляется в эрозионную и речную сеть и только опосредованно попадает в море (см. рис. 3в). В таких условиях открытые КОТФР практически не встречаются.

У КОТФР, расположенных на берегах озер, первичное поступление материала направлено в озеро и материал оседает в нем. Возможно, в случае если озеро прочное, часть материала может попасть в дренажную сеть (см. рис. 3г).

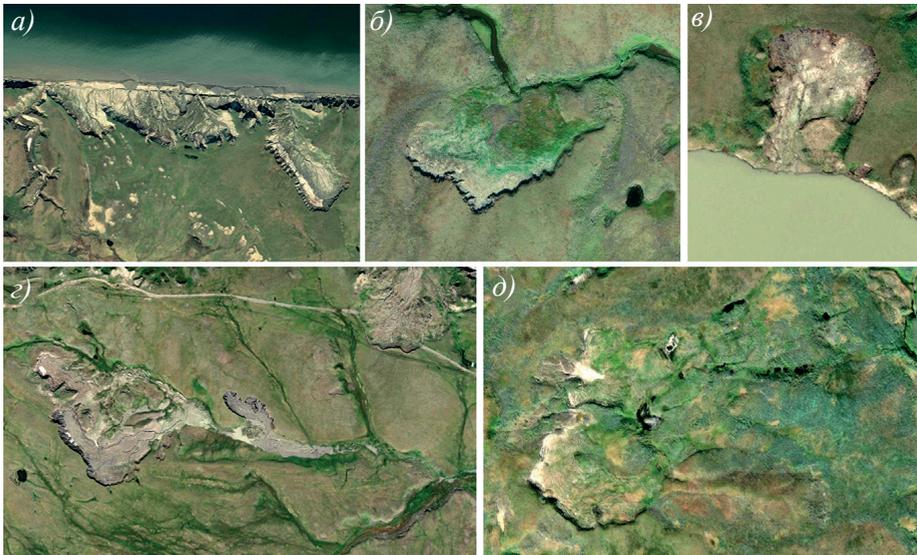


Рис. 3. Примеры положения КОТФР в рельефе (вынос материала к базису эрозии): а) непосредственно на морском побережье с выносом в море, побережье Карского моря, Югорский п-ов; б) на берегах постоянных и временных водотоков с выносом в русло, окрестности оз. Нейто, Центральный Ямал; в) на берегах озер с выносом в озеро, Восточный Гыдан; г) в глубине суши с выносом материала через выводящие овраги, район р. Первая Песчаная, Югорский п-ов; д) на склонах междуречий («висячие» потоки), междуречье рек Харасавэйяха и Ябтояха, Центральный Ямал

Fig. 3. Examples of RTS position in the relief (relative to the base level of erosion: а) directly on the sea coast, delivery into the sea, Kara sea coast, Yugorsky peninsula; б) on the stream banks and ravine slopes, delivery into the channel, Neito lake area, central Yamal peninsula; в) on the lake shores, delivery into the lake, eastern Gydan peninsula; г) inland, delivery through the erosion channel, Pervaya Peschanaya river area, Yugorsky peninsula; д) debris tongue hanging on the slope, Kharasavey-Yakha and Yabto-Yakha watershed, central Yamal peninsula

«Висячие» КОТФР, расположенные на склонах междуречий, не достигают гидросети, выносимый материал перехватывается эрозионными потоками, образовавшимися в ложе КОТФР (см. рис. 3д) и разгружающимися непосредственно на склоне.

Положение в рельефе может быть описано количественно через расстояние до базиса эрозии, высоту бровки ложа и/или фронтального уступа над базисом эрозии и длину потока активной КОТФР от границы ложа до базиса эрозии.

Степень активности. Мы выделяем четыре степени активности КОТФР: активная, частично активная, стабильная и древняя (рис. 4). Активная КОТФР выделяется в том случае, когда вся бровка оконтуривает обнажение льда или сильноолистых пород, отступающая стенка отрыва не перекрыта оползающими и обрушающимися породами. В этом случае ложе КОТФР, как правило, перекрыто потоками оттаявшего материала. Частично активная КОТФР выделяется, когда в контуре видимой выделенной бровки только часть стенки несет следы свежих обнажений льда. В этом случае ложе КОТФР может быть частично перекрыто потоками и частично сухой, а возможно, и частично заросшей поверхностью. Стабильная КОТФР характеризуется отсутствием обнажения под бровкой, сухой и/или частично заросшей поверхностью ложа. Древняя КОТФР полностью задернованная, однако отличается от окружающего ландшафта составом растительности, наличием сглаженной бровки и расположением на вогнутом склоне. Следует учитывать, что степень активности — это динамичный показатель и его определение относится к каждому отдельному временному срезу. По нашим наблюдениям, КОТФР может перейти от активного состояния к частично актив-

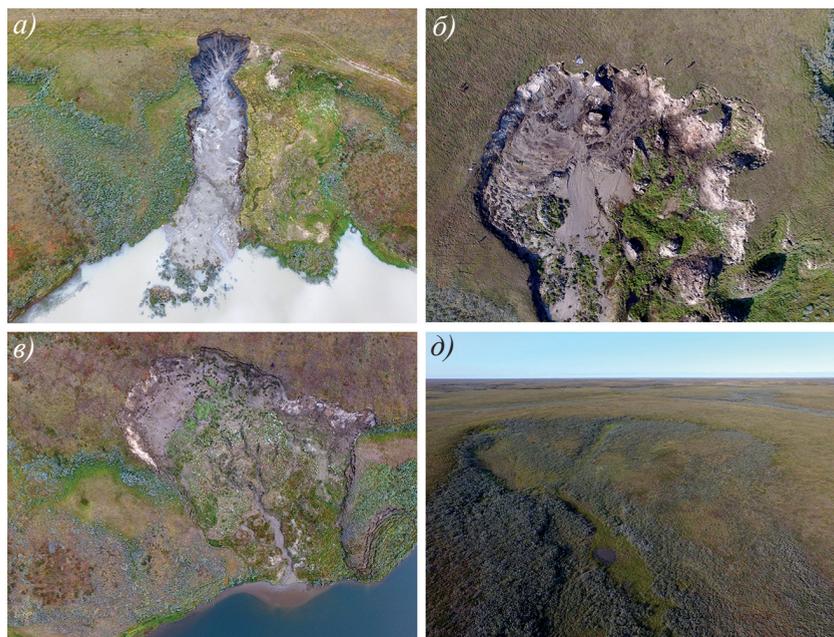


Рис. 4. Примеры КОТФР по степени активности на полуострове Ямал: а) активная; б) частично активная; в) стабильная; г) древняя (фото с БПЛА А.В. Хомутова)

Fig. 4. Examples of RTS by degree of activity on Yamal peninsula: а) active; б) partially active; в) stable; г) ancient (photo from UAV by A. Khomutov)

ному и потом к стабильному за несколько лет, а полностью зарасти за несколько десятков лет.

Степень активности может быть описана количественно через протяженность активной бровки, процентное соотношение активной и стабильной бровок, высоту и протяженность отступающей стенки КОТФР, соотношение протяженности и высоты и отступающей и стабильной стенок КОТФР, как правило, по полевым данным. Важнейшие показатели — площадь незадернованного ложа, соотношение площади влажного и сухого, оголенного и заросшего участков ложа (по результатам как полевой, так и дистанционной съемки).

Сложные КОТФР. Помимо отдельных (единичных) КОТФР встречаются группы КОТФР, которые в зависимости от типа и расположения в пространстве мы разделяем на кластеры, комплексы и сочетания (рис. 5). Наблюдаются такие варианты: несколько КОТФР разного генезиса, очертания, размера и активности, разделенные узкой стабильной перемычкой или касающиеся бортами, — это кластер (см. рис. 5а); в контуре крупной древней формы расположены одна или несколько новых активных форм — это комплекс (см. рис. 5б); термоцирк и термотерраса в пределах одной бровки — сочетание (см. рис. 5в).

Количественно такие формы могут описываться через число элементов в кластере и комплексе, соотношение КОТФР разной степени активности, разного размера (площади), число и соотношение элементов разного генезиса и активности в сочетании.



Рис. 5. Примеры ассоциаций КОТФР на севере Западной Сибири: а) кластер (Центральный Гыдан); б) комплекс (Западный Ямал); в) сочетание (окрестности м/с Марресале, Западный Ямал)
Fig. 5. Examples of RTS associations in the West-Siberian North: а) a cluster (central Gydan peninsula); б) a complex (western Yamal peninsula); в) combination (Marresale weather station area, western Yamal peninsula)

Классификация КОТФР

Выделенные классификационные основания могут быть сведены в систему (табл.).

Таблица

Классификационная схема КОТФР

Table

RTS classification scheme

Генетический тип КОТФР	Условия формирования	Морфология
Закрытая	Заложена в глубине суши. Оползневая масса перемещается к базису эрозии через выводной канал	Бровка чаще выгнута в глубь суши, редко — линейная. Образована несколькими разнонаправленными оползнями течения
Эмбриональная закрытая		Образована единичным оползнем течения
Открытая	Заложена в береговом уступе. Оползневая масса перемещается к базису эрозии напрямую	Бровка чаще линейная, иногда выгнута в глубь суши. Образована несколькими оползнями течения, направленными перпендикулярно к базису эрозии, иногда — разнонаправленными
Эмбриональная открытая		Образована единичным оползнем течения
Тип льда	Степень активности	Ассоциации
Пластовый	Активная	Кластер
Полигонально-жильный	Частично активная	Комплекс
Текстурообразующий	Стабильная	Сочетание
Смешанного типа	Древняя	Отдельная форма

Дискуссия. Опыт применения классификации для картографирования

Для использования предложенной классификации при картографировании КОТФР составлена индикационная таблица, распределенная на рис. 1–5.

Алгоритм картографирования КОТФР как на местности, так и на основе интерпретации ДДЗЗ включает выявление вогнутого склона и элементов КОТФР: выраженной в рельефе бровки; стенки отрыва; ложа и грязевого потока, выходящего за пределы ложа на ненарушенную поверхность или в водный объект. На космических снимках среднего и низкого пространственного разрешения удастся выделить только суммарную зону нарушения без разделения на элементы [6, 7]. При низком разрешении снимков и скоплении КОТФР их удастся выделить только в одном контуре, ограниченном общей бровкой.

В литературе, как правило, объем таких понятий, как бровка, отступающая стенка, ложе, поток талого материала, фронтальный уступ, авторы не уточняют и основания их выделения не приводят, предполагая их очевидными при ручной рисовке и задавая условия только для автоматизированного выделения. Так, в работе [6] площади КОТФР определялись по числу пикселей спутникового снимка Landsat, соответствующих по спектральным характеристикам активным зонам ТЦ с отступающей стенкой отрыва. Эти площади сопоставлялись с результатами оцифровки более детальных космических снимков и принятых авторами как достоверные.

Более подробно методика оконтуривания КОТФР на побережье моря Бофорта описана в [23]: активные КОТФР характеризуются крутыми стенками отрыва, в которых обнажаются сильнольдистые породы, ложем с тальми отложениями и врезанными оврагами. Стабильные КОТФР отличают пологие покрытые растительностью стенки отрыва, ложе также покрыто растительностью, и отсутствуют видимые активные системы оврагов.

С этим утверждением можно поспорить, так как, сформировавшись благодаря талой воде из активной стенки, овраги часто продолжают развиваться за счет воды из сезонно-талого слоя, летних атмосферных осадков, а также вод снежников, долго сохраняющихся в основании стенки отрыва, например, как на снимке (см. рис. 3в). В то же время в активной фазе овражная сеть может и не сформироваться, например, как на фото (см. рис. 1а), если преобладает плоскостной сток или если недостаточный объем льда приводит к формированию вязкопластических потоков, ограничивающих термоэрозию.

Авторы работы [10] отметили необходимость принять решение об оконтуривании бровки, которая осложнена системой параллельных уступу трещин, до их обрушения/сползания. Авторы проводили границу бровки по наиболее удаленной от обрыва трещине и сделали вывод о преимуществе применения ручного оконтуривания на детальных аэрофотоснимках для таких случаев.

На наших площадках мы все же сочли правильным оконтуривание стенки отрыва по краю массива без учета блоков, отчлененных трещинами [1].

В [24] рассматривают динамику RTS на морских берегах с содержанием в разрезе пластовых, полигонально-жильных и текстурообразующих льдов. К признакам RTS по подземным льдам отнесли С-образную форму, крутую стенку отрыва и плоское или бугристое ложе, оголенное или слабо заросшее растительностью, при полном отсутствии полигональных форм, характерных для окружающей тундры. В более крупных RTS в поверхность скольжения врезаны эрозионные ложбины. В зависимости от даты съемки уступы могут подчеркиваться летующими снежниками. Перечисленные показатели отличают КОТ (Retrogressive thaw slumps) от КОС (Active layer detachment slides). По данным авторов статьи, вторые имеют меньшие размеры, наблюдаются на более крутых склонах параллельно склону, отсутствует четкая стенка отрыва и в основании наблюдается сползшая дернина.

По нашим наблюдениям на Ямале, КОС имеют размеры как больше, так и меньше КОТ, характеризуются на протяжении многих лет после образования четкой стенкой отрыва, хотя и зарастающей, и формируются на значительно более пологих склонах, причем чем более пологий склон, тем крупнее КОС [1]. Основной морфологический признак для выделения этих двух типов криогенного оползания — это наличие, как указано в [24], тонкого, более или менее цельного оползневого тела, покрытого исходной растительностью, в то время как КОТ не оставляют после себя сколько-нибудь заметного оползневого тела, а в зоне транзита и разгрузки наблюдаются лишь более или менее вязкие потоки оттаявшего материала, образующие конусы выноса или полностью уходящие под воду.

Ввиду высокой динамичности КОТФР и для ее отражения необходимо классифицировать части одного объекта, имеющие разный возраст, степень зарастания и прогнозируемые тенденции дальнейшего развития. В [24] предложили классификацию картографируемых объектов по уровню активности и стадии, которую обозначил Вольф [25]. Уровень активности задан как активный, если есть обнажающаяся стенка со льдом, самая высокая в вершине бровки и снижающаяся к боковым

стенкам, и отсутствие растительности везде в пределах формы. Стабильный уровень характеризуется отсутствием обнаженной стенки и растительностью в ложе. Стадиям присваивались номера от более древней к более молодой форме.

По нашим полевым наблюдениям, часто невозможно четко отличить активную форму от стабильной в рамках этой классификации. Поэтому мы выделяем промежуточное состояние активности — частично активные КОТФР. Мы также ввели понятие «древние» КОТФР, весьма характерные для севера Западной Сибири. Они расположены на вогнутых склонах с полностью заросшими поверхностями, существенно отличающимися по растительным комплексам и составу пород верхней части разреза (супесчаных на ненарушенных склонах и глинистых на древних поверхностях скольжения) от окружающих склонов. Именно на таких поверхностях при резких температурных аномалиях возникают новые КОТФР.

Вместо предложенного в [24, 25] деления на стадии как образования новых форм в пределах старых, в нашей классификации мы предложили показывать стадийность через ассоциации КОТФР. Такой подход представляется более удобным для оценки состояния одного простого или комплексного объекта, за которым ведется наблюдение.

Заключение

Таким образом, анализ опубликованной литературы и собственные данные полевых и дистанционных исследований КОТФР позволяют заключить следующее. Все исследователи согласны с тем, что достаточно точно можно оконтурить и измерить параметры активных форм рельефа, связанных с вытаиванием подземных льдов на склонах. Наиболее точные результаты получены при наличии данных полевых измерений или дешифрирования снимков сверхвысокого пространственного разрешения, используемых для обучения при автоматизированном дешифрировании.

Различаются подходы к классифицированию, основанному на опыте полевых исследований в разных регионах с преобладанием разных форм и размеров ледяных залежей.

Мы предлагаем классификацию, наследующую, продолжающую и уточняющую ранее предложенную схему криогенного оползания, наиболее пригодную для картографирования на севере Западной Сибири. Применимость для других регионов может потребовать адаптации и возможного расширения классификации.

Конфликт интересов. Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00644.

Competing interests. Authors declare no conflict of interests.

Funding. The study was funded by the Russian Science Foundation, project number 22-27-00644.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лейбман М.О., Кизяков А.И. *Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова*. М.: Институт криосферы земли СО РАН; 2007. 206 с.
2. Leibman M., Khomutov A., Kizyakov A. Cryogenic landslides in the West-Siberian plain of Russia: classification, mechanisms, and landforms. In: W. Shan et al. (eds.). *Landslides in cold regions in the context of climate change. Environmental Science and Engineering*. Springer International Publishing, Switzerland; 2014. P. 143–162.
3. Кизяков А.И., Лейбман М.О., Передня Д.Д. Деструктивные рельефообразующие процессы побережий арктических равнин с пластовыми подземными льдами. *Криосфера Земли*. 2006; 10(2): 79–89.

- Kizyakov A.I., Leibman M.O., Perednya D.D. Destructive relief-forming processes on the Arctic Plains with tabular ground ice. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2006; 10(2): 79–89. (In Russ.)
4. Крицук Л.Н., Дубровин В.А., Ястреба Н.В. Результаты комплексного изучения динамики береговой зоны Карского моря в районе метеостанции Марре-Сале с использованием ГИС-технологий. *Кriosфера Земли*. 2014; 18(4): 59–69.
- Kritsuk L.N., Dubrovin V.A., Yastreba N.V. Some results of integrated study of the Kara coastal dynamics in the Marre-Sale meteorological station area, with the use of GIS technologies. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2014; 18(4): 59–69. (In Russ.)
5. Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., Khairullin R. Activation of cryogenic earth flows and formation of thermocirques in Central Yamal as a result of climate fluctuations. In: Mikoš K., Vilimek V., Yin Y., Sassa K. (eds). *Advancing culture of living with landslides. VLF 2017*. Cham: Springer International Publishing AG; 2017. P. 209–216. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53483-1_24
6. Lewkowicz A.G., Way R.G. Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a high Arctic environment. *Nature Communications*. 2019; 10(1): 1329. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09314-7>
7. Нестерова Н.Б., Хомутов А.В., Лейбман М.О., Сафонов Т.А., Белова Н.Г. Инвентаризация термоцирков на Севере Западной Сибири по данным мозаики спутниковых снимков 2016–2018 годов. *Кriosфера Земли*. 2021; 25(6): 41–50. <https://doi.org/10.15372/KZ20210604>
- Nesterova N.B., Khomutov A.V., Leibman M.O., Safonov T.A., Belova N.G. The inventory of retrogressive thaw slumps (thermocirques) in the north of West Siberia based on 2016–2018 satellite imagery mosaic. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2021; 25(6): 41–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/KZ20210604>
8. Маслаков А.А., Кузякин Л.П., Комова Н.Н. Динамика развития термоцирка, вмещающего залежь пластового льда, вблизи села Лаврентия (Чукотский АО) за 2018–2021 гг. *Арктика и Антарктика*. 2021; (4): 32–46. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2021.4.37225>
- Maslakov A.A., Kusyakin L.P., Komova N.N. Dynamics of thermocirque, enclosing tabular ground ice, near the settlement Lavrentiy (Chukotsky Autonomous Okrug) in 2018–2021. *Arktika i Antarktika = Arctic and Antarctic*. 2021; (4): 32–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2021.4.37225>
9. Хомутов А.В., Лейбман М.О., Андреева М.В. Методика картографирования пластовых льдов центрального Ямала. *Вестник Тюменского государственного университета. Науки о Земле*. 2012; (7): 76–84.
- Khomutov A.V., Leibman M.O., Andreeva M.V. Methods of mapping tabular ground ice of Central Yamal. *Vestnik Tjumenskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Nauki o Zemle = Tyumen State University Herald, Earth Sciences*. 2012; (7): 76–84. (In Russ.)
10. Swanson D.K., Nolan M. Growth of retrogressive thaw slumps in the Noatak Valley, Alaska, 2010–2016, measured by airborne photogrammetry. *Remote Sensing*. 2018; 10(7): 983. <https://doi.org/10.3390/rs10070983>
11. Mu C., Shang J., Zhang T., Fan C., Wang S., Peng X., Zhong W., Zhang F., Mu M., Jia L. Acceleration of thaw slump during 1997–2017 in the Qilian mountains of the Northern Qinghai-Tibetan plateau. *Landslides*. 2020; 17: 1051–1062. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01344-3>
12. Witharana C., Udawalpola M.R., Liljedahl A.K., Jones M.K.W., Jones B.M., Hasan A., Joshi D., Manos E. Automated detection of retrogressive thaw slumps in the High Arctic using high-resolution satellite imagery. *Remote Sensing*. 2022; 14(17): 4132. <https://doi.org/10.3390/rs14174132>
13. Xia Z., Huang L., Fan C., Jia S., Lin Z., Liu L., Luo J., Niu F., Zhang T. Retrogressive thaw slumps along the Qinghai-Tibet Engineering Corridor: A comprehensive inventory and their distribution characteristics. *Earth System Science Data*. 2022; 14(9): 3875–3887.

14. Runge A., Nitze I., Grosse G. Remote sensing annual dynamics of rapid permafrost thaw disturbances with LandTrendr. *Remote Sensing of Environment*. 2022;268:112752. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112752>
15. Huang L., Luo J., Lin Z., Niu F., Liu L. 2020 Using deep learning to map retrogressive thaw slumps in the Beiluhe region (Tibetan Plateau) from CubeSat images. *Remote Sensing of Environment*. 2020; 237: 111534. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111534>
16. Nitze I., Heidler K., Barth S., Grosse G. Developing and testing a deep learning approach for mapping retrogressive thaw slumps. *Remote Sensing*. 2021; 13(21):4294. <https://doi.org/10.3390/rs13214294>
17. Nitze I., van der Sluijs J., Barth S., Bernhard P., Huang L., Lara M., Nesterova N., Runge A., Ward Jones M., Witharana C., Xia Z., Kizyakov A., Veremeeva A., Liljedahl A., Dai C. An experiment to compare digitized labels of retrogressive thaw slumps by domain experts. European Conference on Permafrost. In: J.M. Fernández-Fernández, J. Bonsoms, J. García-Oteyza, M. Oliva (eds.) *EUCOP6, Book of abstracts. 18-22 June, 2023, Puigcerdà. Puigcerdà*: 2023. P. 214. <https://doi.org/10.52381/EUCOP6.abstracts.1>
18. Пижанкова Е.И. Термоденудация в береговой зоне Ляховских островов (результаты дешифрирования аэрокосмических снимков). *Криосфера Земли*. 2011; 15(3): 61–70.
Pizhankova E.I. Termodenudation in the coastal zone of the Lyakhovsky islands (interpretation of aerospace images). *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2011; 15(3): 61–70. (In Russ.)
19. Segal R.A., Lantz T.C., Kokelj S.V. Acceleration of thaw slump activity in glaciated landscapes of the Western Canadian Arctic. *Environmental Research Letters*. 2016; 11(3):034025. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034025>
20. Hu B., Wu Y., Zhang X., Yang B., Chen J., Li H., Chen X., Chen Z. Monitoring the thaw slump-derived thermokarst in the Qinghai-Tibet plateau using satellite SAR interferometry. *Journal of Sensors*. 2019; 2019: 1698432. <https://doi.org/10.1155/2019/1698432>
21. Leibman M., Kizyakov A., Zhdanova Y., Sonyushkin A., Zimin M. Coastal retreat due to thermodenudation on the Yugorsky Peninsula, Russia during the last decade, update since 2001–2010. *Remote Sensing*. 2021; 13(20):4042. <https://doi.org/10.3390/rs13204042>
22. Leibman M., Nesterova N., Altukhov M. Distribution and morphometry of thermocirques in the north of West Siberia. *Geosciences*. 2023; 13(6): 167. <https://doi.org/10.3390/geosciences13060167>
23. Ramage J.L., Irrgang A.M., Herzsich U., Morgenstern A., Couture N., Lantuit H. Terrain controls on the occurrence of coastal retrogressive thaw slumps along the Yukon Coast, Canada. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2017; 122(9): 1619–1634. <https://doi.org/10.1002/2017JF004231>
24. Lantuit H., Pollard W.H. Fifty years of coastal erosion and retrogressive thaw slump activity on Herschel Island, Southern Beaufort Sea, Yukon Territory, Canada. *Geomorphology*. 2008; 95(1–2): 84–102. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.07.040>
25. Wolfe S.A., Kotler E., Dallimore S.R. Surficial characteristics and the distribution of thaw landforms (1970 to 1999), Shingle Point to Kay Point, Yukon Territory. *Geological Survey of Canada*. Open File 4115. 2001. <https://doi.org/10.4095/212842>