



РЕГУЛЯРНЫЕ ПОЛЕВЫЕ И ДИСТАНЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ КАК ОСНОВА ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ КРИОГЕННОГО ОПОЛЗАНИЯ И КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ЕГО ОПАСНОСТИ НА ЦЕНТРАЛЬНОМ ЯМАЛЕ

✉ Хомутов А.В., Лейбман М.О.

Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия;
✉ artcryo@ya.ru

Регулярные полевые и дистанционные наблюдения за активностью криогенных оползней течения (КОТ) и термоцирков на Центральном Ямале лежат в основе оценки динамики криогенного оползания и картографирования его опасности с использованием ландшафтной индикации глубины залегания кровли пластового льда и приуроченности современных КОТ и термоцирков к определенным природно-территориальным комплексам.

Ключевые слова: *криогенные оползни, термоцирки, пластовый лед, ландшафтная карта, картографирование опасности*

Введение. С середины XX века известна и широко обсуждается активизация криогенных процессов, связанных с вытаиванием разных типов подземных льдов на фоне тренда повышения температуры воздуха [Каплина, 1965; Воскресенский, Совершаев, 1998; Кизяков, 2005; Лейбман, Кизяков, 2007; Лейбман и др., 2023]. К таким процессам, в частности, относится криогенное оползание.

За период после катастрофической активизации криогенного оползания 1989-1990 гг. на Ямале разработана теория криогенного оползания и рассмотрены механизмы и классификация криогенных оползней [Лейбман, 2005]. Они подразделены на криогенные оползни скольжения (КОС) и криогенные оползни течения (КОТ). КОС связаны с вытаиванием льда в основании сезонно-талого слоя, а КОТ связаны с вытаиванием залежеобразующих подземных льдов из толщи многолетнемерзлых пород. До относительно недавнего времени КОТ преобладали на морских побережьях и формировали специфические формы рельефа — термоцирки и термотеррасы [Кизяков и др., 2006], в то время как КОС преобладали вдали от побережий [Leibman et al., 2014]. Результаты многолетнего изучения распространения КОС в центральной части полуострова Ямал позволили сделать прогноз вероятности их активизации на базе ландшафтной карты [Хомутов, Лейбман, 2016].

С 2012 г. на фоне резкой климатогенной активизации КОТ [Бабкина и др., 2019], приведшей к значительному увеличению числа термоцирков на полуостровах Ямал и Гыданский [Нестерова и др., 2021], актуальным стало картографирование опасности криогенного оползания, приводящего к формированию термоцирков и значительному вытаиванию залежей подземных льдов и сильнольдистых многолетнемерзлых пород. В особенности это актуально на территориях, активно вовлеченных в хозяйственную деятельность при нефтегазовом освоении. Одной из таких территорий является центральная часть полуострова Ямал, где помимо одного из крупнейших разрабатываемых нефтегазоконденсатных месторождений — Бованенковского, существуют другие разведанные месторождения углеводородов, развивается транспортная инфраструктура. При этом, концентрация форм рельефа, связанных с криогенными оползнями течения (КОТФР [Лейбман и др., 2023]), достигает здесь местами более 120 единиц в каждой гексагональной ячейке 30 на 30 км, специально размеченной для анализа распространения таких форм рельефа [Nesterova et al., 2025].

Район исследования. В центральной части полуострова Ямал наиболее интересной с точки зрения формирования КОТФР является территория научно-исследовательского стационара «Васькины Дачи» [Лейбман, Хомутов, 2019] на междуречье рек Се-Яха и

Морды-Яха, представляющая собой холмисто-увалистую равнину с узкими водоразделами и длинными пологими склонами, расчлененную узкими долинами малых рек и водотоков, овражно-балочной сетью, озерами и хасыреями. Глубина расчленения казанцевской и салехардской равнин достигает 40–50 м. Около 60 % территории занято пологими склонами крутизной до 7°, склоны крутизной от 7 до 50° занимают около 10 % площади, а оставшиеся 30 % приходятся на вершинные части увалов, поймы рек и озера. На водораздельных поверхностях активно морозобойное растрескивание пород с образованием повторно-жильных льдов на торфяниках, распространенных в седловинах, и песчаных и песчано-ледяных жил на вершинах. В криолитологическом строении принимают участие песчаные породы со значительным содержанием пылеватых частиц. Склоновые отложения характеризуются песчаным составом вблизи бровки. Вниз по склону они сменяются супесчаными и суглинистыми, а подстилаются глинистыми породами. Важнейшим компонентом криогенного строения являются пластовые льды, которые распространены практически повсеместно и на изучаемой территории вскрывались на глубинах от 4 до 25 м скважинами при проведении изысканий для строительства ж/д линии Обская–Бованенково. Активное развитие склоновых процессов характерно для останцов морских террас, сложенных высокольдистыми породами с залежами пластовых льдов [Лейбман, Кизяков, 2007]. Глубина сезонного протаивания в среднем не превышает 1,5 м на слабозадернованных поверхностях вершин с песчаными породами и сильнозадернованных поверхностях с высокими кустами, и 0,9–1,0 м на задернованных поверхностях плоских водоразделов и склонов преимущественно с суглинистыми породами [Бабкина и др., 2019]. По данным мониторинга, средняя годовая температура пород на подошве сезонно-талого слоя изменяется от положительных значений на сильнозадернованной поверхности с высокими кустами до –5,2 °С на незадернованной вершинной поверхности. На глубине 10 м в скважине на незадернованной поверхности с песчаными породами с 2011 по 2025 г. средняя годовая температура пород увеличилась с –6,2 до –5,1 °С.

Результаты наблюдения за активностью термоцирков как основа оценки динамики и картографирования опасности криогенного оползания. Разрабатываемые в настоящее время принципы картографирования опасности КОТ основываются на предложенной методике ландшафтной индикации глубины залегания пластовых льдов [Хомутов и др., 2012], анализе активности термоцирков, первые результаты которого за 3 временных среза, до климатогенной активизации 2012 г., во время ее и через 5 лет после нее приведены в [Хомутов и др., 2024] и, что немаловажно, результатах не прекращающегося мониторинга ключевых термоцирков в центральной части полуострова Ямал [Бурдак и др., 2025]. Наиболее информативным методом для полевого мониторинга является съемка с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с последующим построением высокоточных ортофотопланов и их сопоставлением за разные годы. На начальном этапе полевого мониторинга для фиксации положения отступающей бровки термоцирков использовались стандартные GPS-приемники [Khomutov et al., 2017], что зачастую затрудняло оценку скорости отступания как при незначительном отступании бровки конкретного термоцирка, так и при малых временных промежутках между съемками.

Исследования показали, что основным фактором, влияющим на формирование КОТ является достижение сезонным протаиванием кровли пластового льда или сильнольдистых многолетнемерзлых пород [Бабкина и др., 2019; Хомутов и др., 2024]. Основным фактором пространственного распространения этого процесса является глубина залегания залежеобразующих подземных льдов [Хомутов и др., 2012]. Для территории Центрального Ямала на примере одного из ключевых участков выявлены пространственные закономерности залегания пластовых льдов и ландшафтные индикаторы дифференциации глубины залегания пластовых льдов, построена карта глубины залегания кровли пластового льда на ландшафтно-геоморфологической основе.

Наименее глубоко пластовые льды залегают в останцах высоких поверхностей и относительно неглубоко под протяженными слабо переработанными денудацией водоразделами – своеобразными хранилищами крупных залежей пластовых льдов. Более глубокое залегание в днищах долин и озерных котловин связано с вытаиванием льда как в голоценовом оптимуме, так и в настоящее время под действием отепляющего влияния водных масс и техногенного воздействия.

Одним из наиболее значимых отличий подходов к картографированию опасности КОТ от картографирования опасности КОС является то, что даже в пределах зарастающих или уже стабильных термоцирков (как результата КОТ) и оползневых цирков (как результата КОС) могут вновь сойти КОТ при увеличении суммы положительных температур воздуха в сочетании с высокими летними осадками за счет достижения сезонным протаиванием кровли пластового льда. На этом и должна основываться классификация выделенных на ландшафтной карте природно-территориальных комплексов (ПТК) по опасности возникновения КОТ.

Подавляющее большинство современных термоцирков приурочено к берегам озер и озерных котловин [Хомутов и др., 2024], реже – к берегам мелких термокарстовых озерков, и еще реже – к берегам рек и бортам оврагов, балок и ложбин стока. В ландшафтном отношении к берегам озер и озерных котловин примыкают, в основном, плоские пологие склоны с кочковатыми разнотравно-злаково-моховыми ивняками с участием ерника на суглинках и глинах (8, здесь и далее индексы ПТК согласно [Хомутов, Лейбман, 2016]) и вогнутые пологие оползневые склоны с поверхностями скольжения древних оползней с разнотравно-злаковыми ивняками на суглинках и засоленных глинах (10), в разное геологическое время переработанные термоденудационными процессами. К таким склонам приурочено большинство современных крупных термоцирков. Также достаточно распространены довольно крутые береговые уступы, подвергающиеся термоабразионному воздействию озерной воды и эрозионному воздействию речной воды в пределах пологохолмистых субгоризонтальных водораздельных поверхностей с полигональными кустарничково-травяно-лишайниковыми тундрами с раздувами на песках и супесях, местами с травяно-кустарниково-моховыми тундрами на супесях и суглинках (1) и плоских субгоризонтальных водораздельных поверхностей с травяно-кустарниково-моховыми тундрами на супесях и суглинках, с участками полигональных травяно-кустарниково-лишайниково-моховых тундр на песках и супесях (3). К верхним частям таких склонов приурочено значительное число современных небольших термоцирков и единичных КОТ, в том числе на границах с оврагами, балками, ложбинами стока и по берегам мелких термокарстовых озерков.

Как показали полевые и дистанционные наблюдения, начиная с 2012 г. активность криогенного оползания в изучаемом районе повысилась за счет аномальных климатических условий весенне-летнего сезона этого года, а затем к 2018 г. постепенно пошла на спад. Условия достаточно жаркого лета 2013 г. способствовали высоким темпам вытаивания подземного льда во вновь активизировавшихся и новых термоцирках. Условия аномально жаркого лета 2016 г. не внесли существенного вклада в активность термоденудационных процессов. Продолжили развиваться только крупные термоцирки с залежью пластового подземного льда, обнажающегося в стенках достаточной высоты и протяженности для того, чтобы не быть быстро захороненной оттаявшей породой. Помимо этого, документально зафиксированное увеличение активности выразилось лишь в повторном сходе КОТ в пределах одного из регулярно наблюдаемых и зарастающего на тот момент термоцирка (рис. 1). При этом, на исследуемой территории с 2010 г. по настоящее время сохраняется существенное количество эмбриональных термоцирков, по существу, представляющих из себя КОТ с наметившейся тенденцией развития в полноценный «классический» термоцирк. В 2020 г. согласно полевым наблюдениям обнаружен новый термоцирк (рис. 2), а в 2021 г. зафиксировано существенное отступание стенки по сравнению с 2018 г. на одном из медленно развивавшихся до этого термоцирков

(рис. 3). Один из термоцирков, возникший между 2013 и 2018 гг. на месте заросшего, показал существенный рост отступания бровки [Бурдак и др., 2025]. Анализ дистанционных материалов позволил обнаружить новый крупный КОТ на левобережье одного из левых притоков р. Нгэрм-Лымбадъяха [Бурдак и др., 2025], возникший, по всей видимости, в 2023 г.



Рис. 1. Обзорное БПЛА-фото ТЦ-4,4а в августе 2017 г., после схода нового КОТ в 2016 г.

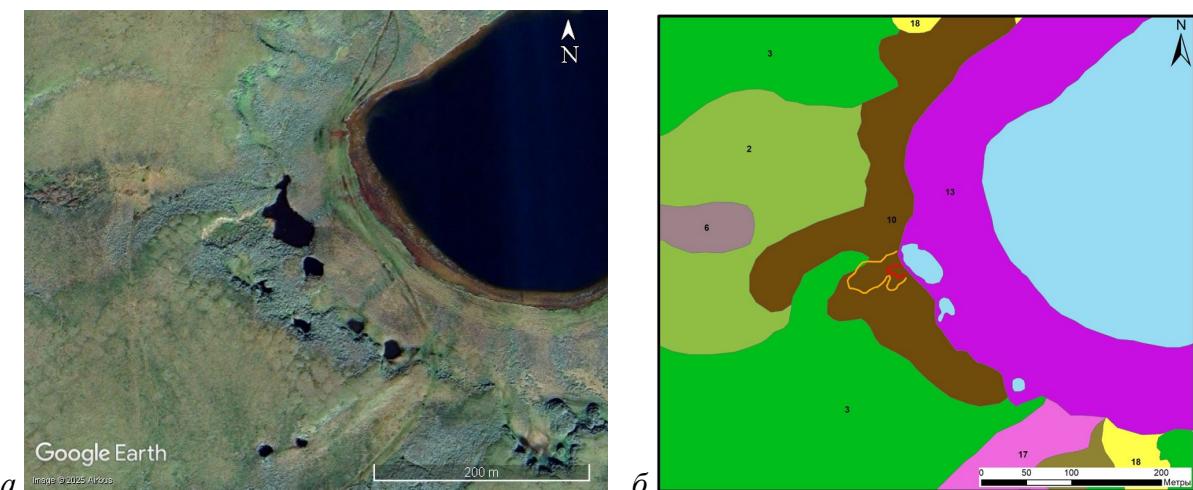


Рис. 2. ТЦ-2а на сцене мозаики Google Earth за 05.08.2025 г. (а) и на ландшафтной карте (б). Цифрами показаны индексы ПТК согласно [Хомутов, Лейбман, 2016], красной и оранжевой линиями показано положение бровки термоцирка в августе 2020 и 2021 гг., соответственно.

Заключение. Регулярные полевые и дистанционные наблюдения за активностью КОТ и термоцирков составляют базовую основу оценки динамики современного криогенного оползания на Центральном Ямале наряду с разработанной ландшафтной индикацией глубины залегания пластовых льдов и приуроченности современных КОТ и термоцирков к определенным ПТК, в основном к плоским и вогнутым пологим склонам с ивняками (8,10), уже переработанным криогенным оползанием.

Принципиальным отличием оценки опасности проявления КОТ от проведенной ранее оценки опасности КОС является сохранение возможности схода КОТ даже в пределах застраивающих или стабильных термоцирков и оползневых цирков при увеличении суммы положительных температур воздуха в сочетании с высокими летними

осадками за счет достижения сезонным протаиванием кровли пластового льда. Таким образом, для повторения КОТ на одном и том же месте достаточно нескольких, а не сотен лет как в случае с повторением КОС.

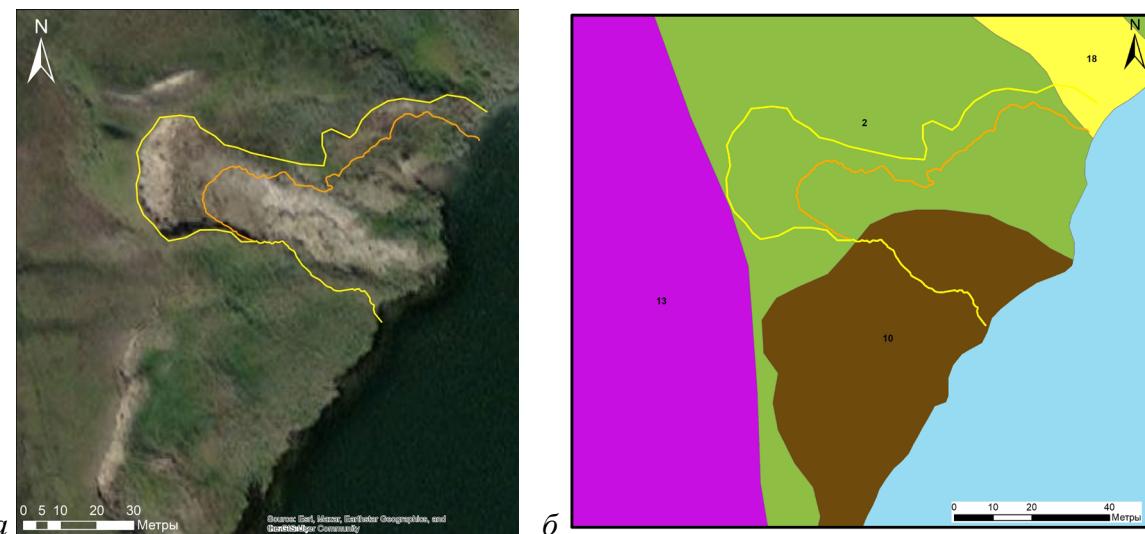


Рис. 3. ТЧ-НБ на сцене мозаики ESRI World Imagery за 13.08.2023 г. (а) и на ландшафтной карте (б). Цифрами показаны индексы ПТК согласно [Хомутов, Лейбман, 2016], оранжевой и желтой линиями показано положение бровки термоцирка в августе 2021 и 2023 гг., соответственно.

Финансирование. Работа выполнена ИКЗ ТюмНЦ СО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0012).

ЛИТЕРАТУРА

Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факацук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019. №4. С. 99–109.

Бурдак Д.В., Хомутов А.В., Гинзбург А.П., Данько М.М., Левочкина О.В., Мареев В.А., Тарасевич И.И., Хайруллин Р.Р. Результаты мониторинга термоцирков на Центральном Ямале в 2024 г. // «Проблемы криосферы Земли», Сборник тезисов, Пущино, 2025, С. 62–63.

Воскресенский К.С., Совершаев В.А. Роль экзогенных процессов в динамике арктических побережий // Динамика арктических побережий России. М., Изд-во Моск. ун-та. 1998, С. 35–48.

Каплина Т.Н. Криогенные склоновые процессы. М., Наука, 1965, 296 с.

Кизяков А.И. Динамика термоденудационных процессов на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли. 2005. Т. IX. № 1. С. 63–67.

Кизяков А.И., Лейбман М.О., Передня Д.Д. Деструктивные рельефообразующие процессы побережий Арктических равнин с пластовыми подземными льдами // Криосфера Земли. 2006. Т. X. №2. С. 79–89.

Лейбман М.О. Криогенные склоновые процессы и их геоэкологические последствия в условиях распространения пластовых льдов: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Тюмень, 2005, ИКЗ СО РАН, 48 с.

Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: Институт криосферы земли СО РАН; 2007. 206 с.

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. Т. 69. №4. С. 486–500. doi:10.30758/0555-2648-2023-69-4-486-500

Лейбман М.О., Хомутов А.В. Стационар «Васькины Дачи» на Центральном Ямале: 30 лет исследований // Криосфера Земли. 2019. Т. 23. № 1. С. 91-95. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(91-95)

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. Криосфера Земли. 2021. Т. XXV. №6. С. 41–50. doi:10.15372/KZ20210604

Хомутов А.В., Бабкина Е.А., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А. Факторы активизации термоденудации и активность термоцирков на Центральном Ямале в 2010–2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70. №2. С. 222–237. doi:10.30758/0555-2648-2024-70-2-222-237

Хомутов А.В., Лейбман М.О. Оценка опасности проявления криогенных оползней скольжения в тундре Центрального Ямала // Криосфера Земли. 2016. Т.ХХ. №2. 2016. С. 49–60.

Хомутов А.В., Лейбман М.О., Андреева М.В. Методика картографирования пластовых льдов Центрального Ямала // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2012. №7. С. 76–84.

Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., Khairullin R. Activation of Cryogenic Earth Flows and Formation of Thermocirques on Central Yamal as a Result of Climate Fluctuations, in: Advancing Culture of Living with Landslides, Proceedings of World Landslide Forum 4, Vol. 5, Landslides in Different Environments, 29 May–2 June 2017, Ljubljana, Slovenia. 2017. P. 209–216. doi:10.1007/978-3-319-53483-1_24

Leibman M.O., Khomutov A.V., Kizyakov A.I. Cryogenic Landslides in the West-Siberian Plain of Russia: Classification, Mechanisms and Landforms. In: Shan W. et al. (eds.). Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change, Environmental Science and Engineering. Springer International Publishing AG; 2014. P. 143–162. doi:10.1007/978-3-319-00867-7_11

Nesterova N., Tarasevich I., Leibman M., Khomutov A., Kizyakov A., Nitze I., Grosse G. High-resolution inventory and classification of retrogressive thaw slumps in West Siberia // Earth System Science Data. 2025. Vol. 17. P. 5707–5727. doi:10.5194/essd-17-5707-2025

REGULAR FIELD AND REMOTE OBSERVATIONS AS A BASIS FOR ASSESSING THE DYNAMICS OF CRYOGENIC LANDSLIDING AND MAPPING ITS HAZARD IN CENTRAL YAMAL

Khomutov A.V., Leibman M.O.

Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia

Regular field and remote observations of the activity of retrogressive thaw slumps and thermocirques in Central Yamal are the basis for assessing the dynamics of cryogenic landsliding and mapping its hazard using landscape indication of the depth of the tabular ground ice top and the attribution of recent RTS and thermocirques to specific landscape complexes.

Keywords: *cryogenic landslides, thermocirques, tabular ground ice, landscape map, hazard mapping*

REFERENCES:

Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., Fakashuk N.Yu, Khairullin R.R., Khomutov A.V. Activation of cryogenic processes in Central Yamal as a result of Regional and Local change in climate and thermal state of permafrost // Russian Meteorology and Hydrology. 2019. Vol.44. № 4. P. 283-290.

- Burdak D.V., Khomutov A.V., Ginzburg A.P., Danko M.M., Levochkina O.V., Mareev V.A., Tarasevich I.I., Khairullin R.R. Results of monitoring of thermocirques on Central Yamal in 2024. "Problems of the Earth Cryosphere", Pushchino, 2025. P. 62-63. (in Russian).
- Kaplina T.N. Cryogenic slope processes. Moscow. Nauka. 1965. 296 p. (in Russian).
- Khomutov A.V., Babkina E.A., Khairullin R.R., Dvornikov Yu.A. Factors of thermal denudation activation and thermocirques activity on central Yamal in 2010–2018 // Arctic and Antarctic Research. 2024. Vol. 70. Is. 2. P. 222-237. doi:10.30758/0555-2648-2024-70-2-222-237
- Khomutov A.V., Leibman M.O., Andreyeva M.V. Mapping of ground ice in Central Yamal // Tyumen State University Herald. 2012. №7. P. 68-76. (in Russian).
- Khomutov, A., Leibman, M., Dvornikov, Yu., Gubarkov, A., Mullanurov, D., and Khairullin, R.: Activation of Cryogenic Earth Flows and Formation of Thermocirques on Central Yamal as a Result of Climate Fluctuations, in: Advancing Culture of Living with Landslides, Proceedings of World Landslide Forum 4, Vol. 5, Landslides in Different Environments, 29 May–2 June 2017, Ljubljana. Slovenia. 2017. P. 209–216. doi:10.1007/978-3-319-53483-1_24
- Kizyakov A.I. The dynamics of thermodenudation processes at the Yugorsky Peninsula coast // Earth's Cryosphere. 2005. Vol. 9. Is. 1. P. 63–67.
- Kizyakov A.I., Leibman M.O., Perednya D.D. Destructive relief-forming processes on the Arctic Plains with tabular ground ice // Earth's Cryosphere. 2006. Vol. 10. Is. 2. P. 79–89. (in Russian).
- Leibman M.O. Cryogenic slope processes and their geoecological consequences in conditions of spreading of tabular ground ice: Abstract of the dissertation. ... Dr. Geol.-min. sciences. Tyumen, 2005, IKZ SB RAS. 48 p. (in Russian).
- Leibman M.O., Kizyakov A.I. Cryogenic landslides of Yamal and the Yugorsky Peninsula. Moscow: Earth Cryosphere Institute SB RAS. 2007. 206 p. (in Russian).
- 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. Vol. 69. Is. 4. P. 486-500. doi:10.30758/0555-2648-2023-69-4-486-500
- Leibman M.O., Khomutov A.V. Research station "Vaskiny Dachi" at Central Yamal: 30 years of study // Earth's Cryosphere. 2019. Vol. 23. No. 1. P. 78-82. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(91-95)
- Leibman M.O., Khomutov A.V., Kizyakov A.I. Cryogenic Landslides in the West-Siberian Plain of Russia: Classification, Mechanisms and Landforms. In: Shan W. et al. (eds.). Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change, Environmental Science and Engineering. Springer International Publishing AG; 2014. P. 143–162. doi:10.1007/978-3-319-00867-7_11
- 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 // Earth's Cryosphere. 2021. Vol. 25. Is. 6. P. 41–50. doi:10.15372/KZ20210604
- Nesterova N., Tarasevich I., Leibman M., Khomutov A., Kizyakov A., Nitze I., Grosse G. High-resolution inventory and classification of retrogressive thaw slumps in West Siberia // Earth System Science Data. 2025. Vol. 17. P. 5707–5727. doi:10.5194/essd-17-5707-2025
- Voskresenskiy K.S., Zavidaev V.A. The role of exogenous processes in the dynamics of Arctic coasts // Dynamics of the Arctic coasts of Russia. Moscow, MSU Publishing House. 1998. P. 35-48. (in Russian).