НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2021, т. ХХV, № 6, с. 41-50

https://www.sibran.ru

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 528.871; 551.435.5

DOI: 10.15372/KZ20210604

ИНВЕНТАРИЗАЦИЯ ТЕРМОЦИРКОВ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ МОЗАИКИ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ 2016–2018 ГОДОВ

Н.Б. Нестерова¹, А.В. Хомутов^{1,2}, М.О. Лейбман^{1,2}, Т.А. Сафонов¹, Н.Г. Белова^{2, 3}

¹ Тюменский государственный университет,

625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия; n.b.nesterova@utmn.ru, t.a.safonov@utmn.ru

² Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН,

625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; akhomutov@gmail.com, moleibman@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; belova@geogr.msu.ru

ттэээт, москва, ленинские горы, т, госсия, beloca@geogr.msu.ru

Изучение термоцирков дистанционными методами включает их первоначальную идентификацию на значительной территории. Для этого в работе впервые были использованы спутниковые снимки сервиса "Яндекс.Карты" на полуострова Ямал и Гыданский. Все термоцирки, приуроченные к берегам озер, разделены на активные и стабилизировавшиеся, для каждого определена экспозиция. Для полуострова Ямал идентифицировано 86 активных и 20 стабилизировавшихся термоцирков, для Гыданского полуострова – 224 активных и 109 стабилизировавшихся термоцирков. Распределение термоцирков по экспозиции не случайно. При множественном (попарном) сравнении распределения термоцирков по сторонам света было найдено статистически значимое преобладание количества термоцирков северной экспозиции над количеством термоцирков восточной экспозиции и преобладание количества термоцирков западной экспозиции над количеством термоцирков восточной. При этом ни одна экспозиция термоцирков не преобладает над всеми остальными. Не было выявлено статистически значимой связи между экспозицией и активностью термоцирков.

Ключевые слова: термоденудация, термоцирки, дистанционные методы, статистические методы, Ямал, Гыдан, Яндекс.Карты.

THE INVENTORY OF RETROGRESSIVE THAW SLUMPS (THERMOCIRQUES) IN THE NORTH OF WEST SIBERIA BASED ON 2016–2018 SATELLITE IMAGERY MOSAIC

N.B. Nesterova¹, A.V. Khomutov^{1,2}, M.O. Leibman^{1,2}, T.A. Safonov¹, N.G. Belova^{2, 3}

¹ Tyumen State University, Volodarskogo str. 6, Tyumen, 625003, Russia; n.b.nesterova@utmn.ru ² Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre SB RAS, Malygina str. 86, Tyumen, 625026, Russia; akhomutov@gmail.com ³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Leninskiye Gory 1, Moscow, 119991, Russia; belova@geogr.msu.ru

Remote sensing methods of retrogressive thaw slumps (RTS) – also called thermocirques (TC) – study include identification of them on vast territories. The satellite imagery mosaic of the Yandex.Maps service covering the Yamal and Gydan peninsulas was innovatively used for this purpose. All RTS (TC) occurred at the lake coasts were classified as active and stabilized, the orientation of each RTS (TC) was determined. We identified 86 active and 20 stabilized RTS in the Yamal peninsula and 224 active RTS versus 109 stabilized in Gydan. The distribution of RTS orientation was found to be not random. Multiple comparison of RTS orientation over four directions showed statistically significant predominance of Northern RTS orientations showed statistically significant predominance of the orientations showed statistically significant predominance of the orientations showed statistically significant predominance of the orientations showed statistically significant predominance of RTS orientation and RTS orientation and RTS activity was found.

Key words: thermodenudation, thermocirques, retrogressive thaw slumps, remote sensing, statistics, Yamal, Gydan, Yandex.Maps.

введение

Термоденудация представляет собой комплекс склоновых и эрозионных процессов, связанных с протаиванием обнаженных многолетнемерзлых пород или подземного льда [*Кизяков, 2005*]. Сплошное распространение многолетнемерзлых пород и наличие залежей пластовых льдов [Баулин и др., 1967; Романенко и др., 2001] в комплексе с динамикой сезонноталого слоя [Leibman,

© Н.Б. Нестерова, А.В. Хомутов, М.О. Лейбман, Т.А. Сафонов, Н.Г. Белова, 2021

Egorov, 1996] способствуют развитию термоденудации и формированию специфических отрицательных форм рельефа [Воскресенский, 2001; French, 2017]. В иностранной литературе термоденудационные формы рельефа, как и процесс, способствующий их развитию, описываются терми-HOM retrogressive thaw slump [Burn, Friele, 1989; French, 2017]. Термоденудационные процессы, развивающиеся на морских берегах и в глубине суши, различаются тем, что на морских берегах добавляется термоабразия [Хомутов, Лейбман, 2008]. В настоящей работе в качестве предмета исследования выбраны расположенные в глубине суши и приуроченные к озерам термоденудационные формы рельефа – термоцирки (ТЦ), которые, согласно классификации М.О. Лейбман и А.И. Кизякова [2007], сформированы комплексом разновозрастных криогенных оползней течения.

Термоцирки имеют форму серповидного углубления в склоне, развиваются циклично, затухая и активизируясь с периодичностью в несколько лет [*Burn, 2000*]. Характерным элементом морфологии активных ТЦ является наличие субвертикальной тыловой стенки с обнажениями льда или льдонасыщенных пород, а также переувлажненные потоки сносимого материала [*Lewkowicz, 1987; Lantuit, Pollard, 2005*]. В период затухания ТЦ стабилизируются и зарастают [*Burn, Friele, 1989*], а в рельефе видны очертания бровки стенки некогда активного ТЦ [*Brooker et al., 2014*].

Термоцирки изучаются как полевыми, так и дистанционными методами. В связи с цикличностью развития ТЦ актуально изучение их многолетней динамики [*Lewkowicz*, *Way*, 2019].

Важным направлением исследований ТЦ с помощью дистанционных методов является их инвентаризация: идентификация всех обнаруживаемых на снимках ТЦ и установление таких параметров, как экспозиция, статус активности, размеры, цикличность и др. Для поиска ТЦ используются мультиспектральные спутниковые снимки [*Lacelle et al., 2015; Kokelj et al., 2013*], а также аэрофотоснимки [*Segal et al., 2016*]. Среди методов непосредственной идентификации ТЦ по снимкам можно выделить следующие:

– визуальная оцифровка вручную по характерным признакам [Kokelj et al., 2013; Ramage et al., 2017; Lewkowicz, Way, 2019];

– автоматизированное дешифрирование космических снимков (tasseled cap) [*Brooker et al.*, 2014];

– метод глубокого обучения [Huang et al., 2020].

Для дальнейшего изучения идентифицированных ТЦ часто применяются регрессионный [Lacelle et al., 2015; Segal et al., 2016; Ramage et al., 2017] и корреляционный [Balser et al., 2014] виды анализа влияния различных факторов природной среды на образование и цикличность развития ТЦ. В некоторых работах отмечается активная стадия развития ТЦ или стадия стабилизации [Balser et al., 2014; Ramage et al., 2017]. В ограниченном числе работ приведены данные по экспозиции ТЦ или экспозиции склонов с ТЦ [Kokelj et al., 2009; Lacelle et al., 2015; Wang et al., 2016].

Не существует базы данных распространения ТЦ в Арктике, также нет крупномасштабных карт распространения пластовых льдов на севере Западной Сибири, которые являются ключевым фактором образования ТЦ. Космические снимки дают возможность охватить значительные площади, идентифицировать большое число ТЦ и провести статистическую обработку распределения и различных параметров ТЦ. При этом их использование в виде не только привычных растровых файлов, но и мозаики космических снимков в подложке доступных онлайн картографических сервисов имеет огромный потенциал.

Целью работы была инвентаризация ТЦ, расположенных в глубине суши полуостровов (т. е. термоцирки на морском побережье не рассматривались) и приуроченных к озерам, на основе единственной общедоступной мозаики космоснимков высокого разрешения 2016–2018 гг., представленной на сервисе Яндекс.Карты (http://yandex.ru/ maps), а также проведение первичного статистического анализа связи количества ТЦ, их активности и экспозиции. В качестве района исследования были выбраны полуострова Ямал и Гыданский, на которых проводились полевые наблюдения за ТЦ на ограниченных участках, но их масштабная инвентаризация не проводилась.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования охватывают север Западной Сибири в пределах 68-72° с.ш. и 66-83° в.д. Район исследования представляет собой аккумулятивную равнину. Прибрежные поверхности севера полуостровов по мере удаления от берега достигают абсолютных отметок 35 м над уровнем моря. Значительная часть центрального Ямала - это плоская и плоскохолмистая поверхность с абсолютными высотами до 67 м над уровнем моря. Юрибейская возвышенность вдоль побережья Гыдана имеет отметки высот до 87 м над уровнем моря. Через центральную часть Гыдана с юго-запада на северо-восток протягивается Гыданская гряда с отметками до 127 м над уровнем моря [Экологический атлас..., 2018]. Полуострова изрезаны овражно-балочной сетью и сетью малых рек, осложненных эрозионно-термокарстовыми образованиями [Романенко, 1997; Губарьков, Лейбман, 2010]. Регион заболочен и заозерен. Большинство озер относят к термокарстовым и старичным [Романенко, 1997]. В последних исследованиях отмечается возможность происхождения части озер в результате интенсивных выбросов газа [Dvornikov et al., 2019].

Для территории характерно сплошное распространение многолетнемерзлых пород, мощность которых достигает 450 м [Геокриология СССР, 1989]. Особенностью изучаемых полуостровов является широкое развитие пластовых льдов [Стрелецкая и др., 2002] и их неглубокое залегание, обусловливающее наличие многочисленных ТЦ [Хомутов и др., 2012].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕРМОЦИРКОВ

Работа включала идентификацию ТЦ и статуса их активности, определение экспозиции ТЦ и статистический анализ.

Идентификация термоцирков и статуса их активности

Идентификация расположенных в глубине суши и приуроченных к озерам ТЦ на полуостровах Ямал и Гыданский осуществлялась вручную на онлайн-сервисе Яндекс.Карты (http://yandex. ru/maps) по визуальным дешифровочным признакам путем создания точки с пространственной привязкой. Для каждой точки вносилась информация по статусу активности ТЦ и его экспозиции.

Спутниковые данные мозаики космических снимков, доступной в онлайн-сервисе Яндекс. Карты, предоставлены сотрудниками ООО ИТЦ "СКАНЭКС", выполнившими обработку снимков баз спутниковых данных: "WorldView-2" Data (DigitalGlobe, Inc.), IKONOS Data (Geo Eye, Inc.),



Рис. 1. Примеры термоцирков и их характерные визуальные дешифровочные признаки:

a – активный ТЦ, снимок с БПЛА (фото А.В. Хомутова); *б* – стабилизировавшийся ТЦ, снимок с БПЛА (фото А.В. Хомутова); *в* – активный ТЦ на мозаике космических снимков на Яндекс.Карты; визуальные дешифровочные признаки: *1* – специфическая серповидная форма, *2* – снег и(или) тень, подчеркивающие стенку ТЦ, *3* – поток переувлажненных пород серого цвета (оконтурен пунктиром) [*Segal et al., 2016*], *4* – повышенная мутность воды и шлейф оттаявшей породы серого цвета (оконтурен пунктиром); *г* –стабилизировавшийся ТЦ на мозаике космических снимков на Яндекс.Карты; визуальные дешифровочные признаки: *5* – схожий цвет окружающей тундровой растительности и самого ТЦ; *6* – заметная линия бывшей стенки ТЦ (оконтурена пунктиром).

TerraColor Data (Earthstar Geographics), IRS Data (ANTRIX Corporation Ltd.), данных European Space Imaging GmBH, DigitalGlobe, Inc. и Airbus DS. Эти базы данных содержат снимки спутников WorldView-2, IKONOS, Landsat-7, Sentinel, SPOT-1-5 и многих других.

Сервис Яндекс.Карты не предоставляет информацию о времени и дате съемки, а также об используемом спутнике для конкретных космических снимков из мозаики. Это ограничило возможности детального анализа снимков, а также изучения спектральных характеристик объектов, но не исключило возможность идентификации ТЦ по визуальным дешифровочным признакам. Поэтому отсутствие детальной информации о времени и дате съемки, а также модели спутника не представляется критичным. В то же время сервис Народные Яндекс.Карты, на котором дана та же мозаика космических снимков, что и на сервисе Яндекс.Карты, предоставляет информацию о месяце и годе съемки. На исследуемую территорию спутниковые снимки были сделаны в основном в июле 2017 г., частично в июле 2016 г., сентябре 2016 г., июне 2017 г. и сентябре 2017 г. Наша работа проведена после обновления представленной в базе мозаики космических снимков на территорию исследования в 2018 г.

Необходимо учитывать, что объекты, идентифицируемые как ТЦ, определялись по снимкам, представленным на сервисе Яндекс.Карты, имеющим разное пространственное разрешение, составляющее от 0.4 до 15 м, преимущественно до 2 м. В связи с этим рассмотрены только относительно крупные ТЦ (длиной и шириной не менее 20 м), идентификация которых не вызывала сомнений.

Термоцирки подразделены на две группы по активности: активные и стабилизировавшиеся. Примеры активного и стабилизировавшегося ТЦ при съемке с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) приведены на рис. 1. Характерными визуальными дешифровочными признаками активных ТЦ на космических снимках являются: серповидная форма явно выраженной бровки, наличие стенки с обнажениями пород и пластовых льдов, снежник или тень, подчеркивающие эту стенку, потоки оттаявшего материала, а также отсутствие



Рис. 2. Отображение активного ТЦ (a, δ) и стабилизировавшегося ТЦ (b, c) на космическом снимке WorldView-2 от 10.07.2018 (a, b) и мозаике космических снимков сервиса Яндекс.Карты, 2018 (δ , c).

растительности [Balser et al., 2014; Brooker et al., 2014; Segal et al., 2016]. Стабилизировавшиеся ТЦ визуально характеризуются отсутствием стенки с обнажением пород и пластовых льдов (тени от уступа), отсутствием потоков оттаявших пород (серый фототон), наличием растительности (зеленый фототон), при этом в рельефе заметна бровка бывшего обнажения [Balser et al., 2014; Brooker et al., 2014]. Выделенные нами дешифровочные признаки активных и стабилизировавшихся ТЦ на мозаике спутниковых снимков сервиса Яндекс.Карты показаны на рис. 1, в, г. Частично стабилизировавшиеся ТЦ, имеющие некоторые признаки активности (например, потоки), отнесены к активным.

Для оценки результативности применения визуальных признаков авторы совместили ТЦ, идентифицированные на сервисе Яндекс.Карты, с имеющимися на некоторые участки высокодетальными космическими снимками и получили удовлетворительный результат (рис. 2).

Дальнейшая визуализация и анализ полученных точечных данных с пространственной привязкой были выполнены в программе ArcGIS 10.3.

Определение экспозиции ТЦ и статистический анализ

Не существует общепризнанного представления о том, что считать экспозицией ТЦ. В некоторых исследованиях определяют экспозицию ТЦ как экспозицию склона [*Lacelle et al.*, 2015], экспозицию стенки отрыва [*Wang et al.*, 2016] или как направление перпендикуляра, построенного к условной линии, соединяющей две точки пересечения краев контура ТЦ с береговой линией озера [*Kokelj et al.*, 2009]. Авторы приняли представление С. Кокеля с соавт. [*Kokelj et al.*, 2009]. Выбранный метод позволяет сравнить наши результаты с результатами, полученными на севере Канады (рис. 3).

Экспозиции ТЦ по сторонам света определялись по 16 румбам. Для дальнейшего сравнения полученных результатов с данными [Kokelj et al., 2009] полученные экспозиции ТЦ были объединены в четыре основных румба: С, Ю, З, В.

Для того чтобы определить, является ли случайным распределение экспозиций ТЦ, использовался критерий согласия Пирсона, который был также применен в работе [Kokelj et al., 2009]. Критерий согласия Пирсона используется для оценки соответствия эмпирического распределения теоретическому [Степанов, Шаврин, 2005]. В нашем случае теоретическое – это равномерное распределение. Любое статистически значимое отклонение распределения экспозиций ТЦ от теоретического считается неравномерным.

Чтобы определить закономерность распределения экспозиций ТЦ по сторонам света и обнаружить преобладание какой-либо одной из них над



Рис. 3. Визуализация метода определения экспозиции ТЦ [Kokelj et al., 2009].

Символ "Х" обозначает точку пересечения краев контура ТЦ с береговой линией озера, штриховая линия соединяет две точки пересечения, стрелка перпендикулярна этой линии (направление стрелки принимается за экспозицию ТЦ).

остальными было осуществлено множественное (попарное) сравнение экспозиций друг с другом с помощью теста на равные пропорции, в результате вычислялся z-критерий Фишера. Это позволило рассчитать уровень значимости *p* с пороговым значением 5 %.

Для определения взаимосвязи между статусом активности и экспозицией ТЦ был также применен критерий согласия Пирсона.

Все статистические тесты проводились в программе RStudio v.1.2.5001.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На полуостровах Ямал и Гыданский было идентифицировано 439 ТЦ на общей площади ~88 тыс. км², т. е. около 5 ТЦ на 1000 км². Из них на площади ~40.8 тыс. км² на Ямале (общая площадь Ямала 122 тыс. км²) расположено 106 ТЦ, т. е. менее 3 на 1000 км². На п-ове Гыданский (общая площадь 160 тыс. км²) на территории площадью ~47.2 тыс. км² выявлено 333 ТЦ, т. е. более 7 на 1000 км².

На Ямале мы выделили 86 активных и 20 стабилизировавшихся ТЦ. Для п-ова Гыданский 224 ТЦ были определены как активные и 109 как стабилизировавшиеся (рис. 4).

Ввиду того что отмечались только относительно крупные ТЦ, которые не вызывали сомнений, мы изначально недооценивали суммарное число ТЦ разного размера на обоих полуостровах. Другие исследователи также отмечают вероятность недооценки количества ТЦ при ручной идентификации на снимках среднего пространственного разрешения [Lewkowicz, Way, 2019].

Н.Б. НЕСТЕРОВА И ДР.



Рис. 4. Распространение идентифицированных термоцирков на полуостровах Ямал и Гыданский.

1 – активные ТЦ; 2 – стабилизировавшиеся ТЦ; 3 – места проявлений пластовых льдов, указанных в публикациях базы данных "Пластовые льды" [Стрелецкая и др., 2002]. На круговых диаграммах приведено количество идентифицированных ТЦ разного статуса активности на полуостровах Ямал и Гыданский.



Рис. 5. Распределение количества ТЦ на Ямале и Гыдане по четырем румбам экспозиции.

Количество ТЦ: 1 – активных, 2 – стабилизировавшихся, 3 – общее количество активных и стабилизировавшихся ТЦ. Самый северный идентифицированный ТЦ на Ямале расположен на 70°56′14″ с.ш., самый южный – на 68°00′55″ с.ш. На Гыдане самый северный ТЦ идентифицирован на 71°56′25″ с.ш., самый южный – на 69°25′09″ с.ш. Области распространения идентифицированных ТЦ расположены внутри зоны, где были изучены и описаны залежи пластовых льдов (см. рис. 4) [*Стрелецкая и др., 2002*], которые наряду с сильнольдистыми отложениями и повторно-жильными льдами определяют развитие термоденудационных процессов в этом регионе. Распространение пластовых льдов на севере п-ова Ямал не сопровождается развитием термоцирков в связи со значительным снижением абсолютных отметок рельефа в этом направлении.

Преобладание на обоих полуостровах активных ТЦ показывает, что в 2016–2018 гг. на изучаемой территории активно протекали процессы термоденудации (см. рис. 4). Это согласуется с результатами полевых исследований в этом районе [*Khomutov et al.*, 2017].

Распределение ТЦ по экспозициям для Ямала и Гыдана приведено на рис. 5.

В целом для обоих полуостровов статистический тест показал, что на 5%-м уровне значимости распределение по сторонам света экспозиций ТЦ не случайно. Этот вывод согласуется с результатами, полученными в исследовании С. Кокель с соавт. [Kokelj et al., 2009] о распространении 530 ТЦ (как активных, так и стабилизировавшихся) на нагорье к востоку от дельты р. Маккензи (север Канады). В настоящей работе ни одна экспозиция ТЦ не была определена как статистически преобладающая над всеми остальными. При этом следует отметить, что множественное сравнение экспозиций показало статистически значимое преобладание северной экспозиции над восточной, а также западной экспозиции над восточной. Отсутствует также взаимосвязь на 5%-м уровне значимости между экспозицией ТЦ суммарно на обоих полуостровах и статусом активности ТЦ.

Из получившейся выборки на каждом из полуостровов выявлены различия в распределении экспозиций активных и стабилизировавшихся ТЦ. Несмотря на сходное распределение экспозиций суммарно всех ТЦ на обоих полуостровах (рис. 6), активные ТЦ на Ямале имеют преобладающие северную, западную и южную экспозиции, а на п-ове Гыданский – южную и западную. Для стабилизировавшихся ТЦ на Ямале нет преобладающей экспозиции, а для п-ова Гыданский она четко определена на север.

Аналогичные исследования в Канаде показали, что на северо-западе Канады (хр. Ричардсон и плато Пил) наблюдается преобладание восточной экспозиции для 212 изученных ТЦ [Lacelle et al., 2015]. На северо-западе Канады (дельта р. Маккензи) преобладающая экспозиция термоцирков была определена как северная [Kokelj et al., 2009], а исследование 18 ТЦ, расположенных на севере Канады, демонстрирует отсутствие связи ТЦ с экспозицией склона [Wang et al., 2016].

Такая размытая картина преобладания той или иной экспозиции термоцирков разного статуса активности, а также различие полученных результатов, вероятно, связаны с наличием других факторов, которые не были рассмотрены в этой статье. Ими могут являться: геолого-геокриологическая характеристика (льдистость пород, глубина залегания пластовых льдов, распределение глубин протаивания многолетнемерзлых пород по склонам разных экспозиций), климатическая (количество снега на склонах разных экспозиций, продолжительность солнечного сияния, роза ветров), геоморфологическая (преобладание по площади склонов той или иной экспозиции в целом на территории исследования), биогеографическая



Рис. 6. Распределение количества ТЦ по четырем румбам экспозиции на Ямале (*a***) на Гыдане (***б***).** Усл. обозн. см. на рис. 5.

(высота кустарника) характеристики территорий с выявленными ТЦ. Все эти факторы послужат предметом при дальнейшем более детальном изучении распределения в пространстве идентифицированных ТЦ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе был впервые успешно применен метод визуальной идентификации ТЦ по мозаике общедоступных спутниковых снимков картографического сервиса Яндекс.Карты на территории полуостровов Ямал и Гыданский.

В результате обнаружено 439 ТЦ, из них 106 ТЦ расположено на Ямале (86 активных и 20 стабилизировавшихся), 333 ТЦ расположено на Гыдане (224 активных и 109 стабилизировавшихся).

Самый северный и самый южный идентифицированные ТЦ на п-ове Ямал расположены на 70°56′14″ с.ш. и 68°00′55″ с.ш. Для п-ова Гыданский самый северный ТЦ был идентифицирован на 71°56′25″ с.ш., самый южный – на 69°25′09″ с.ш.

Выявленное преобладание активных ТЦ согласуется с результатами экспедиционных исследований авторов, отмечавших активизацию термоденудационных процессов в последние годы в связи с экстремальными климатическими событиями 2012 и 2016 гг.

Первичный статистический анализ экспозиций ТЦ показал: 1) неслучайное распределение экспозиций ТЦ (на 5%-м уровне статистической значимости), при этом ни одно направление не было отмечено преобладающим над всеми остальными, т. е. явно доминирующей экспозиции ТЦ нет; 2) отсутствие статистически значимой связи между экспозициями ТЦ и статусом их активности.

Результаты частично согласуются с результатами исследований на севере и северо-западе Канады, где широко распространены процессы термоденудации, а различия, вероятно, связаны с региональными геолого-геоморфологическими и геокриологическими, криолитологическими, ландшафтными и климатическими особенностями изучаемой территории.

Полученные результаты демонстрируют широкое распространение ТЦ на изучаемой территории, а их успешная инвентаризация на базе общедоступных дистанционных материалов дает основание для их дальнейшего многофакторного исследования.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60222). Методические подходы разрабатывались при выполнении работы по госзаданию № 121041600042-7.

Литература

Баулин В.В. Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности / В.В. Баулин, Е.Б. Белопухова, Г.И. Дубиков, Л.М. Шмелев. М., Наука, 1967, 214 с.

Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М., Изд-во Моск. унта, 2001, 262 с.

Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1989, 454 с.

Губарьков А.А., Лейбман М.О. Четкообразные русловые формы в долинах малых рек на Центральном Ямале – результат парагенеза криогенных и гидрологических процессов // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 1, с. 41–49.

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

Лейбман М.О. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова / М.О. Лейбман, А.И. Кизяков. М., ИКЗ СО РАН, 2007, 206 с.

Романенко Ф.А. Формирование озерных котловин на равнинах Арктической Сибири: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1997, 25 с.

Романенко Ф.А., Воскресенский К.С., Тарасов П.Е. и др. Особенности формирования рельефа и рыхлых отложений западного Ямала и побережья Байдарацкой губы (Карское море) // Проблемы общей и прикладной геоэкологии Севера. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, с. 41–68.

Степанов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М.Н. Степанов, А.В. Шаврин. М., Машиностроение, 2005, 399 с.

Стрелецкая И.Д., Украинцева Н.Г., Дроздов И.Д. Пластовые льды Арктики. Электронная база данных // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2002, № 3, с. 7–13.

Хомутов А.В., Лейбман М.О. Ландшафтные факторы изменения скорости термоденудации на побережье Югорского полуострова // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 4, с. 24–35.

Хомутов А.В., Лейбман М.О., Андреева М.В. Методика картографирования пластовых льдов Центрального Ямала // Вестн. Тюм. гос. ун-та, 2012, № 7, с. 76–84.

Экологический атлас Ямало-Ненецкого автономного округа: результаты научных исследований, состояние, динамика, прогноз / Под ред. Е.В. Агбалян, И.Р. Идрисова, В.А. Добряковой. Тюмень, Изд-во Тюм. ун-та, 2018, 116 с.

Balser A.W., Jones J.B., Gens R. Timing of retrogressive thaw slump initiation in the Noatak Basin, northwest Alaska, USA // J. Geophys. Res.: Earth Surface, 2014, vol. CXIX, No. 5, p. 1106–1120.

Brooker A., Fraser R.H., Olthof I. et al. Mapping the activity and evolution of retrogressive thaw slumps by tasselled cap trend analysis of a Landsat satellite image stack // Permafrost and Periglacial Process., 2014, vol. XXV, No. 4, p. 243–256.

Burn C.R. The thermal regime of a retrogressive thaw slump near Mayo, Yukon Territory // Can. J. Earth Sci., 2000, vol. XXXVII, No. 7, p. 967–981.

Burn C.R., Friele P.A. Geomorphology, vegetation succession, soil characteristics and permafrost in retrogressive thaw slumps near Mayo, Yukon Territory // Arctic, 1989, vol. XLII, No. 1, p. 31–40.

Dvornikov Y.A., Leibman M.O., Khomutov A.V. et al. Gas emission craters of the Yamal and Gydan peninsulas: A proposed mechanism for lake genesis and development of permafrost landscapes // Permafrost and Periglacial Process., 2019, vol. XXX, No. 3, p. 146–162.

French H.M. The periglacial environment. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2017, 544 p.

Huang L., Luo J., Lin Z. et al. Using deep learning to map retrogressive thaw slumps in the Beiluhe region (Tibetan Plateau) from CubeSat images // Remote Sens. Environ., 2020, vol. CCXXXVII, p. 111534.

Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Y. et al. Activation of cryogenic earth flows and formation of thermocirques on central Yamal as a result of climate fluctuations // Workshop on World Landslide Forum. Springer, Cham, 2017, p. 209–216.

Kokelj S.V., Lacelle D., Lantz T.C. et al. Thawing of massive ground ice in mega slumps drives increases in stream sediment and solute flux across a range of watershed scales // J. Geophys. Res.: Earth Surface, 2013, vol. CXVIII, No. 2, p. 681–692.

Kokelj S.V., Lantz T.C., Kanigan J. et al. Origin and polycyclic behaviour of tundra thaw slumps, Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada // Permafrost and Periglacial Process., 2009, vol. XX, No. 2, p. 173–184.

Lacelle D., Brooker A., Fraser R.H., Kokelj S.V. Distribution and growth of thaw slumps in the Richardson Mountains–Peel Plateau region, northwestern Canada // Geomorphology, 2015, vol. CCXXXV, p. 40–51.

Lantuit H., Pollard W.H. Temporal stereophotogrammetric analysis of retrogressive thaw slumps on Herschel Island, Yukon Territory // Natural Hazards and Earth System Sci., 2005, vol. V, No. 3, p. 413–423.

Leibman M.O., Egorov I.P. Climatic and environmental controls of cryogenic landslides, Yamal, Russia // Intern. Sympos. on landslides terrain (Trondheim, June 17, 1996), Trondheim, Norway, 1996, p. 1941–1946.

Lewkowicz A.G. Headwall retreat of ground-ice slumps, Banks Island, Northwest Territories // Can. J. Earth Sci., 1987, vol. 24, No. 6, p. 1077–1085.

Lewkowicz A.G., Way R.G. Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a High Arctic environment // Nature Communication, 2019, vol. X, No. 1, p. 1–11.

Ramage J.L., Irrgang A.M., Herzschuh U. et al. Terrain controls on the occurrence of coastal retrogressive thaw slumps along the Yukon Coast, Canada // J. Geophys. Res.: Earth Surface, 2017, vol. CXXII, No. 9, p. 1619–1634.

Segal R.A., Lantz T.C., Kokelj S.V. Acceleration of thaw slump activity in glaciated landscapes of the Western Canadian Arctic // Environ. Res. Lett., 2016, vol. XI, No. 3, p. 034025.

Wang B., Paudel B., Li H. Behaviour of retrogressive thaw slumps in northern Canada–three-year monitoring results from 18 sites // Landslides, 2016, vol. XIII, No. 1, p. 1–8.

URL: http://yandex.ru/maps – [Электрон. ресурс Яндекс. Карты] (дата обращения: 18.08.2019).

References

Baulin V.V., Belopukhova E.B., Dubikov G.I., Shmelev L.M. Geokriologicheskie usloviya Zapadno-Sibirskoi nizmennosti [Geocryological Conditions of Western Siberia Lowland]. Moscow, Nauka, 1967, 214 p. (in Russian).

Voskresenskij K.S. Sovremennye rel'efoobrazujushhie processy na ravninah Severa Rossii [The Modern Relief-Forming Processes on Plains of the Northern Russia]. Moscow, Moscow University Press, 2001, 262 p. (in Russian).

Geokriologiya SSSR. Zapadnaya Sibir' [Geocryology of the USSR. Western Siberia]. E.D. Yershov (Ed.). Moscow, Nedra, 454 p. (in Russian).

Gubarkov A.A., Leibman M.O. Bead-shaped channel forms as evidence of paragenesis of cryogenic and hydrological processes in the small-river valleys of Central Yamal. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2010, vol. XIV, No. 1, p. 41–49 (in Russian).

Kizyakov A.I. The dynamics of thermodenudation processes at the Yugorsky Peninsula coast. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2005, vol. IX, No. 1, p. 63–67 (in Russian).

Leibman M.O., Kizyakov A.I. Kriogennye opolzni Yamala i Ugorskogo poluostrova [Cryogenic landslides of the Yamal and Yugorsky Peninsulas]. Moscow, IKZ SO RAN, 2007, 206 p. (in Russian).

Romanenko F.A. Formirovanie ozernyh kotlovin na ravninah Arkticheskoj Sibiri [Formation of lake basins on the plains of Arctic Siberia]. Abstract of PhD thesis, Moscow, 1997, 25 p. (in Russian).

Romanenko F.A., Voskresensky K.S., Tarasov P.E. et al. Peculiarities of formation of relief and sediments West Yamal and Baidaratskaya Bay cost (Kara Sea). In: Problemu obshchei i prikladnoi geoekologii Severa [Problems of General and Applied Geoecology of the North]. Moscow, Moscow University Press, 2001, p. 41–68 (in Russian).

Stepanov M.N., Shavrin A.V. Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mehanicheskih ispytanij [Statistical Methods of Processing Mechanical Test Results]. Moscow, Mashinostroenie, 2005, 399 p. (in Russian).

Streletskaya I.D., Ukraintseva N.G., Drozdov I.D. Tabular ground ice of the Arctic. A digital database. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5. Geografia [Moscow University Bulletin. Series 5. Geography], 2002, No. 3, p. 7–13 (in Russian). Khomutov A.V., Leibman M.O. Landscape controls of thermodenudation rate change on Yugorsky peninsula coast. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2008, vol. XII, No. 4, p. 24–35 (in Russian).

Khomutov A.V., Leibman M.O., Andreeva M.V. Mapping of ground ice in Central Yamal. Vestnik Tumenskogo gosudarstvennogo universiteta [Tyumen State University Herald], 2012, No. 7, p. 76–84 (in Russian).

Ekologicheskij atlas Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga: rezul'taty nauchnyh issledovanij, sostojanie, dinamika, prognoz [Ecological Atlas of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug: results of scientific research, state, dynamics, forecast]. E.V. Aghbalyan, R.I. Idrisov, A.V. Dobryakova (Eds.). Tyumen, Tyumen University Press, 2018, 116 p. (in Russian).

Balser A.W., Jones J.B., Gens R. Timing of retrogressive thaw slump initiation in the Noatak Basin, northwest Alaska, USA. J. Geophys. Research: Earth Surface, 2014, vol. CXIX, No. 5, p. 1106–1120.

Brooker A., Fraser R.H., Olthof I. et al. Mapping the activity and evolution of retrogressive thaw slumps by tasselled cap trend analysis of a Landsat satellite image stack. Permafrost and Periglacial Processes, 2014, vol. XXV, No. 4, p. 243–256.

Burn C.R. The thermal regime of a retrogressive thaw slump near Mayo, Yukon Territory. Can. J. Earth Sciences, 2000, vol. XXXVII, No. 7, p. 967–981.

Burn C.R., Friele P.A. Geomorphology, vegetation succession, soil characteristics and permafrost in retrogressive thaw slumps near Mayo, Yukon Territory. Arctic, 1989, vol. XLII, No. 1, p. 31–40.

Dvornikov Y.A., Leibman M.O., Khomutov A.V. et al. Gas emission craters of the Yamal and Gydan peninsulas: A proposed mechanism for lake genesis and development of permafrost landscapes. Permafrost and Periglacial Processes, 2019, vol. XXX, No. 3, p. 146–162.

French H.M. The periglacial environment. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2017, 544 p.

Huang L., Luo J., Lin Z. et al. Using deep learning to map retrogressive thaw slumps in the Beiluhe region (Tibetan Plateau)

from CubeSat images. Remote Sensing of Environ., 2020, vol. CCXXXVII, p. 111534.

Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Y. et al. Activation of cryogenic earth flows and formation of thermocirques on central Yamal as a result of climate fluctuations. In: Workshop on World Landslide Forum. Springer, Cham, 2017, p. 209–216.

Kokelj S.V., Lacelle D., Lantz T.C. et al. Thawing of massive ground ice in mega slumps drives increases in stream sediment and solute flux across a range of watershed scales. J. Geophys. Research: Earth Surface, 2013, vol. CXVIII, No. 2, p. 681–692. Kokelj S.V., Lantz T.C., Kanigan J. et al. Origin and polycyclic behaviour of tundra thaw slumps, Mackenzie Delta region, Northwest Territories, Canada. Permafrost and Periglacial

Processes, 2009, vol. XX, No. 2, p. 173–184. Lacelle D., Brooker A., Fraser R.H., Kokelj S.V. Distribution and growth of thaw slumps in the Richardson Mountains–Peel Plateau region, northwestern Canada. Geomorphology, 2015, vol. CCXXXV, p. 40–51.

Lantuit H., Pollard W.H. Temporal stereophotogrammetric analysis of retrogressive thaw slumps on Herschel Island, Yukon Territory. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2005, vol. V, No. 3, p. 413–423. Leibman M.O., Egorov I.P. Climatic and environmental controls of cryogenic landslides, Yamal, Russia. In: International Symposium on landslides terrain (Trondheim, June 17, 1996), Trondheim, Norway, 1996, p. 1941–1946.

Lewkowicz A.G. Headwall retreat of ground-ice slumps, Banks Island, Northwest Territories. Can. J. Earth Sciences, 1987, vol. 24, No. 6, p. 1077–1085.

Lewkowicz A.G., Way R.G. Extremes of summer climate trigger thousands of thermokarst landslides in a High Arctic environment. Nature Communication, 2019, vol. X, No. 1, p. 1–11.

Ramage J.L., Irrgang A.M., Herzschuh U. et al. Terrain controls on the occurrence of coastal retrogressive thaw slumps along the Yukon Coast, Canada. J. Geophys. Research: Earth Surface, 2017, vol. CXXII, No. 9, p. 1619–1634.

Segal R.A., Lantz T.C., Kokelj S.V. Acceleration of thaw slump activity in glaciated landscapes of the Western Canadian Arctic. Environ. Res. Letters, 2016, vol. XI, No. 3, p. 034025.

Wang B., Paudel B., Li H. Behaviour of retrogressive thaw slumps in northern Canada–three-year monitoring results from 18 sites. Landslides, 2016, vol. XIII, No. 1, p. 1–8.

URL: http://yandex.ru/maps (last visited: 18.08.2019).

Поступила в редакцию 28 декабря 2020 г., после доработки – 15 сентября 2021 г., принята к публикации 14 октября 2021 г.