

Оригинальная статья

**Первые результаты мониторинга развития полигонального рельефа
в зоне взаимодействия торфяник–озеро
на севере Пур-Тазовского междуречья в 2021–2023 гг.**

М. М. Данько[✉], А. В. Хомутов

*Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Российская Федерация
[✉]mdanko1996@mail.ru*

Аннотация

Мониторинг состояния многолетнемерзлых пород, в который входят наблюдения за изменениями глубины их сезонного протаивания и температуры, проводится с прошлого столетия и имеет широкое географическое распространение. Однако, увеличение суммы среднесуточных положительных температур воздуха и среднегодовой температуры воздуха приводит к резкой активизации криогенных процессов на севере Западной Сибири. С 2016 г. на Пур-Тазовском междуречье проводятся детальные комплексные исследования многолетнемерзлых полигональных торфяников. С 2021 г. организован мониторинг развития полигонального рельефа и верхней части многолетнемерзлых пород под влиянием природных процессов на полигональных торфяниках по берегам озер. Проведена оценка изменений полигонального рельефа в зоне взаимодействия торфяник–озеро на полигональных торфяниках в результате проявления экзогенных процессов на фоне современных климатических колебаний. Основу проделанной работы составили полевые методы и подходы, включающие организацию мониторинговых площадок для наблюдения за состоянием геокриологических условий и съемку с применением беспилотного летательного аппарата для оценки изменений рельефа и проявлений криогенных процессов на берегах озер. Результаты полевых наблюдений обрабатывались с использованием как классических статистических методов, так и специального программного обеспечения для обработки получаемых по результатам беспилотной съемки ортофотопланов и цифровых моделей рельефа и их сопоставления с космическими снимками. Определено несколько климатических и ландшафтных факторов, влияющих на полигональные торфяники в зоне взаимодействия торфяник–озеро. Накопленные данные мониторинга на нескольких участках в этой зоне в сочетании с результатами мониторинга ключевых торфяников района исследований позволили сделать предварительный вывод об общей зависимости деградации полигональных торфяников по берегам озер, вызываемой волновым воздействием озерной воды, от розы ветров района исследований на фоне современных климатических колебаний и от ландшафтно-геоморфологических условий мониторинговых площадок.

Ключевые слова: полигональные торфяники, глубина сезонного протаивания, изменение рельефа, криогенные процессы, Пур-Тазовское междуречье, озера

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

Благодарности. Авторы выражают признательность сотрудникам ИКЗ ТюмНЦ СО РАН Е.М. Бабкину, Е.А. Бабкиной, Н.А. Задорожной, В.И. Иванову, А.О. Кузнецовой, В.А. Марееву и Н.Ю. Факашуку за помощь в проведении исследования.

Для цитирования: Данько М.М., Хомутов А.В. Первые результаты мониторинга развития полигонального рельефа в зоне взаимодействия торфяник–озеро на севере Пур-Тазовского междуречья в 2021–2023 гг. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):49–60. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-49-60>

The first results of monitoring the development of polygonal relief in the peatland-lake interaction zone in the Northern Pur-Taz interfluvium from 2021 to 2023

Mikhail M. Danko✉, Artem V. Khomutov

Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation
✉mdanko1996@mail.ru

Abstract

Since the last century, the monitoring of permafrost rocks, which involves observing changes in the depth of seasonal thawing and temperature, has been conducted across a wide geographical area. However, an increase in the cumulative average daily positive air temperatures and the average annual air temperature has significantly activated cryogenic processes in the northern part of Western Siberia. Since 2016, extensive and thorough research on permafrost polygonal peatlands has been undertaken in the Pur-Taz interfluvium area. In 2021, a study was initiated to observe changes in polygonal relief and the upper layers of permafrost, which are affected by natural processes occurring in peatlands near lake shores. An assessment of changes in polygonal relief in the peatland-lake interaction zone of polygonal peatlands has been conducted as a result of exogenous processes against the background of modern climatic fluctuations. This study used field methods and approaches, including the establishment of monitoring sites to observe geocryological conditions and the use of unmanned aerial vehicles to assess changes in relief and manifestations of cryogenic processes along lake shores. The results of the field observations were analyzed using both classical statistical methods and specialized software for processing orthophotoplans and digital terrain models obtained from unmanned surveys. These findings were subsequently compared with satellite images. Several climatic and landscape factors affecting polygonal peatlands in the peatland-lake interaction zone were identified. Thus, the accumulated monitoring data from multiple sites within this zone, combined with results from key peatlands in the research area, allowed us to draw preliminary conclusions regarding the general dependence of polygonal peatland degradation along lake shores on the wave action of lake water, which is influenced by the wind rose of the research area. This degradation occurs against the background of contemporary climatic fluctuations and the differentiation of other contributing factors, including the landscape-geomorphological conditions of the monitoring sites.

Keywords: polygonal peatlands, thaw depth, relief changes, cryogenic processes, Pur-Taz interfluvium, lakes

Funding. This study was conducted by the Earth Cryosphere Institute of the Tyumen Scientific Centre SB RAS within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FWRZ-2021-0012).

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the staff of the Institute of the Earth's Cryosphere at the Tyumen Scientific Centre, SB RAS: E.M. Babkin, E.A. Babkina, N.A. Zadorozhnaya, V.I. Ivanov, A.O. Kuznetsova, V.A. Mareev, and N.Yu. Fakashuk for their invaluable assistance in conducting this research.

For citation: Danko M. M., Khomutov A. V. The first results of monitoring the development of polygonal relief in the peatland-lake interaction zone in the Northern Pur-Taz interfluvium from 2021 to 2023. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):49–60. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-49-60>

Введение

С середины XX века многие исследователи отмечали распространение торфяных массивов на севере Западной Сибири с хорошо прослеживаемым полигональным микрорельефом, который образуется в результате формирования повторно-жильных льдов (ПЖЛ) мощностью преимущественно до 5 м [1–6].

В Западной Сибири еще в 1985 г. П.И. Кашпирюк [6] определил пять главных типов торфя-

ных массивов: полигональные, бугристые, плоские, кочковатые и грядово-мочажинные. Типы торфяных массивов были выделены по морфологическим признакам: площади, внешней форме элементов микрорельефа, высоте, наличию полигонального микрорельефа, приуроченности к геоморфологическим уровням и их генезису.

А.П. Тыртиков [7] описал влияние растительного покрова не только на морфологическую структуру торфяника, но также и на морозобой-

ное растрескивание грунтов, на накопление и сохранение ПЖЛ.

Мониторинг состояния многолетнемерзлых пород (ММП), включающий наблюдения за динамикой глубины сезонного протаивания и температуры верхней части ММП, проводится достаточно давно и имеет значительный географический охват [8–10]. Однако экстремальные климатические события последних лет привели к значительным отклонениям от ранее выявленных закономерностей и резкой активизации криогенных процессов [11–14].

В начале прошлого столетия были написаны первые работы по районированию озерно-болотных геосистем севера части Западной Сибири [15–17] по изменению растительного покрова и микрорельефа болот. С развитием, а в дальнейшем с повышением качества свободно доступных данных дистанционного зондирования Земли из космоса появились новые методы изучения криогенных процессов. По этим снимкам разного пространственного разрешения и охвата анализировались изменения и прогнозировалось дальнейшее развитие ландшафтов. По территории Западной Сибири опубликовано значительное число работ по изучению термокарстовых процессов [18–22; и др.], но результаты противоречат друг другу в контексте динамики изменений площадей озер в зависимости от типа распространения ММП.

С 2016 г. на территории Пур-Тазовского междуречья на северо-востоке Западной Сибири проводятся детальные комплексные исследования мерзлых полигональных торфяников [14, 23–25]. На современном этапе исследований оцениваются быстрые изменения (с частотой 1 год) рельефа торфяников, связанные с естественными и техногенными факторами [23, 24]. В этих работах описаны морфометрические изменения полигональных торфяников, которые находятся под влиянием климатических изменений и насыпей автодорог.

Работы, детально рассматривающие динамику рельефа в зоне взаимодействия торфянико-озеро в контексте современного развития многолетнемерзлых полигональных торфяников на южном пределе их распространения в Западной Сибири, отсутствуют. Вопрос современной динамики рельефа в прибрежной части полигональных торфяников под воздействием современных климатических колебаний актуален в связи с деградацией ММП и природоохранными про-

блемами. Целью исследования является оценка изменений, происходящих в приозерной части полигональных торфяников в результате проявления экзогенных процессов на фоне современных климатических колебаний.

Материалы и методы исследований

Северная часть Пур-Тазовского междуречья относится к зоне сплошного распространения ММП. Среднегодовая температура воздуха по данным метеостанции Тазовский в период с 2005 по 2023 г. составляет $-6,4^{\circ}\text{C}$ [26], что на $2,9^{\circ}\text{C}$ выше ранее опубликованных данных [27].

Среднегодовое количество осадков составляет около 400 мм, при этом большая их часть (от 250 до 300 мм) выпадает в теплый период (май–первая декада октября). Снежный покров по метеоданным метеостанции Тазовский в середине зимы составляет 14–16 см [26]. В период с 2005 по 2023 г. среднегодовое количество осадков составило 573 мм, что на 44 % больше средней многолетней нормы (1968–1989 гг.) [27].

Согласно карте природных комплексов севера Западной Сибири [28], территория северной части Пур-Тазовского междуречья представляет собой комплекс геоморфологических уровней: I и II морские террасы на севере, I и II надпойменные террасы, III и IV озерно-аллювиальные равнины в центральной и южной части территории исследований. В геоморфологическом отношении выделяются следующие элементы – лайды, поймы, террасы, равнины, озерные котловины, речные долины и хасыреи.

Среди криогенных процессов широко развиты термокарстовые. Такие процессы обуславливают формирование отрицательных форм рельефа (канал, котловин, термокарстовых озерков и озер). Широко распространены формы рельефа, связанные с полигональным растрескиванием грунтов: полигоны, валики и пятна-медальоны [26].

Полигональные торфяники юга Гыданского полуострова, в районе пос. Тазовский и долине р. Мессояха по характеру строения торфяной залежи близки к описанным на полуострове Ямал. Верхний слой (5–20 см) торфяной залежи представлен здесь дренированными лишайниково-кустарничковыми торфами слабой степени разложения. Локально непосредственно под дерниной залегают сфагновые и гипновые низинные торфа со значительной примесью вахты и хвоща. Ниже 20 см залежь состоит из низин-

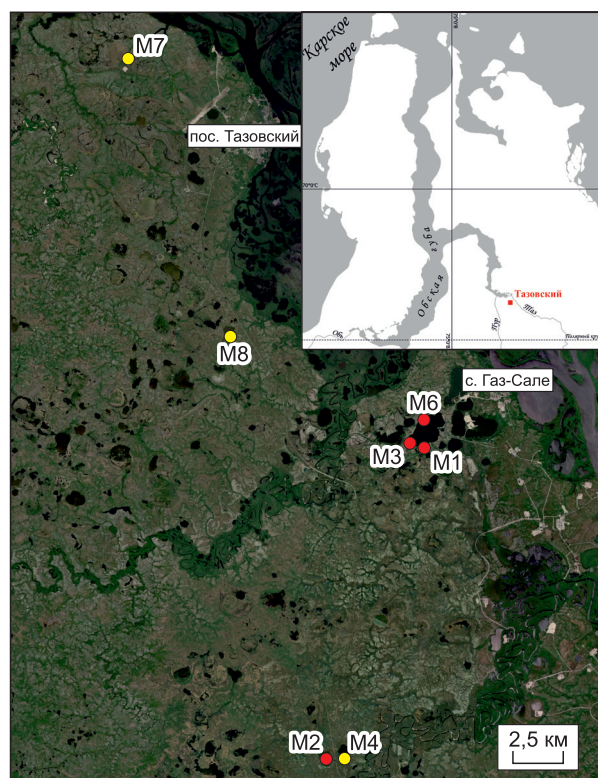


Рис. 1. Расположение участков исследования. Точками показано местоположение мониторинговых площадок. Красным цветом обозначены площадки, рассматриваемые в статье

Fig. 1. Location of research sites. The points indicate the locations of the grids. The sites referenced in this article are highlighted in red

ных преимущественно осоково-гипновых, гипновых, травяных и хвощевых торфов средней и хорошей степени разложения. Древесные торфа в торфяной залежи полигонов встречаются редко, несмотря на то что отдельные крупные остатки древесной растительности иногда обнаруживаются в нижней части залежи [6].

На Пур-Тазовском междуречье на мониторинговых площадках, расположенных в хасыряях с полигональными торфяниками, в период с 2016 по 2023 г. глубина протаивания варьировалась от 0,51 до 0,59 м на всех элементах рельефа. Здесь были характерны просадки торфа и частичное вытаивание подземных льдов [25]. Наименьшие значения температуры пород (от -3°C до $-3,3^{\circ}\text{C}$) зафиксированы в скважинах, заложенных в торфяниках. Самые высокие значения наблюдаются в скважине, заложенной в толще песчано-супесчаных пород, — от -1 до $-1,2^{\circ}\text{C}$.

С 2021 г. авторами организован мониторинг полигональных торфяников по берегам озер при-

уроченной к левобережью р. Таз части Пур-Тазовского междуречья от устья р. Таз на севере до долины р. Нуны-Яха на юге. В период 2021–2022 гг. заложено семь мониторинговых площадок (рис. 1). В данной статье приведены результаты мониторинга на четырех из них в связи с недостаточно длинным рядом наблюдений на трех других площадках.

Мониторинговые площадки располагаются на разных геоморфологических уровнях на полигональных торфяниках, приуроченных к хасыряям, сложенным с поверхности торфами разной мощности. Определено несколько климатических и ландшафтных факторов, оказывающих влияние на полигональные торфяники в зоне взаимодействия торфяник–озеро, которые могут быть охарактеризованы при проведении мониторинга: роза ветров, регулирующая волновую деятельность водной поверхности озера, распределение снежного покрова, мозаичность растительного покрова. Для установления характера влияния этих факторов на полигонально-жильные структуры торфяников в 2021–2023 гг. выполнены следующие инструментальные наблюдения:

- в конце холодного периода в апреле на части площадок проведено измерение высоты снежного покрова для определения его влияния на глубину сезонного протаивания;
- в конце каждого теплого периода (сентябрь) проводили съемку с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), измеряли глубину сезонного протаивания и проводили наземные наблюдения (описание разреза торфяника, ландшафтные и ботанические описания).

По результатам БПЛА-съемки в программе Agisoft Metashape были построены цифровые модели рельефа и ортофотопланы с пространственным разрешением 0,02–0,03 м, с помощью которых определены изменения береговой линии торфяников, а также пространственная неоднородность рельефа (контуры и площадь полигонов) и растительного покрова.

Мониторинговые площадки заложили на берегах озер, где отмечается активное таяние ПЖЛ. Самая южная площадка М2 размером 5×13 м находится в 30 км южнее пос. Тазовский (см. рис. 1), приурочена к IV озерно-аллювиальной равнине с абсолютными отметками 16–17 м [28]. В 5 км западнее с. Газ-Сале находятся три площадки (М1, М3, М6, см. рис. 1), приуроченные к III озерно-аллювиальной равнине с абсолютными отметками 7–8 м [28]. Размеры площадок

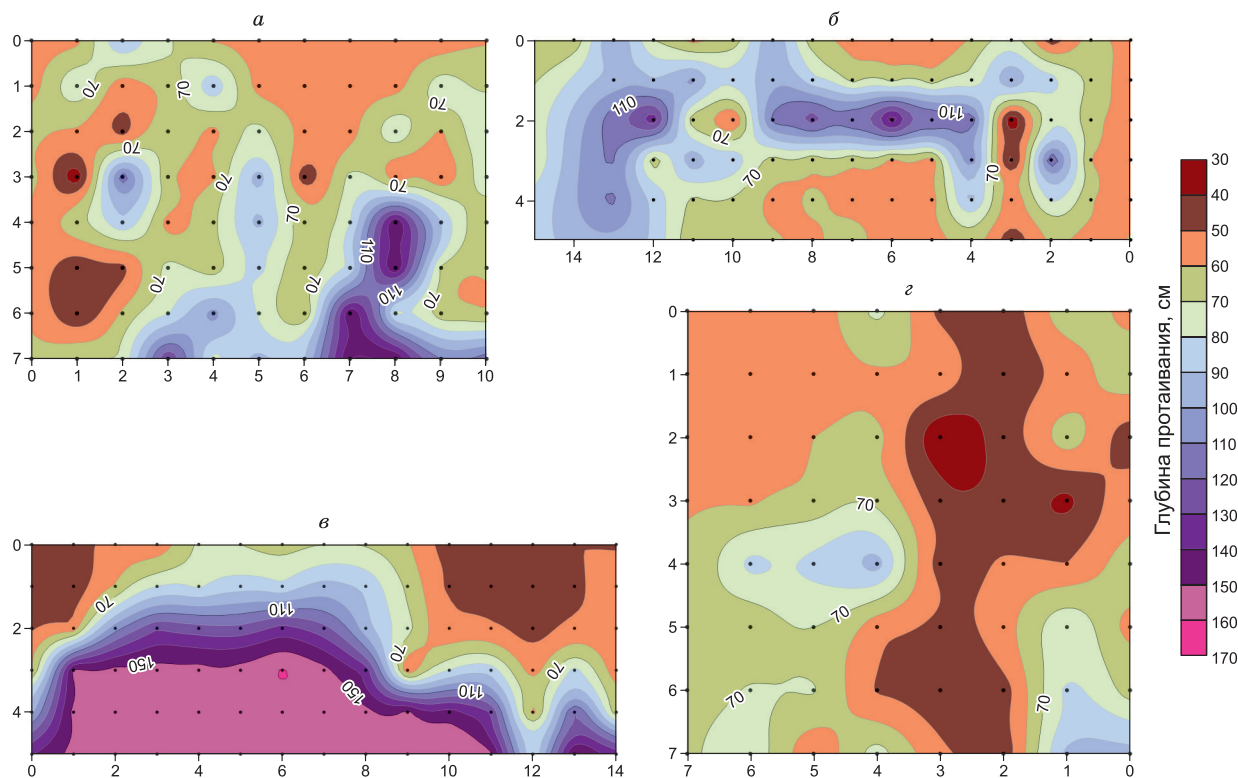


Рис. 2. Модели распределения глубины сезонного протаивания на площадках мониторинга М1 (а), М2 (б), М3 (в), М6 (з) по данным 2022 г.

Fig. 2. Models of seasonal thaw depth distribution at monitoring sites M1 (a), M2 (b), M3 (v), and M6 (z) based on data from 2022

10 × 7, 14 × 5 и 7 × 7 м соответственно. В растительном покрове полигонов преобладают багульник (*Ledum decumbens*) высотой до 0,3 м и морошка (*Rubus chamaemorus*), а также лишайники, встречаются гипновые мхи (*Hypnales* sp.), в межполигональных понижениях сосредоточены багульник (*Ledum decumbens*) высотой до 0,6 м и сфагновые мхи (*Sphagnum* sp.). Две площадки располагаются на южном (М1 и М3), одна площадка – на восточном (М2) и одна площадка – на северном берегу озера (М6). Все площадки заложены на полигональных торфяниках с разной (0,3–5,5 м) мощностью торфяных отложений.

Для пространственного сопоставления динамики глубины сезонного протаивания и изменения рельефа поверхности методом изолиний были построены модели глубины протаивания на всех площадках. На рис. 2 показаны такие модели за 2022 г.

Для построения модели по результатам полевого измерения глубины протаивания и толщины снежного покрова составлены таблицы по ка-

ждой площадке, включающие следующие данные: номер точки, координаты, глубина протаивания и высота снежного покрова за прошедшую зиму. В программе Surfer табличные данные преобразованы в двухмерную модель с точками и выделенными изолиниями по глубинам анализируемых параметров. Такая модель наглядно показывает пространственное распределение значений глубины протаивания на исследуемых площадках.

Результаты исследований

Волновое воздействие озера на торфяники. Анализ розы ветров, построенной по данным метеостанции Тазовский за теплый период (1–2 декада мая – 3 декада октября) 2021–2023 гг., показывает, что преобладающими являются ветра северо-западного фронта – 60 % дней в теплом периоде. Волновому воздействию подвержены восточные и южные берега озер, из-за чего глубина сезонного протаивания здесь увеличивается, а впоследствии происходят разрушение торфяника и отступление береговой линии.

Площадки М1, М3 и М6 располагаются на одном озере, но на разных его берегах. Отметка уреза воды в озере ежегодно находится на 2–3 м ниже уровня дневной поверхности берегов, поэтому волновое воздействие наблюдается только в нижней части берегового уступа, где происходит оттаивание многолетнемерзлых пород при увеличении глубины сезонного протаивания.

За три года наблюдений на площадке М1 глубина сезонного протаивания увеличилась на 37 %, а на площадке М3 – всего на 2 % (рис. 3, а, в). Такое различие связано с различиями в литологическом составе пород. Площадка М1 расположена на торфянике с мощностью торфяной залежи около 5,5 м, а площадка М3 – на торфянике с мощностью торфяной залежи около 0,3 м, подстилаемой мелко-/среднезернистыми песками (по данным изучения разреза в скважинах в пределах этих же торфяников). На площадке М6 наблюдения проводятся с 2022 г., но уже заметно что без сильного волнового воздействия глубина протаивания будет оставаться как минимум неизменной или будет незначительно уменьшаться (ветра южных румбов не являются преобладающими и составляют около 20 % в теплый период). На площадке М6 глубина сезонного протаивания уменьшилась на 27 см (на 6 %) по всей береговой линии площадки (рис. 3, г).

Площадка М2 находится на другом озере, мощность торфяной залежи составляет около 1–1,5 м, а отметка уреза воды в озере находится ниже уровня дневной поверхности всего лишь на 0,2–0,3 м, что делает условия этой площадки схожими с условиями площадки М1. Кроме того, волновое воздействие на береговой уступ усилено и проявляется вплоть до дневной поверхности и растительного покрова, в отличие от других анализируемых площадок. За три года наблюдений на площадке М2 произошло увеличение глубины сезонного протаивания на 55 % (рис. 3, б).

Таким образом, эрозия береговой линии приводит к увеличению температуры ММП и глубины сезонного протаивания в торфяных почвах, что ведет к разрушению полигонов и отступанию берегов. На площадке М1 за счет этого произошло отступление 3,77 м² площади, на М2 – 1,67, на М3 – 5,03, на М6 – 0,03 м² за 2021–2023 гг. Согласно данным изменения глубины протаивания, приведенным на рис. 3, для площадок, на которые происходит ежегодное влияние волновой деятельности озера, прослеживается тенденция к увеличению глубины протаивания и от-

ступанию берегов. На площадках, остающихся без сильного волнового воздействия озера, глубина протаивания уменьшается или не изменяется, а берега остаются более стабильными.

Пространственная дифференциация снежного покрова. Снежный покров играет одну из важнейших ролей в формировании глубины сезонного протаивания [29]. На рис. 4 представлены диаграммы изменений высоты снежного покрова (апрель) и глубины сезонного протаивания (сентябрь) на полигональной и межполигональной частях площадки за 2022 и 2023 гг. на примере площадок М1 и М2. Результаты показывают, что на полигональной части площадок наблюдается прямая зависимость между мощностью снежной толщи и последующей глубиной протаивания, и, соответственно, большие значения высоты снежного покрова соотносятся с высокими показателями глубины протаивания. Такие участки расположены на контакте полигона и межполигонального понижения, и высокие значения параметров снежного покрова и глубины протаивания связаны, скорее всего, с неравномерным накоплением и дальнейшим таянием снега. До того момента, пока понижение и краевая часть полигона в холодный период не покрыты снегом, происходит воздействие отрицательной температуры воздуха на породы сезонно-талого слоя (СТС), а как только снегом полностью заносит понижение и на краевой части полигона накапливается достаточное его количество, проявляется изолирующий эффект, так как атмосферный холод слабее проникает сквозь снежную толщу (см. рис. 4, а).

Анализ данных по межполигональным частям площадок показывает, что большие значения глубины протаивания характерны для межполигональных понижений с густым кустарничковым покровом, который способствует снегозадержанию на своих кронах, не давая снегу заполнить понижение полностью, из-за чего проявляется утепляющий эффект в зимний период, это подтверждает результаты других исследователей [29].

В теплый период после снеготаяния кустарнички поглощают солнечную радиацию, вследствие чего происходит повышение температуры ММП и увеличение глубины протаивания. Непосредственно в межполигональных понижениях малые значения глубины протаивания соответствуют участкам с большими значениями высоты снежного покрова. На таких участках снег полностью заполняет межполигональные

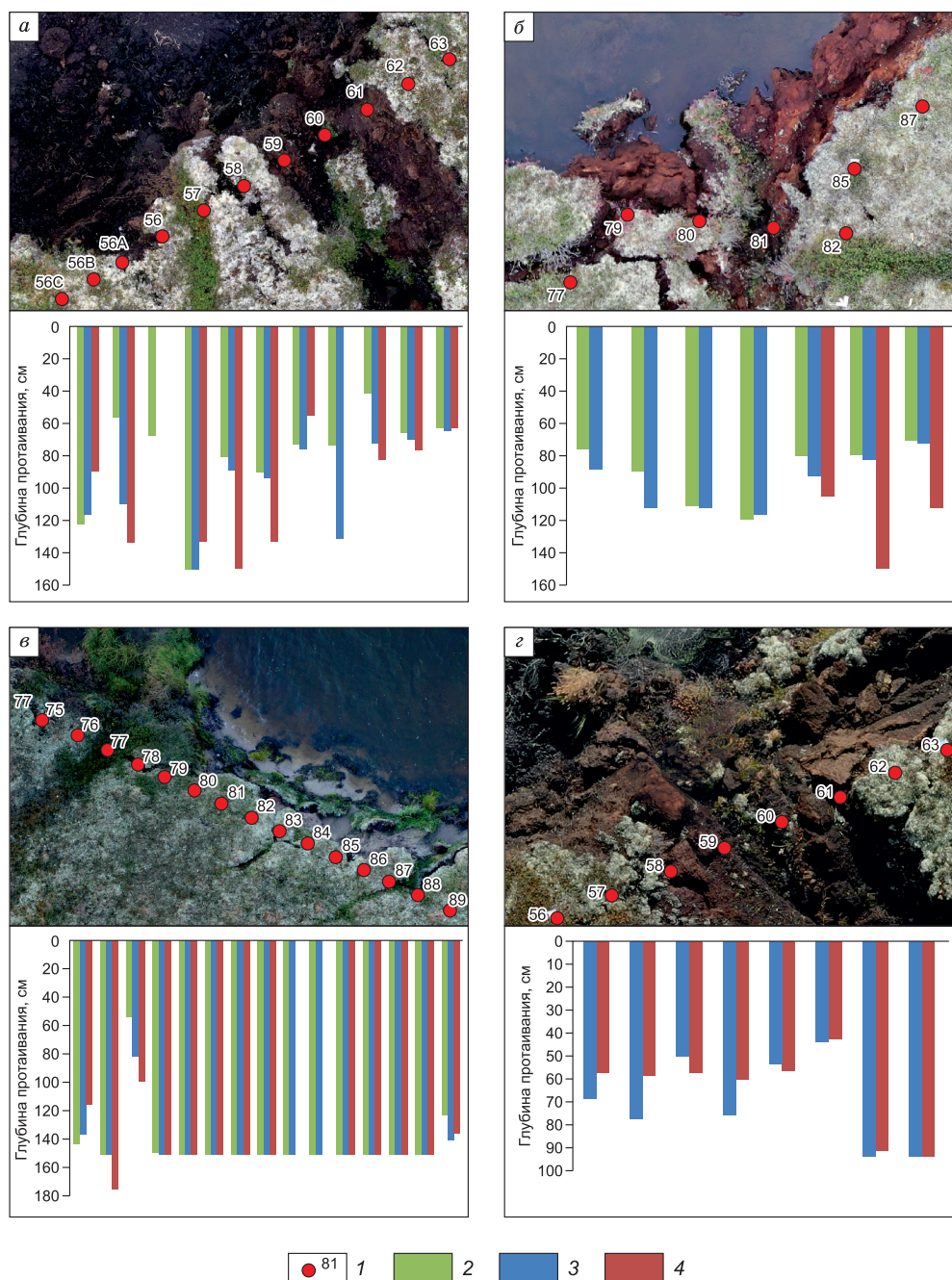


Рис. 3. Ортофотопланы и диаграммы изменения глубины протаивания в береговой части на площадках мониторинга М1 (а), М2 (б), М3 (в), М6 (г).

1 – точки измерения глубины сезонного протаивания и их индекс; глубина протаивания: 2 – в 2021, 3 – в 2022, 4 – в 2023 гг.

Fig. 3. Orthophotoplans and diagrams illustrating the changes in the seasonal thaw depth in the coastal part at monitoring sites M1 (a), M2 (б), M3 (в), and M6 (г).

Symbols: 1 – measuring points for the seasonal thaw depth and their corresponding index; thaw depth: 2 – in 2021, 3 – in 2022, 4 – in 2023

понижения. В холодный период мощная снежная толща является теплоизолятором и не позволяет СТС промерзнуть сверху. С другой стороны, во время снеготаяния в теплый период мощная

снежная толща протаивает медленнее, чем на полигональной части торфяника, что в свою очередь оказывает изолирующее влияние от потока солнечной радиации (рис. 4, б).

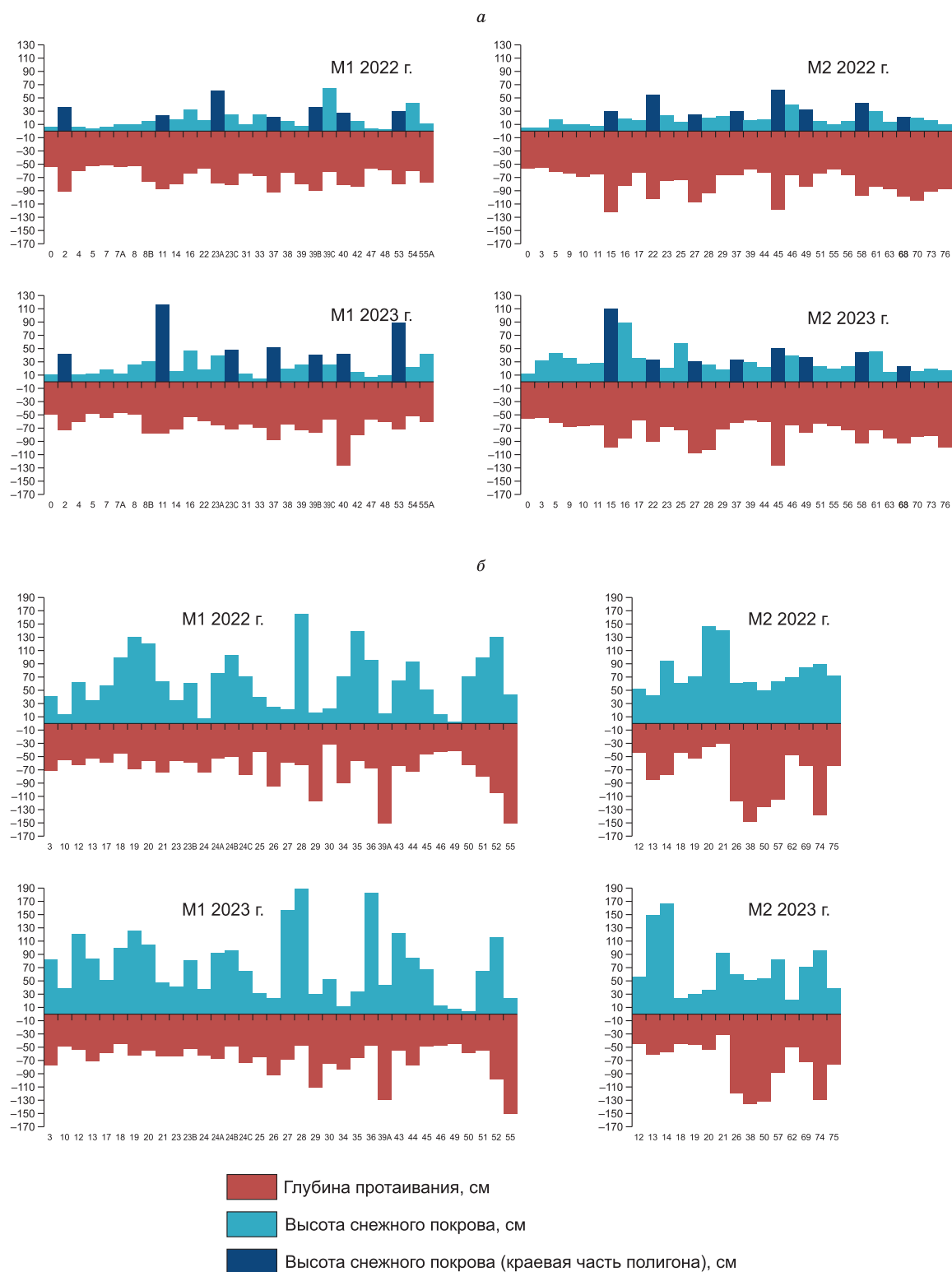


Рис. 4. Диаграммы изменения высоты снежного и глубины протаивания на площадках мониторинга М1 и М2 в 2022 и 2023 гг. *а* – полигональная часть; *б* – межполигональные понижения.

Fig. 4. Diagrams illustrating the changes in snow cover thickness and the seasonal thaw depth at monitoring sites M1 and M2 for the years 2022 and 2023. *a* – polygonal area, *b* – inter-polygonal depression

Таким образом, глубина протаивания на полигонах прямо пропорциональна высоте снежного покрова и имеет неоднозначную зависимость в межполигональных понижениях, различающихся характером растительного покрова.

Характер растительного покрова. Для оценки влияния растительного покрова использованы ортофотопланы, построенные по результатам БПЛА-съемки с учетом наземных наблюдений и описаний. Разные типы растительности, их проективное покрытие и видовое обилие на площадке оказывают как обогревающий, так и охлаждающий эффект [29].

Глубина протаивания на участках с развитым кустарничковым ярусом больше, чем на участках с преимущественно лишайниковым покровом, как на площадках М1–М3, поскольку кустарнички обеспечивают снегозадержание в холодный период и поглощают большое количество солнечной радиации в теплый период, в результате чего способствуют более глубокому сезонному протаиванию ММП. На площадке М6 глубина протаивания на участках с преимущественно мохово-лишайниковым покровом больше, чем на участках с преобладанием кустарничков. Это связано с уменьшением проективного покрытия мохово-лишайникового покрова и суммарной фитомассы, вследствие чего уменьшается теплоизолированность ММП, что ведет к увеличению их температуры и глубины сезонного протаивания [29].

Обсуждение результатов

Как показали предыдущие исследования на севере Пур-Тазовского междуречья [14, 23; и некоторые другие работы] полигонально-жильные структуры могут деградировать в результате: 1) вытаивания ПЖЛ и 2) разрушения окружающих полигонов.

В работе [23] описано разрушение полигонов и вытаивание ПЖЛ на полигональном торфянике, где в понижениях находится вода. Изменения на торфянике происходят из-за перераспределения поверхностного стока и смен режимов затопления и дренирования канав. Поэтому на торфянике происходят разрушение полигонов, блокирование стока и развитие термокарста. Также из-за значительного количества атмосферных осадков начинает преобладать проточный режим в понижениях, из-за чего происходят активизация термоэрозии, увеличение глубины и площади межполигональных понижений.

В случае деградации полигонально-жильных структур по берегам озер наиболее существен-

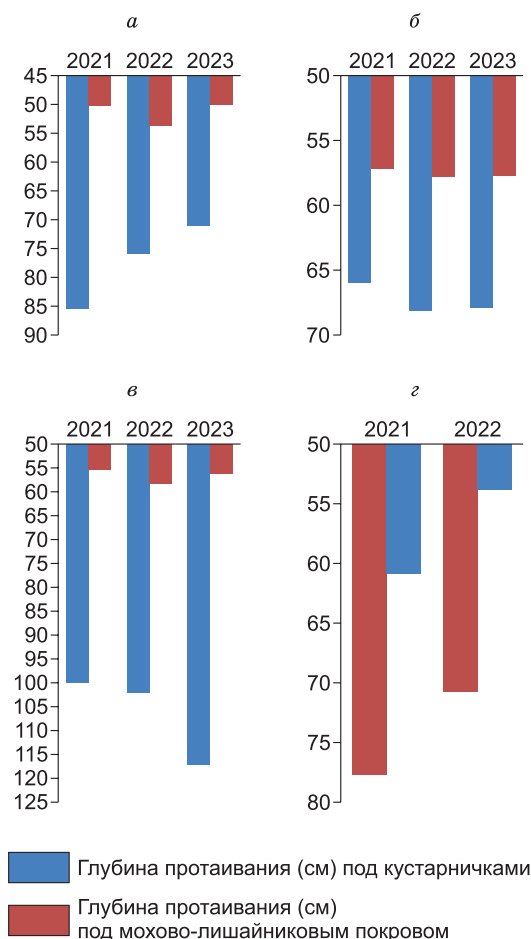


Рис. 5. Диаграммы изменения глубины протаивания под разными типами растительного покрова на площадках мониторинга М1 (а), М2 (б), М3 (в), М6 (г)

Fig. 5. Diagrams illustrating the changes in the seasonal thaw depth under different types of vegetation cover at monitoring sites M1 (a), M2 (б), M3 (в), and M6 (г).

ным фактором является волновое воздействие озерной воды. На мониторинговых площадках М1 и М2 общая потеря площади полигональной части торфяников за период наблюдений составила 7,68 м² (10 %) и 4,34 м² (6,6 %), за счет отступления берега – 3,77 м² и 1,67 м² соответственно. На площадке М6 происходят затухание процессов и стабилизация, наблюдения здесь показывают, что потеря площади полигонов составляет всего 0,04 м² (менее 1 %), за счет отступления берега – 0,03 м². На площадке М3 криогенные процессы более активны, чем на других, по-видимому, из-за незначительной мощности (0,3 м) торфяной залежи торфяника, на которой расположена эта площадка. Большие значения глубины протаивания от 110 до 160 см наблюдаются повсеместно как в центральной части, так

и вблизи береговой линии. Уменьшение полигональной части произошло на 6 м^2 (10 %), за счет отступления берега – $5,03 \text{ м}^2$.

Активизацию криогенных процессов в последнее время связывают с повышением среднегодовой температуры воздуха, ростом продолжительности теплого периода и суммы положительных температур, ведущими к деградации ПЖЛ и полигонального рельефа в целом [23]. Наблюдения авторов показали, что наибольшее развитие термоабразионных и термоэрозионных процессов после 2020 г. происходит на восточном и южных берегах озер, на которые активно оказывается волновое воздействие озерной воды. Кроме того, на этих же площадках глубина сезонного протаивания под кустарничками на 15–30 % больше, чем под преимущественно лишайниковым покровом. При этом средняя глубина протаивания на площадках, расположенных на торфяниках с более мощной торфяной залежью на южном и восточном берегах, уменьшилась на 2–5 % в связи с потерей части наиболее близко расположенных к берегу точек измерения за счет отступления берега, а на площадке на маломощном торфянике средняя глубина протаивания, наоборот, увеличилась на 6 %. На площадке, расположенной на северном берегу, развития каких-либо экзогенных процессов за время мониторинга не наблюдалось, глубина протаивания под кустарничками меньше, чем под преимущественно лишайниковым покровом. Средняя глубина протаивания на этой площадке не изменилась.

Заключение

В настоящее время мониторинг развития полигональных торфяников в зоне взаимодействия торфяник–озеро на севере Пур-Тазовского междуречья имеет довольно короткий ряд наблюдений. Однако, по мнению авторов, этих данных достаточно для предварительной оценки динамики развития полигонально-жильных структур на берегах озер.

На фоне современных климатических изменений волновое воздействие озерной воды, напрямую зависящее от розы ветров района исследований, является основным фактором активизации термоэрозионных и термоабразионных процессов, в свою очередь являющихся причиной деградации полигонального рельефа по берегам озер.

Влияние характера распределения снежного и растительного покровов определяется как ландшафтно-геоморфологическими условиями, в которых располагаются площадки наблюдений,

так и изменениями этих условий внутри каждой площадки. На полигонах глубина сезонного протаивания напрямую соотносится с высотой снежного покрова и зависит от типа и проективного покрытия растительного покрова, а в межполигональных понижениях с разным растительным покровом зависимость неоднозначна и определяется характером распределения снега в разных частях понижений.

Список литературы / References

1. Городков Б.К. Крупнобугристые торфяники и их географическое распространение. *Природа*. 1928;(6): 22–26.
2. Gorodkov B.K. Hilly peatlands and their geographical distribution. *Priroda*. 1928;(6):22–26. (In Russ.)
3. Кузнецова Т.П. Подземные льды молодых прибрежно-морских террас Тазовского полуострова. *Проблемы криолитологии*. 1969;(1):44–49.
4. Kuznetsova T.P. Underground ice of young coastal-marine terraces of the Taz Peninsula. *Problemy kriolitologii = Problems of cryolithology*. 1969;(1):44–49. (In Russ.)
5. Шполянская Н.А., Евсеев В.П. Выпуклобугристые торфяники северной тайги Западной Сибири. *Природные условия Западной Сибири*. 1972(1):134–146.
6. Shpolyanskaya N.A., Evseev V.P. Hilly peatlands of the northern taiga of Western Siberia. *Prirodnye usloviya Zapadnoy Sibiri*. 1972(1):134–146. (In Russ.)
7. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Мощные полигональные торфяники в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири. *Криосфера Земли*. 2016;20(4):3–15. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4(3-15)).
8. Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. Thick polygonal peatlands in continuous permafrost zone of West Siberia. *Earth's Cryosphere*. 2016;20(4):3–15. (In Russ.) [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-4(3-15)).
9. Фотиев С.М. Арктические торфяники Ямало-Гыданской провинции Западной Сибири. *Криосфера Земли*. 2017;21(5):3–15. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-5\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-5(3-15)).
10. Fotiev S.M. Arctic peatlands of the Yamal-Gydan province of Western Siberia. *Earth's Cryosphere*. 2017; 21(5):3–15. (In Russ.) [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-5\(3-15\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-5(3-15)).
11. Кашперюк П.И. Типы и инженерно-геологические особенности многолетнемерзлых торфяных массивов севера Западно-Сибирской плиты: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.; 1985. 291 с.
12. Kashperyuk P.I. Types and engineering-geological features of permafrost peat massifs of the north of the West Siberian plate: Diss. ... Cand. Sci, Moscow; 1985. 291 p. (In Russ.)
13. Тыртиков А.П. Динамика растительного покрова и развитие мерзлотных форм рельефа. М.: Наука; 1979. 116 с.

Tyrtikov A.P. *Dynamics of vegetation cover and development of permafrost forms of relief*. Moscow: Nauka; 1979. 116 p. (In Russ.)

8. Мельников Е.С., Васильев А.А., Лейбман М.О., Москаленко Н.Г. Динамика сезонноталого слоя в Западной Сибири. *Криосфера Земли*. 2005;9(2):23–32.

Melnikov E.S., Vasiliev A.A., Leibman M.O., Moskalenko N.G. Active-layer dynamics in West Siberia. *Earth's Cryosphere*. 2005;9(2):23–32. (In Russ.)

9. Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G., et al. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2010;21(2):136–155.

10. Васильев А.А., Облогов Г.Е., Широков Р.С. Долговременный мониторинг глубины сезонного протаивания пород в типичных тундрах Западного Ямала. *Криосфера Земли*. 2023;27(4):3–13. <https://doi.org/10.15372/KZ20230401>.

Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Shirokov R.S. Long-term monitoring of the depth of seasonal rock thawing in typical tundras of Western Yamal. *Earth's Cryosphere*. 2023;27(4):3–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/KZ20230401>.

11. Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., et al. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature Geoscience*. 2016;9(4):312–318. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo2674>

12. Kanevskiy M., Shur Y., Jorgenson T., et al. Degradation and stabilization of ice wedges: Implications for assessing risk of thermokarst in northern Alaska. *Geomorphology*. 2017;(297):20–42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.001>

13. Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., et al. 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;44(4):283–290. <http://dx.doi.org/10.3103/S1068373919040083>

14. Хомутов А.В., Бабкин Е.М., Тихонравова Я.В. и др. Комплексные исследования криолитозоны северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья. *Научный вестник Ямало-Ненецкого АО*. 2019;1(102):53–64. <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2019.102.1.008>.

Khomutov A.V., Babkin E.M., Tikhonravova Y.V., et al. Complex studies of the cryolithozone of the north-eastern part of the Pur-Taz interfluvium. *Nauchny vestnik Yamalo-Nenetskogo AO = Scientific bulletin of the Yamal-Nenets autonomous district*. 2019;1(102):53–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2019.102.1.008>

15. Бронзов А.Я. Верховые болота Нарымского края (бассейн р. Васюган). *Труды Научно-исследовательского торфяного института*. 1930;(3):100.

Bronzov A.Ya. Upland swamps of the Narym region (basin of the Vasyugan river). *Trudy Nauchnogo issledovatel'skogo torfyanogo instituta*. 1930;(3):100. (In Russ.)

16. Кац Н.Я. О типах болот Западно-Сибирской низменности и их географической зональности. *Торфяное дело*. 1929;(3):3–14.

Katz N.Ya. Types of swamps of the West Siberian lowland and their geographical zonation. *Torfyanoe delo*. 1929;(3):3–14. (In Russ.)

17. Нейштадт М.И. Торфяные запасы Азиатской части СССР. *Труды ЦТОС*. 1938;(4):5–10.

Neishtadt M.I. Peat reserves of the Asian part of the USSR. *Trudy TSTOS*. 1938;(4):5–10. (In Russ.)

18. Smith L.C., Sheng Y., Macdonald G.M., Hinzman L.D. Disappearing Arctic Lakes. *Science*. 2005;308(3):14. <https://doi.org/10.1126/science.1108142>.

19. Кирпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. Динамика площадей термокарстовых озер в сплошной и прерывистой криолитозонах Западной Сибири в условиях глобального потепления. *Вестник ТГУ*. 2008;(311):185–189.

Kirpotin S.N., Polishchuk Yu.M., Bryksina N.A. Dynamics of the areas of thermokarst lakes in continuous and intermittent cryolithozones of Western Siberia under global warming conditions. *Vestnik of TGU*. 2008;(311):185–189. (In Russ.)

20. Санников Г.С. Картометрические исследования термокарстовых озер на территории Бованенковского месторождения, полуостров Ямал. *Криосфера Земли*. 2012;16(2):30–37.

Sannikov G.S. Cartometric researches of thermokarst lakes within the Bovanenkovo gas field territory, Yamal peninsula. *Earth's Cryosphere*. 2012;16(2):30–37. (In Russ.)

21. Родионова Т.В. Исследование динамики термокарстовых озер в различных районах криолитозоны России по космическим снимкам: Дис. ... канд. геогр. наук. М.; 2013. 196 с.

Rodionova T.V. Investigation of the dynamics of thermokarst lakes in various regions of the cryolithozone of Russia based on satellite images: Diss. ... Cand. Sci. M.; 2013. 196 p. (In Russ.)

22. Капралова В.Н. Закономерности развития термокарстовых процессов в пределах озерно-термокарстовых равнин (на основе подходов математической морфологии ландшафта): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.; 2014. 109 с.

Kapralova V.N. Patterns of thermokarst processes development within lake-thermokarst plains (based on approaches of mathematical morphology of landscape): Diss. ... Cand. Sci. M.; 2014. 109 p. (In Russ.)

23. Бабкин Е.М., Бабкина Е.А., Лейбман М.О. и др. Мониторинг изменений полигональных торфяников, примыкающих к автодороге Заполярное – Тазовский. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022;68(4):384–405. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-384-405>.

Babkin E.M., Babkina E.A., Leibman M.O., et al. Monitoring of the relief changes in polygonal peat plateaus adjacent to the highway Zapolyarnoe — Tazovsky. *Arctic and Antarctic research*. 2022;68(4):384–405. (In Russ.) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-384-405>.

24. Бабкин Е.М., Хомутов А.В., Дворников Ю.А. и др. Изменение торфяника с вытравившим полигонально-жильным льдом в северной части Пур-Тазов-

ского междуречья. *Проблемы региональной экологии*. 2018;(4):115–119. <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14115>.

Babkin E.M., Khomutov A.V., Dvornikov Yu.A., et al. Relief changes of the peat plateau with melting of polygonal-wedge ice in the northern part of the pur-taz interfluv. *Regional environmental issues*. 2018;(4):115–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.24411/1728-323X-2018-14115>.

25. Королева Е.С., Слагода Е.А., Мельников В.П. и др. Идентификационные признаки переходного и промежуточного слоев в полигональных торфяниках севера Западной Сибири. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2021;498(2):131–137. <https://doi.org/10.31857/S2686739721060098>.

Koroleva E.S., Slogoda E.A., Melnikov V.P., et al. Identification features of the transition and intermediate layers in polygonal peatlands of the north of West Siberia. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk. Nauki o Zemle*. = *Doklady Earth Sciences*. 2021;498(2):131–137. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2686739721060098>.

26. Архив погоды в Тазовском. Расписание погоды rp5.ru. Режим доступа: http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Тазовском (дата обращения: 2023 г.).

Weather archive in Tazovsky. Weather schedule rp5.ru. Available at: http://rp5.ru/Weather_archive_Tazovsky (accessed: 2023). (In Russ.)

27. Ершов Э.Д. *Геокриология СССР*. М.: Недра; 1989. 454 с.

Ershov E.D. *Geocryology of the USSR*. Moscow: Nedra; 1989. 454 p. (In Russ.)

28. Карта «Природных комплексов севера Западной Сибири». М.: Госгеодезия СССР; 1991

Map of the “Natural complexes of the Northern Western Siberia”. Moscow: Gosgeodeziya USSR; 1991. (In Russ.)

29. Анисимов О.А., Шерстюков А.Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России. *Криосфера Земли*. 2016;20(2):90–99.

Anisimov O.A., Sherstiukov A.B. Evaluating the effect of climatic and environmental factors on permafrost in Russia. *Earth's Cryosphere*. 2016;20(2):90–99. (In Russ.)

Об авторах

ДАНЬКО Михаил Михайлович, младший научный сотрудник, Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-3178-1535>, ResearcherID: LXU-5022-2024, Scopus Author ID: 57225089658, SPIN: 8075-6933, e-mail: mdanko1996@mail.ru

ХОМУТОВ Артем Валерьевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8855-3483>, ResearcherID: M-6490-2017, Scopus Author ID: 35975192500, SPIN: 1152-4030, e-mail: artcryo@yandex.ru

Вклад авторов

Данько М.М. – разработка концепции, методология, проведение исследования, проведение статистического анализа, администрирование данных, создание черновика рукописи, визуализация; **Хомутов А.В.** – разработка концепции, методология, ресурсное обеспечение исследования, редактирование рукописи, руководство исследованием

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

DANKO, Michael Mikhailovich, Junior Researcher, Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3178-1535>, ResearcherID: LXU-5022-2024, Scopus Author ID: 57225089658, SPIN: 8075-6933, e-mail: mdanko1996@mail.ru

KHOMUTOV, Artem Valerevich, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Leading Researcher, Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8855-3483>, ResearcherID: M-6490-2017, Scopus Author ID: 35975192500, SPIN: 1152-4030, e-mail: artcryo@yandex.ru

Authors' contribution

Danko M.M. – conceptualization, methodology, investigation, formal analysis, data curation, writing – original draft, visualization; **Khomutov A.V.** – conceptualization, methodology, resources, writing – review & editing, supervision

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 29.01.2025

Поступила после рецензирования / Revised 25.02.2025

Принята к публикации / Accepted 27.02.2025