

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-384-405>
УДК 551.345+435.522:551.583.13:528



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

Мониторинг изменений рельефа полигональных торфяников, примыкающих к автодороге Заполярное — Тазовский

Е.М. Бабкин^{1*}, Е.А. Бабкина¹, М.О. Лейбман^{1,2}, Р.Р. Хайруллин¹,
А.В. Хомутов^{1,2}

¹ — Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Россия

² — Тюменский государственный университет,
Институт экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО), г. Тюмень, Россия

*zmbabkin@gmail.com

Резюме

Вытаивание полигонально-жильных льдов (ПЖЛ) определяет динамику рельефа полигональных торфяников. Массивы полигональных торфяников Пур-Тазовского междуречья составляют в среднем 6,5 % от общей площади. Целью исследования является установление краткосрочных темпов и направленности изменения рельефа торфяников под совместным действием техногенных и естественных факторов, основанное на мониторинге за период 2005–2022 гг. По спутниковым снимкам и ортофотопланам описаны морфологические элементы торфяника и определены их площади за разные годы. Исследования проведены на торфянике, непосредственно прилегающем к автодороге, покрытой бетонными плитами (Т1), и на фоновом торфянике на удалении примерно в 1,5 км от дороги (Т2). Для выявления естественных причин изменения рельефа торфяников рассмотрено влияние базовых климатических характеристик. Установлено, что на участке к северо-западу от дороги наблюдается стабилизация полигонального торфяника Т1. На юго-восточном участке Т1 деградация после строительства дороги резко усилилась. Полигональные каналы расширились за счет деградации полигонов. На фоновом торфянике Т2 скорость разрушения поверхности несколько выше, чем на северо-западном участке Т1. Сопоставление основных показателей климата и скоростей деградации полигонального рельефа не дало явных зависимостей. Вероятно, большее значение имеет режим атмосферных осадков, перераспределение поверхностного стока и смена режимов затопления полигональных канав и их дренирования, определяемого ритмичным ходом деградации рельефа.

Ключевые слова: БПЛА-съемка, климатические параметры, полигоны, полигональные каналы, полигонально-жильные льды, спутниковые снимки, сток, термокарст, термоэрозия, техногенное воздействие.

Для цитирования: Бабкин Е.М., Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В. Мониторинг изменений рельефа полигональных торфяников, примыкающих к автодороге Заполярное — Тазовский // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 4. С. 384–405. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-384-405>.

Поступила 15.11.2022

После переработки 03.12.2022

Принята 05.12.2022

Monitoring of the relief changes in polygonal peat plateaus adjacent to the highway Zapolyarnoe — Tazovsky

Evgeny M. Babkin^{1}, Elena A. Babkina¹, Marina O. Leibman^{1,2},
Rustam R. Khayrullin¹, Artem V. Khomutov^{1,2}*

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

² — *University of Tyumen, Institute of Environmental and Agricultural Biology (X-BIO),
Tyumen, Russia*

**zmbabkin@gmail.com*

Summary

The thawing of polygonal ice wedges determines the dynamics of polygonal peatland relief. The polygonal peat plateaus in the Pur-Taz interfluvium account for an average of 6.5 % of the total area. The purpose of the proposed study is to establish the short-term rates and direction of change in the plateaus' relief under the combined action of technogenic and natural factors, using monitoring data for the period 2005–2022. Based on satellite images and orthophotoplans, elements of the peat plateaus have been outlined and their areas have been determined for different time slices. The studies were carried out on a peat plateau immediately adjacent to the highway (T1) and on a background peat plateau at a distance of about 1.5 km from the highway (T2). To identify the natural causes of changes in the relief of the peat plateaus, the influence of climatic parameters is considered. The rates of relief change in natural conditions and under the impact of the highway are also compared. It has been established that in the area to the north-west of the highway the relief of the T1 polygonal peat plateau has stabilized. In the south-east section of T1, degradation has sharply increased after the construction of the highway. Due to the degradation of the polygons, the polygonal troughs expanded. In the background peat plateau T2, the rate of relief degradation is somewhat higher than in the northwestern portion of T1. Comparison of the main climatic parameters and degradation rates of the polygonal relief did not show any clear correlations. Probably, of greater importance are the regime of atmospheric precipitation, the redistribution of surface runoff and recurrence of flooding and drainage of the polygonal troughs, determined by the rhythmic course of the relief degradation.

Keywords: climatic controls, ice wedges, polygons, polygonal troughs, runoff, satellite imagery, technogenic impact, thermoerosion, thermokarst, UAV survey.

For Citation: Babkin E.M., Babkina E.A., Leibman M.O., Khayrullin R.R., Khomutov A.V. Monitoring of the relief changes in polygonal peat plateaus adjacent to the highway Zapolyarnoe — Tazovsky. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (4): 384–405. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-384-405>.

Received 15.11.2022

Revised 03.12.2022

Accepted 05.12.2022

ВВЕДЕНИЕ

На южном пределе сплошного распространения многолетнемерзлых пород в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) распространены торфяники с развитым полигональным рельефом, который формируется системой полигонально-жильных льдов (ПЖЛ), достигающих мощности 5 м [1–7]. Существует несколько классификаций торфяников, в основном морфологических с выделением бугристых, плоских и валиковых [4, 8, 9]. Стадийность в развитии рельефа торфяников в связи с динамикой растительности рассматривает А.П. Тыртиков [4]. Н.Н. Романовский [10] оценивает влияние изменений температурного режима, состава и влажности пород в ходе климатических колебаний на чередование стадий развития полигонального микрорельефа. В этих работах рассматривается долгосрочная эволюция торфяников, сопряженная с их переходом

от валиковых к плоскобугристым и далее к выпукло-бугристым. Однако никто ранее не оценивал краткосрочные быстрые изменения рельефа торфяников, связанные с совместным действием техногенных и естественных факторов.

ПЖЛ в торфяниках формируются столетиями и тысячелетиями. Оттаивание же может происходить в течение десятилетий [11–13]. Деградации ПЖЛ способствует потепление, особенно увеличение температуры воздуха и количества осадков в летний период [11, 14, 15]. За счет этого происходит увеличение глубины многолетнего протаивания с достижением кровли ПЖЛ. Кроме того, увеличение глубины протаивания, повышение температуры пород, уменьшение влажности и последующее вытаивание ПЖЛ могут быть связаны с нарушениями почвенно-растительного покрова, обусловленными такими причинами, как пожары, проезд вездеходной техники, строительство и эксплуатация автодорог [8, 16–22]. Тем самым провоцируется активизация процессов термокарста и термоэрозии. В некоторых исследованиях отмечается, что деградации ПЖЛ связана главным образом с экстремальными значениями летней температуры воздуха и сумм зимних осадков, а не с постепенным потеплением климата [11, 23–25].

Несмотря на интерес к изучению торфяников, последнее время основное внимание уделяется изучению генезиса и свойств торфа [6, 26–28]. Публикаций же об особенностях развития торфяников в современных климатических и антропогенных условиях недостаточно [29, 30–32].

Деградации ПЖЛ определяет динамику рельефа полигональных торфяников. Исследование процессов деградации ПЖЛ и динамики полигонального рельефа включает измерения морфометрических характеристик микрорельефа и ПЖЛ, температурного режима и глубины протаивания, нивелирование поверхности, отбор проб почв, растительности и льда; дистанционные методы включают дешифрирование аэрофотоснимков разных лет [11, 25]. Особое внимание уделяется изучению гидрологического режима и его изменений в связи с деградацией ПЖЛ [29, 11, 33]. Для этого используются и полевые измерения (в том числе измерения морфометрических характеристик, глубины снежного покрова), и дистанционные методы и моделирование [29], а также анализ климатических данных [11, 33].

Летние температурные экстремумы последнего десятилетия (2012, 2016 и 2020 гг.) сказались на увеличении глубины сезонного протаивания и связанной с этим активизации криогенных процессов при таянии подземного льда [34, 29]. Когда к температурным колебаниям добавляется техногенное воздействие, криогенные процессы протекают еще интенсивнее [35, 36]. Массивы полигональных торфяников Пур-Тазовского междуречья выделены с помощью детального дешифрирования мозаики космических снимков [37]. На этой территории зафиксировано 2450 отдельных торфяных массивов, при этом их встречаемость возрастает от менее 1 на 100 км² вдоль южной границы зоны распространения полигональных торфяников до 225 на 100 км² в районе исследования, составляя в среднем 6,5 % от общей площади.

С 2016 г. авторы проводят комплексные геокриологические исследования в северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья [38, 39], в том числе включающие исследования изменений рельефа торфяников [40, 41].

Целью предлагаемого исследования является установление темпов и направленности изменения рельефа полигональных торфяников северной части Пур-Тазовского междуречья, связанного с вытаиванием ПЖЛ, под действием естественных климатических колебаний и техногенных воздействий.

РАЙОН РАБОТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рельеф района исследований — равнинный, поверхность характеризуется значительной заболоченностью [8, 42]. Территория представлена первой и второй надпойменными террасами с абсолютными высотами от 2–3 до 10–25 м [43]. Район исследований относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород [44, 45].

Для исследуемого района характерен суровый климат, средняя годовая температура воздуха по метеостанции Тазовский за период 1969–1989 гг. составляла $-9,3^{\circ}\text{C}$ [46], а за период 2001–2021 гг. она повысилась до $-6,8^{\circ}\text{C}$ [47]. Сумма атмосферных осадков, осредненная за период 1966–1990 г. составляла 355 мм, при этом большая их часть (200 мм) выпадала в теплый период [47]. За период 2001–2021 гг. средняя сумма осадков выросла до 560 мм, причем большая их часть приходится на зимний период (в среднем 320 мм) [47, 48]. Температура пород на глубине нулевых годовых амплитуд в регионе варьируется от 0°C до $-3...-6^{\circ}\text{C}$. Более высокая температура наблюдается в поймах рек и на I надпойменной террасе, более низкая — на II надпойменной террасе и в массивах торфяников [42, 46]. Для исследуемого района характерны полигональные торфяники, находящиеся в нисходящей стадии развития по Н.Н. Романовскому [10].

Исследования проведены на торфянике, непосредственно прилегающем к автодороге (деградирующем торфянике Т1), и на фоновом торфянике на удалении примерно в 1,5 км от дороги (стабильный торфяник Т2) (рис. 1). Рельеф исследуемых торфяников изучался с 2016 г. ежегодно в начале и конце летнего сезона наземными

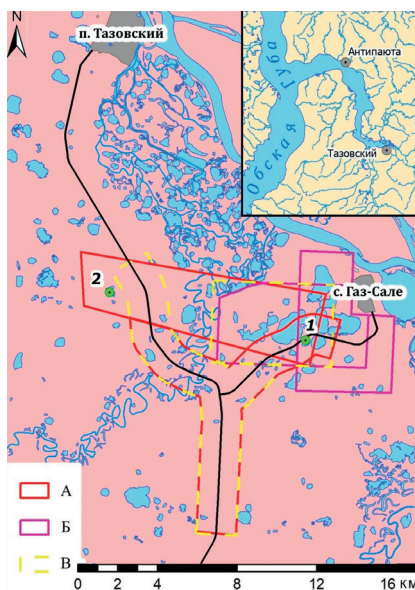


Рис. 1. Схема расположения участков исследования. Зелеными кружками показаны: 1 — торфяник, подверженный техногенному воздействию (Т1), 2 — торфяник в естественных условиях (Т2). Границы космических снимков: А — 2005 и 2016 гг., Б — 2012 г., В — 2017 г.

Fig. 1. Sketch-map of study sites. Green circles refer to: 1 — peat plateau under technogenic impact (T1); 2 — peat plateau in natural environments (T2). Limits of satellite images dated: А — 2005 and 2016; Б — 2012; В — 2017

Параметры используемых дистанционных материалов

Table 1

Parameters of distance materials used				
Тип	Число дней с положительной температурой воздуха между датами съемки	Оборудование-источник визуальных данных	Дата съемки	Пространственное разрешение, м
Космоснимок	—	Quickbird-2	02.09.2005	0,5
— " —	888	WorldView-2	01.07.2012	0,4
То же	543	"	15.07.2016	0,5
То же	132	WorldView-3	18.07.2017	— " —
Ортофотопланы	126	DJI FC300X	19.07.2018–20.07.2018	0,03
— " —	128	DJI Mavic Pro	30.06.2019–07.07.2019	0,02
То же	169	DJI Mavic Pro 2	06.07.2020–13.07.2020	— " —
То же	149	— " —	18.07.2021–24.07.2021	То же
То же	155	То же	21.07.2022–26.07.2022	То же

методами. В начале исследований проводилась тахеометрическая съемка, позднее замененная на БПЛА-съемку из-за усложнившегося рельефа. Также дешифрировались доступные космоснимки высокого пространственного разрешения (табл. 1). Покрытие космоснимками исследуемых участков не совпадает (см. рис. 1). Торфяник Т1 покрыт космической съемкой 2005, 2012, 2016 и 2017 гг. и БПЛА-съемкой 2018–2022 гг. только на юго-восточном сегменте торфяника Т1ю (см. табл. 1). Северо-восточный сегмент покрыт космосъемкой 2005, 2012 гг. и БПЛА-съемкой 2022 г. Для торфяника Т2 есть космоснимки 2005 и 2016 гг. и БПЛА-съемка 2022 г. (см. рис. 1, табл. 1).

Построены цифровые модели рельефа и ортофотопланы. С помощью ортофотопланов по индикационным признакам (фототону, типам растительности и влажности, линейности границ), а также с использованием превышений поверхности на основе детальных цифровых моделей рельефа оконтурены элементы торфяника — полигоны и полигональные канавы и определены площади и глубина расчленения для каждого элемента.

Для выявления естественных причин деградации торфяников обработаны данные метеостанций. Основные факторы — сумма положительных температур воздуха и количество атмосферных осадков — обрабатывались особым способом. Поскольку основной анализ изменений рельефа проводился за периоды между датами спутниковых и наземных съемок, то и климатические параметры суммировались за эти периоды между датами, приведенными в табл. 1. Для того чтобы сопоставлять темпы разрушения рельефа, полученные за разные промежутки времени (от нескольких месяцев до нескольких лет в зависимости от доступности дистанционных материалов), параметры нормировались относительно продолжительности теплого периода, заключенного между соседними датами съемки (см. табл. 1, вторая колонка).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полигональный торфяник Т1

Полигональный торфяник Т1 расположен на поверхности хасырея с абсолютными отметками 6–9 м. Поверхность торфяника ячеистая, разбита многочисленными пересекающимися морозобойными трещинами на прямоугольные, треугольные и многоугольные плоские полигоны, обрамленные полигональными канавами. Центральная часть полигонов часто на 0,2–0,3 м ниже периферийной, а их поверхность местами мелкобугорковатая, увлажненная. Торфяник пересекается насыпью автомобильной дороги высотой до 3 м, построенной в период 1994–1995 гг. и покрытой бетонными плитами. Фрагмент торфяника к северо-западу от дороги обозначен как Т1с, а к юго-востоку как Т1ю (рис. 2а).

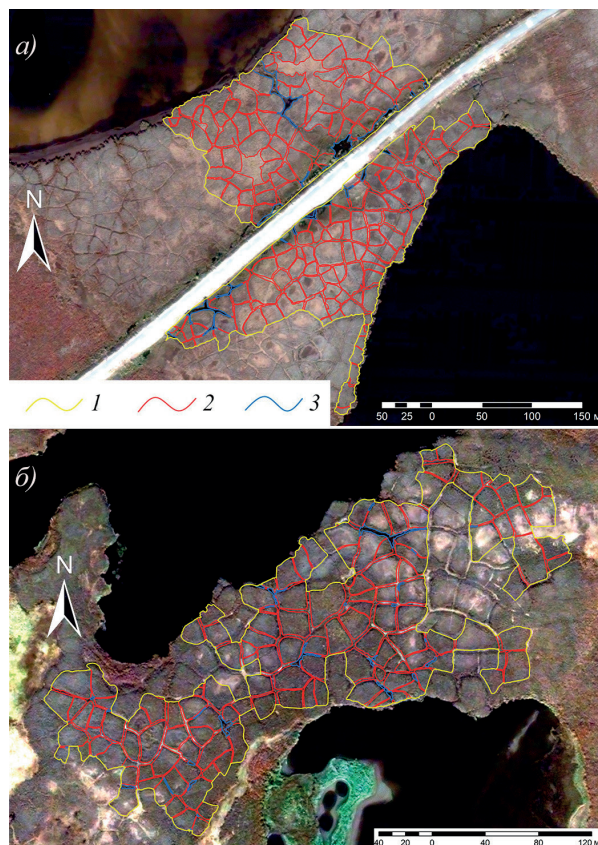


Рис. 2. Структура поверхности полигональных торфяников: а) Т1ю (участок к юго-востоку от автодороги) и Т1с (участок к северо-западу от автодороги); б) Т2 (оба на космоснимке 2005 г.); 1 — граница участка съемки и мониторинга, 2 — контуры полигонов и полигональных канав между ними, 3 — канавы без растительности, заполненные на дату съемки водой. Прямая белая полоса — насыпь автодороги

Fig. 2. Polygonal peat plateau surface structure: а) Т1ю (site south-east of the highway) and Т1с (site north-west of the highway); б) Т2 (both sites on a 2005 image); 1 — limits of the survey and monitoring site; 2 — outlines of the polygons and polygonal troughs in between; 3 — troughs without vegetation, flooded with water on the date of the survey. The straight white stripe is a highway.

В пределах торфяника выделяются:

- поверхность полигонов, относительно дренированная;
- сниженная поверхность полигонов, слабодренированная;
- полигональные каналы, увлажненные;
- переуглубленные, обводненные полигональные каналы, возникшие в результате вытаивания ПЖЛ.

Переуглубленные каналы, дно которых покрыто слаборазложившейся растительностью, частично бывают затоплены водой, в них обнаруживаются обвалившиеся фрагменты полигонов с остаточной растительностью, некоторые каналы достигают глубины 3 м и периодически дренируются через сток в смежное озеро.

Площадка мониторинга Т1ю. Для оценки темпов деградации ПЖЛ на участке торфяника Т1ю и следующего за этим изменения рельефа проанализирована динамика полигонов торфяника на основе наземной съемки 2016–2021 гг. и анализа космоснимков 2005, 2012 и 2016 гг. (см. табл. 1). Оценены темпы деградации ПЖЛ на участке торфяника Т1ю и изменений рельефа.

Со времени строительства автодороги (1994–1995 гг.) до 2005 г. (первого доступного космоснимка) произошло незначительное разрушение поверхности торфяника за счет вытаивания ПЖЛ, происходящего только у основания насыпи за счет скопления воды в сниженных участках, что и индицируется на снимке черным фототонном. Разрушения полигонов за пределами подножья насыпи на снимке 2005 г. не выявлено (см. рис. 2а).

На выделенной площади в 26958 м² (см. рис. 2а) по космоснимкам сверхвысокого пространственного разрешения и по снимкам с БПЛА вычислены площади каждого полигона и сумма площадей всех полигонов на каждую дату съемки. Затем из площади участка съемки вычтена суммарная площадь полигонов, что в результате дает площадь всех полигональных каналов. Отдельно картируются полигональные каналы, выделяющиеся на снимках очень темным цветом, что интерпретируется нами как отсутствие растительности, а следовательно, деградация с повышенной скоростью, и вычислена их площадь. Из суммарной площади каналов вычтена площадь деградирующих полигональных каналов, таким образом установлена площадь все еще стабильных каналов.

На рисунке 3а показана динамика площади полигонов и полигональных каналов, полученная сопоставлением значений измеренных площадей на космических снимках и ортофотопланах, составленных на основании БПЛА-съемки 2005–2022 гг. (см. табл. 1).

На рис. 3а видно, что суммарная площадь полигонов, как и площадь стабильных каналов, отражающих исходное состояние торфяника, убывают с большей скоростью до 2019 г., после чего их разрушение немного замедляется. При R^2 более 95 % можно достаточно достоверно оценить потерю площади в прошлом стабильного полигонального торфяника на некоторый период времени. За счет уменьшения площади полигонов и стабильных полигональных каналов расширяются и растут по площади деградирующие полигональные каналы, однако со скоростью, также убывающей после июля 2019 г. Площадь деградирующих полигональных каналов растет быстрее, чем суммарная площадь каналов, а значит, со временем стабильные каналы вовлекаются в процесс затопления, протаивания, размыва и осадки.

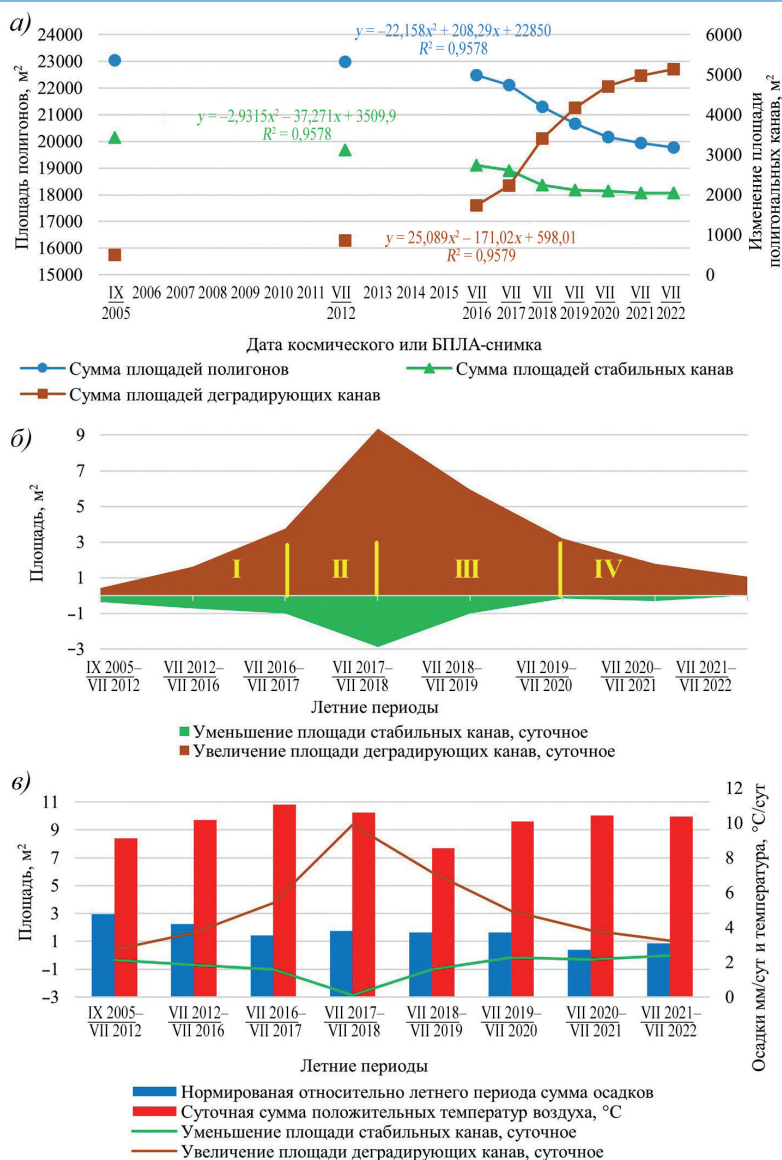


Рис. 3. Динамика разрушения полигонального торфяника Т1ю в 2005–2022 гг. по данным дистанционного зондирования: а) изменение площади полигонов и полигональных канав; б) изменение площади стабильных и деградирующих полигональных канав, в пересчете на 1 сутки летнего периода; в) связь изменения площади полигональных канав с климатическими характеристиками.
I–IV — этапы деградации рельефа торфяника

Fig. 3. Dynamics of polygonal peat plateau T1ю change in 2005–2022 estimated using remote-sensing data: а) changes in area of polygons and polygonal troughs; б) changes in area of stable and degrading polygonal troughs normalized with respect to 1 summer day; в) relation of polygonal trough area changes to climatic parameters.

I – IV — Stages of peat plateau degradation

Поскольку результаты получены за разные промежутки времени, то мы рассчитали продолжительность теплого периода между датами съемки, которая складывается из второй половины лета предыдущего года и первой половины лета следующего года от июля до июля (см. табл. 1), и привели результаты измерения площадей к суточным, разделив на продолжительность этого периода. Как следует из графиков (рис. 3б), площадь полигональных канав в целом увеличивается (площадь коричневой фигуры больше площади зеленой по абсолютной величине). Максимальный рост пришелся на лето 2017 г., после чего оба графика стали приближаться к нулю, значит, процесс затухает во времени. Однако деградирующие полигональные канавы за время наблюдений увеличиваются по площади намного быстрее, чем все канавы суммарно. На графике (см. рис. 3б) это выражается в том, что темпы увеличения площади стабильных канав уменьшаются почти до нуля уже к 2020 г., а площадь деградирующих канав, с уменьшением темпов изменения их площади, тем не менее постоянно растет. К 2022 г. площадь деградирующих канав увеличивается незначительно, а площадь стабильных канав практически не меняется, а значит, в этот период и сокращение площади полигонов незначительно и связано только с расширением деградирующих канав.

На графике (см. рис. 3б) отчетливо выделяются 4 этапа:

- постепенная деградация рельефа торфяника с небольшой скоростью до июля 2017 г. (I);
- резкое усиление темпов деградации с пиком к началу лета 2018 г. (II);
- резкое снижение темпов деградации к началу лета 2020 г. (III);
- постепенное затухание деградации к лету 2022 г. (IV).

Сопоставление скоростей роста площади полигональных канав с климатическими параметрами показало следующее. Экстремум роста площади канав, который выпал на лето 2017 г., не связан с суммами положительных температур и отчасти отражает минимум атмосферных осадков за период между измерениями (рис. 3в). Однако, возможно, пик 2017–2018 гг. является реакцией на волну потепления за несколько предыдущих лет с 2012 по 2017 г. Неопределенность связана отчасти с отсутствием более частых съемок, которые позволили бы определить темпы увеличения площади полигональных канав за каждый месяц или неделю и сопоставить их с соответствующими климатическими параметрами.

Площадка мониторинга Т1с. Для оценки совместного влияния естественных условий и насыпи рассмотрели участок Т1с, расположенный к северо-западу от автодороги и отличающийся визуально по темпам деградации рельефа (см. рис. 2а). Наличие и разрешение дистанционных материалов для этого участка позволили рассмотреть два временных отрезка: 09.2005–07.2012 и 07.2012–07.2022 гг. (рис. 4). Наблюдается тенденция, аналогичная той, что на участке Т1ю. Снижается площадь полигонов и стабильных канав при увеличении площади деградирующих канав, причем последнее — с более заметным градиентом (рис. 4а). За период 2005–2022 гг. площадь деградирующих канав на этом участке выросла в 2 раза (с 1142 до 2316 м²).

На рис. 4а видно, что суммарная площадь полигонов, как и площадь стабильных канав, отражающих исходное состояние торфяника, убывают практически линейно с очень низкой скоростью. Деградирующие полигональные канавы растут с малой скоростью. Поскольку площадь стабильных канав убывает явно быстрее, чем площадь полигонов, то можно считать полигоны практически стабильными, а происходит затопление и расширение стабильных прежде канав.

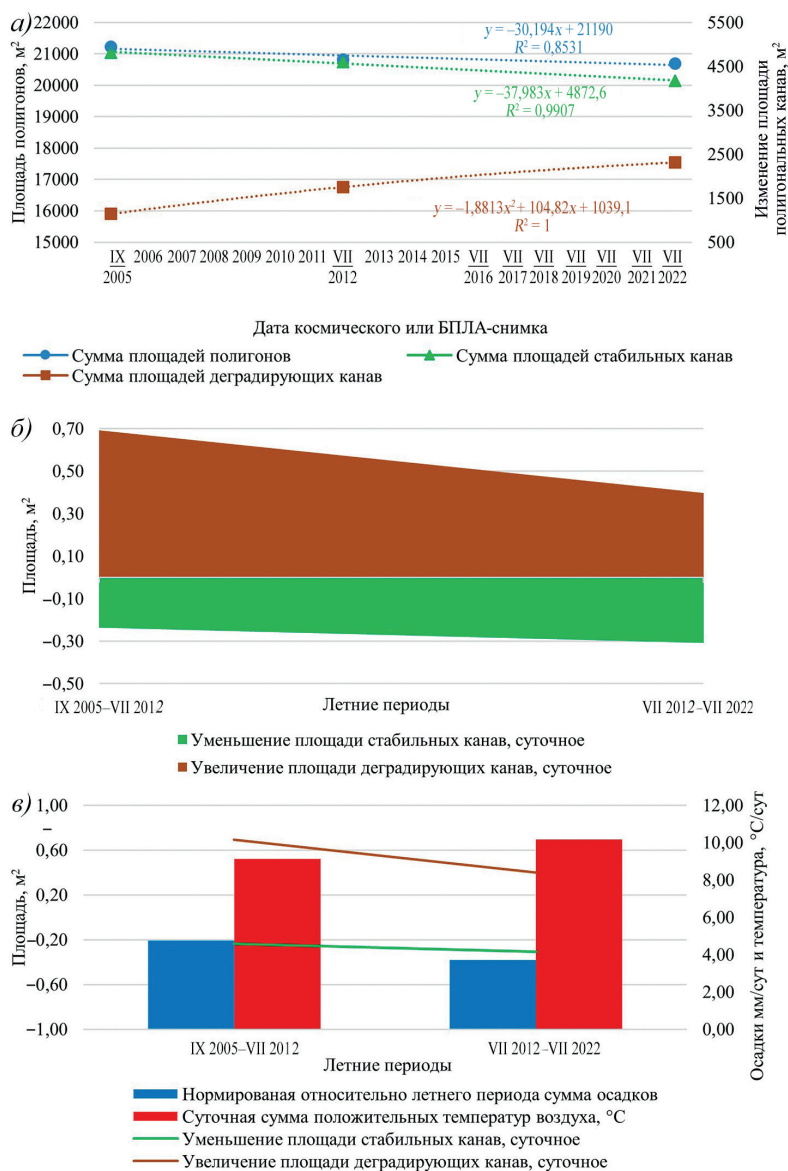


Рис. 4. Динамика разрушения полигонального торфяника T1c в 2005–2022 гг. по данным дистанционного зондирования: а) изменение площади полигонов и полигональных каналов; б) изменение площади стабильных и деградирующих полигональных каналов, в пересчете на 1 сутки летнего периода; в) связь изменения площади полигональных каналов с климатическими характеристиками

Fig. 4. Dynamics of the polygonal peat plateau T1c change in 2005–2022 estimated using remote-sensing data: а) changes in area of polygons and polygonal troughs; б) changes in area of stable and degrading polygonal troughs with respect to 1 summer day; в) relation of polygonal trough area changes to climatic parameters

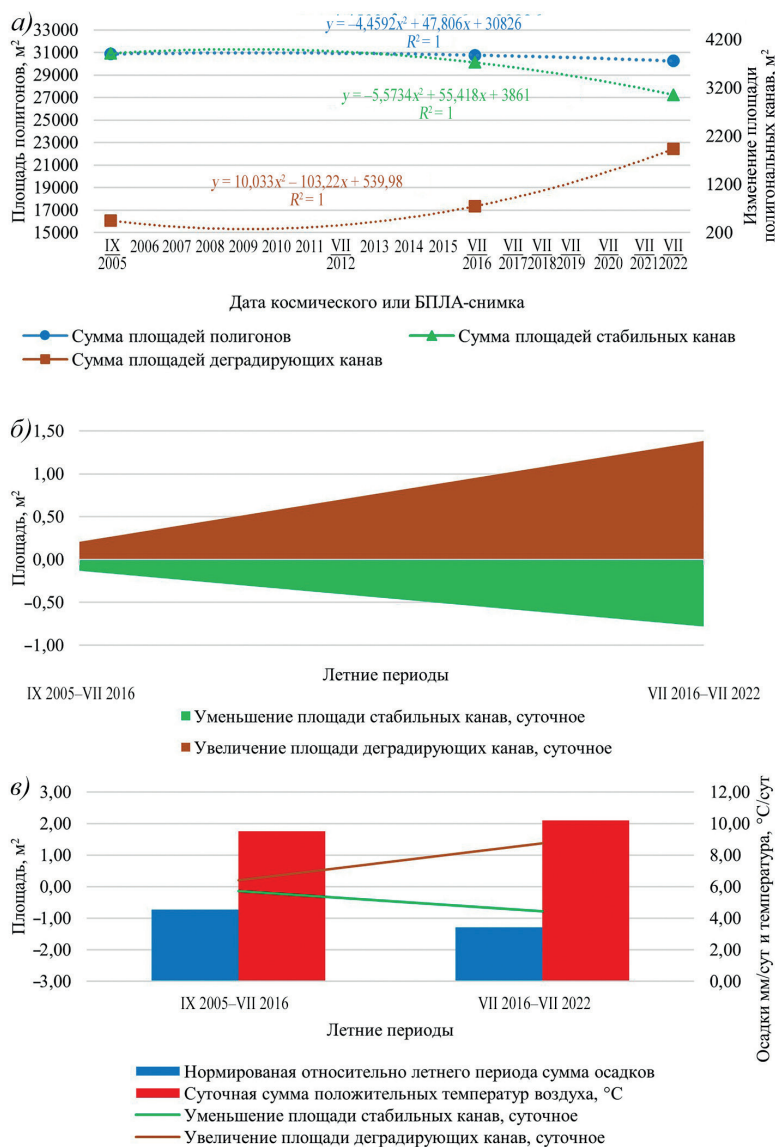


Рис. 5. Динамика разрушения полигонального торфяника T2 в 2005–2022 гг. по данным дистанционного зондирования: а) изменение площади полигонов и полигональных каналов; б) изменение площади стабильных и деградирующих полигональных каналов, в пересчете на 1 сутки летнего периода; в) связь изменения площади полигональных каналов с климатическими характеристиками

Fig. 5. Dynamics of the polygonal peat plateau T2 change in 2005–2022 estimated using remote-sensing data: а) changes in area of polygons and polygonal troughs; б) changes in area of stable and degrading polygonal troughs normalized with respect to 1 summer day; в) relation of polygonal trough area changes to climatic parameters

Графики (рис. 4б) построены аналогично приведенным на рис. 3б. Площадь полигональных канав в целом увеличивается (площадь коричневой фигуры больше площади зеленой по абсолютной величине). При этом прирост площади деградирующих полигональных канав за время наблюдений убывает, а площади стабильных канав снижаются, но с меньшим градиентом.

Сопоставление изменения площади полигональных канав с климатическими параметрами показано на рис. 4в. Последняя декада характеризуется более высокой суммой летних температур и меньшей суммой атмосферных осадков. Однако темпы прироста площади деградирующих полигональных канав снижаются, как и темпы снижения площади стабильных канав, что в некоторой степени соответствует тренду суммы атмосферных осадков, а не летнего тепла.

Полигональный торфяник Т2

Для оценки влияния автодороги на темпы деградации прилегающего торфяника результаты мониторинга деградирующего торфяника Т1 сопоставлены с результатами, полученными для торфяника Т2, находящегося в естественных условиях (см. рис. 2б). Таким образом, также может быть оценено нетто-влияние колебаний климата.

На рис. 5а видно, что суммарная площадь полигонов убывает очень медленно, а сумма площадей стабильных канав убывает несколько быстрее. Поскольку площадь стабильных канав убывает быстрее, чем площадь полигонов, то можно считать полигоны практически стабильными. Площадь деградирующих полигональных канав растет намного быстрее и за счет площади полигонов, и за счет площади стабильных канав. Причем преобразование канав заметно ускоряется летом 2012 г.

Наличие и разрешение снимков позволили рассмотреть два временных отрезка: 09.2005–07.2016 и 07.2016–07.2022 гг. (см. рис. 5). Наблюдается тенденция, сходная с той, что на участке Т1ю. Снижается площадь полигонов и стабильных канав при увеличении площади деградирующих канав, причем последнее — с более заметным градиентом (см. рис. 5а). Поскольку площадь стабильных канав убывает медленнее, чем растет площадь деградирующих канав, то, значит, канавы деградируют в основном за счет разрушения полигонов (рис. 5б). Сопоставление скоростей роста площади полигональных канав с климатическими параметрами показано на рис. 5в. Первая часть рассматриваемого периода характеризуется меньшими суммами положительных температур и большей суммой атмосферных осадков по сравнению со второй частью периода. Этому соответствует и тенденция увеличения площади деградирующих полигональных канав.

ДИСКУССИЯ

Несмотря на то, что исходная суммарная площадь деградирующих канав на Т1с больше, чем на Т1ю, темпы роста деградирующих канав на Т1ю за период 2005–2022 гг. значительно выше и составляют $0,17 \text{ м}^2/\text{м}^2$ против $0,04 \text{ м}^2/\text{м}^2$ на Т1с (табл. 2). Прирост деградирующих канав составил $0,04 \text{ м}^2/\text{м}^2$ на Т2. Таким образом, участок Т1с за последние 17 лет не подвергался отрицательному влиянию автодороги. Поскольку начальная площадь деградирующих канав на участке Т1с была выше, чем на участке Т1ю (см. табл. 2), то можно заключить, что автодорога сыграла стабилизирующую роль для рельефа этого участка. Мы полагаем, что причина этого лежит в перераспределении поверхностного стока, который изменился под влиянием дороги (рис. 6).

Сравнение скоростей разрушения рельефа трех участков мониторинга

Table 2

Comparison of relief destruction rates of three monitoring sites

Индекс участка мониторинга	T1ю	T1с	T2
Площадь участка мониторинга (Π_y , м ²)	26958	27187	35228
Площадь деградирующих канав ($\Pi_{дк}$), образовавшихся на участке за период 2005–2022 гг., ($\Pi_{дк\ 2022} - \Pi_{дк\ 2005}$) м ²	5143 – 492 = 4651	2316 – 1142 = 1174	1933 – 447 = 1486
Удельная площадь деградирующих канав, образовавшихся на участке за период 2005–2022 гг., ($\Pi_{дк\ 2022} - \Pi_{дк\ 2005} / \Pi_y$) м ² /м ²	0,17	0,04	0,04

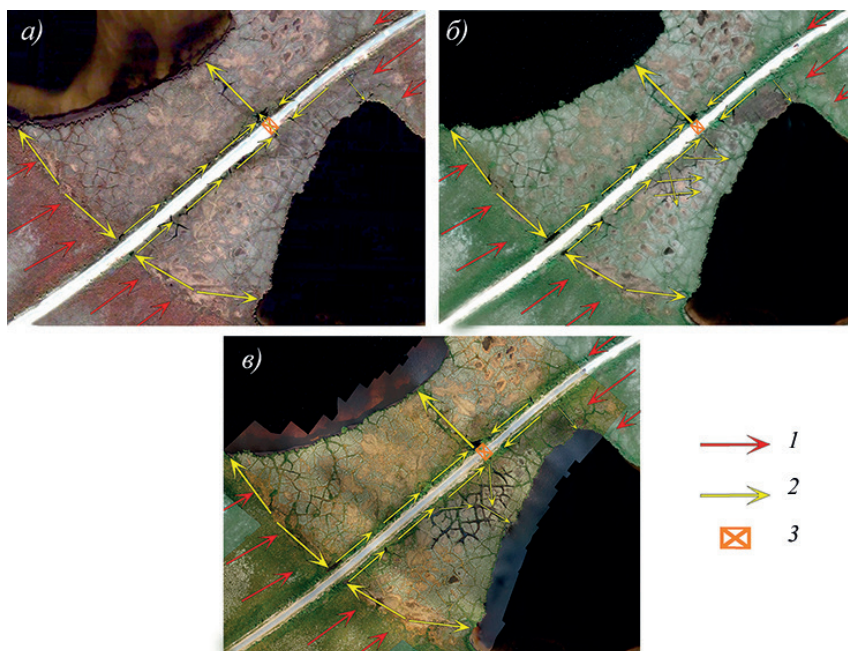


Рис. 6. Схема перераспределения поверхностного стока воды: а) 2005 г.; б) 2017 г.; в) 2022 год. 1 — сток с водораздела; 2 — сток вдоль подножья насыпи и вдоль полигональных канав торфяника; 3 — водопропускная труба

Fig. 6. Sketch-map of surface runoff re-distribution in: а) 2005; б) 2017; в) 2022. 1 — runoff from the watershed; 2 — runoff along the embankment base and along the polygonal troughs of the peat plateau; 3 — a culvert

В 2005 г. при таянии снега сток с водоразделов (красные стрелки) скапливался у подошвы склона водораздела. Далее сток распределялся частью к озерам и частью к дороге (желтые стрелки). Вдоль юго-восточного откоса насыпи вода стекала по канавам в самую низменную часть торфяника, в которой заложена водопропускная труба. Далее вода шла через водопропускную трубу с юго-востока на противоположную сторону насыпи, скапливаясь в термокарстовом блюдце (черное пятнышко на снимке) и по мере наполнения дальше текла по канавам в северо-западное

озеро (см. рис. 6а). При этом процессы термокарста и термоэрозии с вытаиванием ПЖЛ развивались вдоль дороги у основания насыпи и по направлению стока, обозначенного желтыми стрелками на рис. 6, от трубы к северо-западному озеру по существовавшей ранее эрозионной промоине.

По нашим наблюдениям, к 2016 г. свои функции перестала выполнять водо-пропускная труба. В связи с этим вода начала скапливаться в больших объемах и с юго-восточной стороны насыпи, что в свою очередь запустило процессы термокарста и термоэрозии в направлении юго-восточного озера с образованием сети деградирующих канав (см. рис. 6б).

В период с 2016 по 2022 г. с северо-западной стороны насыпи изменение стока не выявлено, поскольку не было перераспределения стока через трубу. С юго-восточной стороны насыпи сток через сеть деградирующих канав находит выход в юго-восточное озеро, минуя водопропускную трубу (см. рис. 6в).

На высокодетальных космоснимках и снимках с БПЛА хорошо виден режим заполнения полигональных канав водой или их дренирование, а значит, и преобладание в их деградации процессов термокарста или термоэрозии соответственно. Так, с 2005 по 2016 г. затопление полигональных канав шло интенсивно вместе с их деградацией под действием термокарста, вода занимала до 74 % площади канав. В период 2016–2017 гг. началось дренирование полигональных канав, и в 2019 г. прорвалась перемычка между Т1ю и юго-восточным озером. В этот период начал преобладать процесс термоэрозии и углубления канав. К периоду 2020–2022 гг. осталась только застойная вода на наиболее низких участках дна полигональных канав, занимающих площадь менее 5 %.

Активизацию криогенных процессов в последние десятилетия связывают с потеплением климата, а именно с ростом средних годовых температур воздуха, сумм положительных температур воздуха и количества летних и зимних атмосферных осадков, влияющим на состояние подземных льдов [34, 15, 49–54]. Отмечается, что вытаивание ПЖЛ происходит за счет чрезвычайно высоких значений летних температур воздуха и количества летних осадков отдельных лет, тогда как постепенное потепление климата не оказывает существенного влияния [11, 23–25]. По нашим данным не установлено явное влияние короткопериодных колебаний климата на разрушение ПЖЛ в торфяниках на севере Пур-Тазовского междуречья. Короткопериодная стадийность, по-видимому, связана с гидрологическим режимом, который контролируется совместным влиянием сумм атмосферных осадков, изменения направления стока, в том числе под влиянием насыпи автодороги и рабочего состояния водопропускной трубы, и собственно разрушением торфяников в результате смены режима блокирования или режима ускорения стока.

ВЫВОДЫ

Мониторинг рельефа полигональных торфяников, находящихся в естественных условиях и под воздействием насыпи автодороги, показал следующее.

– На участках, прилегающих к насыпи автодороги, наблюдается существенное различие между темпами деградации участка к юго-востоку и к северо-западу от автодороги. На северо-западном участке в результате существования на начало исследований сформировавшейся эрозионной канавы и перераспределения поверхностного стока скорость деградации торфяника сократилась, то есть автодорога оказала стабилизирующее действие на рельеф полигонального торфяника.

– На юго-восточном участке деградация после строительства дороги резко усилилась. Полигональные каналы расширились за счет деградации полигонов.

– На фоновом участке скорость деградации рельефа полигонального торфяника, находящегося в естественных условиях, несколько выше, чем на участке, прилегающем к автодороге с северо-запада. Это подтверждает вывод о том, что автодорога оказывает стабилизирующее воздействие на рельеф торфяника на северо-западном участке.

– Сопоставление основных показателей климата и скоростей деградации полигонального рельефа не дал явных зависимостей. Вероятно, большее значение имеет перераспределение поверхностного стока и смена режимов затопления полигональных каналов и их дренирования, определяемого самим ритмичным ходом деградации рельефа: активизация обрушения полигонов в теплое лето приводит к блокированию стока по каналам и термокарсту. В более холодные периоды, сочетающиеся со значительными атмосферными осадками, преобладает проточный режим в каналах и термоэрозия как фактор увеличения глубины и площади полигональных каналов.

– Выявление закономерностей взаимовлияния деградации полигональных торфяников и климатических параметров требует большего временного разрешения дистанционных материалов, например съемки ключевых площадок с БПЛА в еженедельном режиме.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование проведено при частичной финансовой поддержке РФФИ и Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках научных проектов № 18-45-890013 и 19-45-890011. Методические подходы разрабатываются при выполнении работы по госзаданию № 121041600042-7.

Competing interests. The authors have no conflicts of interest to disclose.

Funding. The study was carried out with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research and the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug within the framework of scientific projects Nos. 18-45-890013 and 19-45-890011. Methodological approaches are developed as part of work carried out on state assignment No. 121041600042-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горюнов Б.К. Крупнобугристые торфяники и их географическое распространение // Природа. 1928. № 6. С. 22–26.
2. Кузнецова Т.П. Подземные льды молодых прибрежно-морских террас Тазовского полуострова // Проблемы криолитологии. Вып. 1. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. С. 44–49.
3. Шполянская Н.А., Евсеев В.П. Выпуклобугристые торфяники северной тайги Западной Сибири // Природные условия Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. С. 134–146.
4. Тыртиков А.П. Динамика растительного покрова и развитие мерзлотных форм рельефа. М.: Наука, 1979. 116 с.
5. Кашперюк П.И., Трофимов В.Т. Типы и инженерно-геологическая характеристика многолетнемерзлых торфяных массивов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 184 с.
6. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Мощные полигональные торфяники в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 4. С. 3–15.

7. Фотиев С.М. Арктические торфяники Ямало-Гыданской провинции Западной Сибири // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 5. С. 3–15.
8. Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слука З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / Под ред. В.Б. Куваева. Тула: Гриф и К, 2001. 584 с.
9. Кашперюк П.И. Типы и инженерно-геологические особенности многолетнемерзлых торфяных массивов севера Западно-Сибирской плиты: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1985. 291 с.
10. Романовский Н.Н. Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск: Наука, 1977. 216 с.
11. Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., Fedorov A.N., Frost G.V., Grosse G., Hinzman L.D., Iijma Y., Jorgenson J.C., Matveyeva N., Necsoiu M., Raynolds M.K., Romanovsky V.E., Schulla J., Tape K.D., Walker D.A., Wilson C.J., Yabuki H., Zona D. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // Nature geosciences. 2016. V. 9. P. 312–318.
12. Fraser R.H., Kokelj S.V., Lantz T.C., McFarlane-Winchester M., Olthof I., Lacelle D. Climate sensitivity of high arctic permafrost terrain demonstrated by widespread ice-wedge thermokarst on banks Island // Remote Sens. 2018. V. 10. 954. URL: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/6/954> (дата обращения: 25.09.2022).
13. Farquharson L.M., Romanovsky V.E., Cable W.L., Walker D.A., Kokelj S., Nicolsky D. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian high arctic // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 4. 6681–9. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019GL082187> (дата обращения: 25.09.2022).
14. De Klerk P., Donner N., Karpov N.S., Minke M., Joosten H. Short-term dynamics of a low-centred ice-wedge polygon near Chokurdakh (NE Yakutia, NE Siberia) and climate change during the last ca 1250 years // Quat. Sci. Rev. 2011. V. 30. P. 3013–3031.
15. Gao Y., Couwenberg J. Carbon accumulation in a permafrost polygon peatland: steady longterm rates in spite of shifts between dry and wet conditions // Glob. Chang. Biol. 2015. V. 21. P. 803–815.
16. Мельцер Л.И. Фитоценоотические аспекты устойчивости ландшафтов Ямала // Западная Сибирь — проблемы развития. Тюмень: Ин-т пробл. освоения Севера СО РАН, 1994. С. 128–141.
17. Москаленко Н.Г. Антропогенная динамика растительности равнин криолитозоны России. Новосибирск: Наука, 1999. 280 с.
18. Антропогенные изменения экосистем Западно-Сибирской газоносной провинции / Отв. ред. Н.Г. Москаленко. М.: ИКЗ СО РАН, 2006. 359 с.
19. Yi S., Woo M. K., Arain M.A. Impacts of peat and vegetation on permafrost degradation under climate warming // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L16504. doi:10.1029/2007GL030550.
20. Валеева Э.И., Московченко Д.В. Зональные особенности растительного покрова Тазовского полуострова и его техногенная трансформация // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2009. № 9. С. 174–190.
21. Москаленко Н.Г. Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 4. С. 18–23.
22. Губарьков А.А., Андреева М.В., Еланцев Е.В., Хомутов А.В. Динамика экзогенных геологических процессов на автодороге Южно-Русское–Береговое // Проблемы региональной экологии. 2014. № 3. С. 19–23.
23. Jorgenson M.T., Shur Y.L., Pullman E.R. Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33 (2). L02503. doi: 10.1029/2005GL024960.
24. Raynolds M., Walker D., Ambrosius K., Brown J., Everett K., Kanevskiy M., Kofinas G., Romanovsky V., Shur Y., Webber P. Cumulative geoeological effects of 62 years of infrastructure

and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska // *Glob. Change Biol.* 2014. V. 20. P. 1211–1224.

25. Jorgenson M.T., Kanevskiy M., Shur Y., Moskalenko N., Brown D.R.N., Wickland K., Striegl R., Koch J. Role of ground ice dynamics and ecological feedbacks in recent ice wedge degradation and stabilization // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120. P. 2280–2297.

26. Kuznetsova A.O., Afonin A.S., Tikhonravova Ya.V., Slagoda E.A. Dynamics of local conditions of peat accumulation in the Holocene of the southern tundra of the Pur-Taz interfluvies // International conference “Solving the puzzles from Cryosphere”. Pushchino, Russia, April 15–18, 2019. 2019. P. 81–82.

27. Raudina T.V., Loiko S.V. Properties and major element concentrations in peat profiles of the polygonal frozen bog in Western Siberia // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2019. V. 400. 012009. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/400/1/012009> (дата обращения: 25.09.2022).

28. Pastukhov A., Marchenko-Vagapova T., Loiko S., Kaverin D. Vulnerability of the Ancient Peat Plateaus in Western Siberia // *Plants*. 2021. V. 10. 2813. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/12/2813> (дата обращения: 25.09.2022).

29. Zlotnik V.A., Harp D.R., Jafarov E.E., Abolt C.J. A Model of Ice Wedge Polygon Drainage in Changing Arctic Terrain // *Water*. 2020. V. 12. 3376. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/12/3376> (дата обращения: 25.09.2022).

30. Пономарева О.Е., Гравис А.Г., Бердников Н.М. Современная динамика бугров пучения и плоскобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири (на примере Надымского стационара) // *Криосфера Земли*. Т. 16. № 4. С. 21–30.

31. Пастухов А.В., Каверин Д.А. Экологическое состояние мерзлотных бугристых торфяников на северо-востоке Европейской России // *Экология*. 2016. № 2. С. 94–102.

32. Loiko S., Klimova N., Kuzmina D., Pokrovsky O. Lake Drainage in Permafrost Regions Produces Variable Plant Communities of High Biomass and Productivity // *Plants*. 2020. V. 9. 867. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/9/7/867> (дата обращения: 25.09.2022).

33. Nitzbon J., Langer M., Westermann S., Martin L., Aas K.S., Boike J. Pathways of ice-wedge degradation in polygonal tundra under different hydrological conditions // *The Cryosphere*. 2019. V. 13. P. 1089–1123.

34. 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.

35. Москаленко Н.Г. Изменения криогенных ландшафтов северной тайги Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенеза // *Криосфера Земли*. 2012. Т. 16. № 2. С. 38–42.

36. Гребенец В.И., Исаков В.А. Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск–Талнах и методы борьбы с ними // *Криосфера Земли*. 2016. Т. 20. № 2. С. 69–77.

37. Хомутов А.В., Королева Е.С., Данько М.М., Хайруллин Р.Р. Полигональные торфяники севера Западной Сибири: распространение и вопросы классификации // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне». МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г. М.: «КДУ», «Добросвет». 2022. С. 745–751. URL: <https://bookonlime.ru/node/44945> (дата обращения: 25.09.2022).

38. Хомутов А.В., Лейбман М.О., Губарьков А.А., Дворников Ю.А., Муллаунов Д.Р., Бабкин Е.М., Бабкина Е.А. Мониторинг криолитозоны: новые данные на Центральном Ямале и организация наблюдений на Гыдане // *Научный вестник ЯНАО*. 2016. Т. 93. № 4. С. 17–19.

39. Хомутов А.В., Бабкин Е.М., Тихонравова Я.В., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А., Бабкина Е.А., Каверин Д.А., Губарьков А.А., Слагода Е.А., Садуртдинов М.Р., Судакова М.С., Королева Е.С., Кузнецова А.О., Факацук Н.Ю., Сощенко Д.Д. Комплексные исследования криолитозоны северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья // *Научный вестник ЯНАО*. 2019. Т. 102. № 1. С. 53–64.

40. Бабкин Е.М., Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Хайруллин Р.Р., Бабкина Е.А. Изменение рельефа торфяника с вытаявающим полигонально-жильным льдом в северной части Пур-Тазовского междуречья // Проблемы региональной экологии. 2018. № 4. С. 115–119.
41. Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Бабкин Е.М., Бабкина Е.А., Сощенко Д.Д. Анализ изменения торфяников северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья по дистанционным и наземным данным мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 54–62.
42. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск: Омская картографическая фабрика, 2004. 304 с.
43. Лебедева Е.А., Файбусович Я.Э., Назаров Д.В., Воронин А.С., Герасичева А.В., Маркина Т.В., Никольская О.А., Рубин Л.И., Чеканов В.И. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Западно-Сибирская. Лист Q-44–Тазовский. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2020. 191 с.
44. Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000 / Под ред. Э.Д. Ершова, К.А. Кондратьевой. М.: МГУ; ПГО Гидроспецгеология, 1991. 16 л.
45. СП 115.1330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. М.: Стандартинформ, 2016. 40 с.
46. Геокриология СССР. Кн. 2 / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во «Недра», 1989. 454 с.
47. Погода в Тазовском. URL: http://rp5.ru/Погода_в_Тазовском (дата обращения: 01.09.2022).
48. Удаленный доступ к ЯОД-архивам. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=8> (дата обращения: 01.09.2022).
49. Бакулин А.А., Пижанкова Е.И., Гаврилов А.В. Разнонаправленные криогенные процессы береговой зоны морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // Евразийский союз ученых. 2016. № 4–4 (25). С. 138–140.
50. Куницкий В.В., Сыромятников И.И., Ширрмейстер Л., Скачков Ю.Б., Гроссе Г., Веттерих С., Григорьев М.Н. Льдистые породы и термоденудация в районе поселка Батагай (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь) // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 1. С. 56–68.
51. Пижанкова Е.И. Современные изменения климата высоких широт и их влияние на динамику берегов района пролива Дмитрия Лаптева // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 1. С. 51–64.
52. Günther F., Overduin P.P., Yakshina I.A., Opel T., Baranskaya A.V., Grigoriev M.N. Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to arctic summer warming and sea ice reduction // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 151–178.
53. Кизяков А.И., Лейбман М.О. Рельефообразующие криогенные процессы: обзор литературы за 2010–2015 годы // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 4. С. 45–58.
54. Romanovsky V., Isaksen K., Drozdov D., Anisimov O., Instanes A., Leibman M., McGuire A.D., Shiklomanov N., Smith S., Walker D., Grosse G., Jones B.M., Jorgensen M.T., Kanevskiy M., Kizyakov A., Lewkowicz A., Malkova G., Marchenko S., Nicolsky D.J., Streletskiy D., Westermann S. Changing permafrost and its impacts. (Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2017. P. 65–102. URL: <https://www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost-in-the-arctic-swipa-2017/1610> (дата обращения: 25.09.2022)

REFERENCES

1. Gorodkov B.K. Large hill bogs and their geographical distribution. *Priroda*. Nature. 1928, 6: 22–26. [In Russian].
2. Kuznetsova T.P. Ground ice of young coastal-marine terraces of the Taz Peninsula. *Problemy kriolitologii*. Problems of criolithology. Moscow: Moscow University Press, 1969. 1: 44–49. [In Russian].

3. *Shpolianskaia N.A., Evseev V.P.* Hill peatlands of the northern taiga of Western Siberia. *Prirodnye usloviia Zapadnoi Sibiri*. Natural condition of Western Siberia. Moscow: Moscow University Press, 1972: 134–146. [In Russian].
4. *Tyrtikov A.P.* *Dinamika rastitel'nogo pokrova i razvitie merzlotnykh form rel'efa*. Vegetation dynamics and development of permafrost landforms. Moscow: Nauka, 1979: 116 p. [In Russian].
5. *Kashperiuk P.I.* *Tipy i inzhenerno-geologicheskaya kharakteristika mnogoletnemerzlykh torfiannykh massivov*. Types and engineering-geological conditions of permafrost peatlands. Moscow: Moscow University Press, 1988: 184 p. [In Russian].
6. *Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.K.* Thick polygonal peatlands in continuous permafrost zone of West Siberia. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2016, 20 (4): 3–15. [In Russian].
7. *Fotiev S.M.* Arctic peatlands of the Yamal-Gydan province of Western Siberia. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2017, 21 (5): 3–15. [In Russian].
8. *Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A., Berezina N.A., Inisheva L.I., Kurnishkova T.V., Sluka Z.A., Tolpysheva T.Iu., Shvedchikova N.K.* *Bolotnye sistemy Zapadnoi Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie*. Bog of West Siberia and their conservation value. Tula: Grif i K Publ., 2001: 584 p. [In Russian].
9. *Kashperiuk P.I.* *Tipy i inzhenerno-geologicheskie osobennosti mnogoletnemerzlykh torfiannykh massivov severa Zapadno-Sibirskoi plity*. Types and engineering-geological conditions of permafrost peatlands in the North of Western Siberia plate. PhD geol.-min. sci. diss. Moscow, 1985: 291 p. [In Russian].
10. *Romanovskii N.N.* *Formirovanie poligonal'no-zhil'nykh struktur*. Formation of Polygonal-Wedge Structures. Novosibirsk: Nauka, 1977: 216 p. [In Russian].
11. *Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., Fedorov A.N., Frost G.V., Grosse G., Hinzman L.D., Iijima Y., Jorgenson J.C., Matveyeva N., Necsoiu M., Reynolds M.K., Romanovsky V.E., Schulla J., Tape K.D., Walker D.A., Wilson C.J., Yabuki H., Zona D.* Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature geosciences*. 2016, 9: 312–318.
12. *Fraser R.H., Kokelj S.V., Lantz T.C., McFarlane-Winchester M., Olthof I., Lacelle D.* Climate sensitivity of high arctic permafrost terrain demonstrated by widespread ice-wedge thermokarst on Banks Island. *Remote Sens*. 2018, 10: 954. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/6/954> (accessed 25.09.2022).
13. *Farquharson L.M., Romanovsky V.E., Cable W.L., Walker D.A., Kokelj S., Nicolsky D.* Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian high arctic. *Geophys. Res. Lett.* 2019, 46: 6681–9. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019GL082187> (accessed 25.09.2022).
14. *De Klerk P., Donner N., Karpov N.S., Minke M., Joosten H.* Short-term dynamics of a low-centred ice-wedge polygon near Chokurdakh (NE Yakutia, NE Siberia) and climate change during the last ca 1250 years. *Quat. Sci. Rev.* 2011, 30: 3013–3031.
15. *Gao Y., Couwenberg J.* Carbon accumulation in a permafrost polygon peatland: steady longterm rates in spite of shifts between dry and wet conditions. *Glob. Chang. Biol.* 2015, 21: 803–815.
16. *Mel'tser L.I.* Phytocenosis aspects of sustainability of Yamal landscapes. *Fitotsenoticheskie aspekty ustoychivosti landshtaftov Yamala*. Western Siberia — Development Problems. Tyumen: Institute of Northern Development Issues, SB RAS, 1994: 128–141. [In Russian].
17. *Moskalenko N.G.* *Antropogennaya dinamika rastitel'nosti ravnin kriolitozony Rossii*. The anthropogenic Dynamics of Vegetation Growing on the Plains of the Russian Permafrost Zone. Novosibirsk: Nauka, 1999: 280 p. [In Russian].
18. *Moskalenko N.G. (Ed.)* *Antropogennyye izmeneniia ekosistem Zapadno-Sibirskoi gazonosnoi provintsii*. Anthropogenic changes in the ecosystems of the West-Siberian gas-bearing province. Moscow: Institute of the Earth's Cryosphere, 2006: 359 p. [In Russian].

19. Yi S., Woo M.K., Arain M.A. Impacts of peat and vegetation on permafrost degradation under climate warming. *Geophysical Research Letters*. 2007, 34: L16504. doi:10.1029/2007GL030550.
20. Valeeva E.I., Moskovchenko D.V. Zonal specifics of the vegetative cover of the Tazovsky Peninsula and its anthropogenic transformation. *Vestnik ekologii, lesovedeniia i landshaftovedeniia*. Bulletin of ecology, forest science and landscape science. 2009, 9: 174–190. [In Russian].
21. Moskalenko N.G. Permafrost and vegetation changes in the Nadym region of West Siberian northern taiga due to the climate change and technogenesis. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2009, 13 (4): 18–23. [In Russian].
22. Gubar'kov A.A., Andreeva M.V., Elantsev E.V., Khomutov A.V. Dynamics of exogenous processes on the Yuzhno-Russkoye–Beregovoe highway. *Problemy regional'noi ekologii*. Regional Environmental Issues. 2014, 3: 19–23. [In Russian].
23. Jorgenson M.T., Shur Y.L., Pullman E.R. Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska. *Geophys. Res. Lett.* 2006, 33(2): L02503. doi: 10.1029/2005GL024960.
24. Reynolds M., Walker D., Ambrosius K., Brown J., Everett K., Kanevskiy M., Kofinas G., Romanovsky V., Shur Y., Webber P. Cumulative geoecological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska. *Glob. Change Biol.* 2014, 20: 1211–1224.
25. Jorgenson M.T., Kanevskiy M., Shur Y., Moskalenko N., Brown D.R.N., Wickland K., Striegl R., Koch J. Role of ground ice dynamics and ecological feedbacks in recent ice wedge degradation and stabilization. *J. Geophys. Res.* 2015, 120: 2280–2297.
26. Kuznetsova A.O., Afonin A.S., Tikhonravova Ya.V., Slogoda E.A. Dynamics of local conditions of peat accumulation in the Holocene of the southern tundra of the Pur-Taz interfluvies. International conference “Solving the puzzles from Cryosphere”. Pushchino, Russia, April 15–18. 2019, 81–82. Available at: http://cryosol.ru/images/phocagallery/conference/cryospherepuzzles/PushchinoPermafrost_ConferenceProgramAbstracts2019_compressed.pdf (accessed 25.09.2022).
27. Raudina T.V., Loiko S.V. Properties and major element concentrations in peat profiles of the polygonal frozen bog in Western Siberia. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2019, 400: 012009. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/400/1/012009> (accessed 25.09.2022).
28. Pastukhov A., Marchenko-Vagapova T., Loiko S., Kaverin D. Vulnerability of the Ancient Peat Plateaus in Western Siberia. *Plants*. 2021, 10: 2813. Available at: <https://www.mdpi.com/2223-7747/10/12/2813> (accessed 25.09.2022).
29. Zlotnik V.A., Harp D.R., Jafarov E.E., Abolt C.J. A Model of Ice Wedge Polygon Drainage in Changing Arctic Terrain. *Water*. 2020, 12: 3376. Available at: <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/12/3376> (accessed 25.09.2022).
30. Ponomareva O.E., Gravis A.G., Berdnikov N.M. Contemporary dynamics of frost mounds and flat peatlands in north taiga of West Siberia (on the example of Nadym site). *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 16 (4): 21–30. [In Russian].
31. Pastukhov A.V., Kaverin D.A. Ecological state of peat plateaus in northeastern European Russia. *Ekologiya*. Russ. J. Ecol. 2016, 2: 94–102. [In Russian].
32. Loiko S., Klimova N., Kuzmina D., Pokrovsky O. Lake Drainage in Permafrost Regions Produces Variable Plant Communities of High Biomass and Productivity. *Plants*. 2020, 9: 867. Available at: <https://www.mdpi.com/2223-7747/9/7/867> (accessed 25.09.2022).
33. Nitzbon J., Langer M., Westermann S., Martin L., Aas K.S., Boike J. Pathways of ice-wedge degradation in polygonal tundra under different hydrological conditions. *The Cryosphere*. 2019, 13: 1089–1123.
34. Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., Fakashchuk 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. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2019, 4: 99–109. [In Russian].
35. *Moskalenko N.G.* Cryogenic landscape changes in the West Siberian northern taiga in the conditions of climate change and human-induced disturbances. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2012, 16 (2): 38–42. [In Russian].
36. *Grebenets V.I., Isakov V.A.* Deformations of roads and railways within the Norilsk-Talnakh transportation corridor and the stabilization methods. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2016, 20 (2): 69–77. [In Russian].
37. *Khomutov A.V., Koroleva E.S., Dan'ko M.M., Khairullin R.R.* Polygonal peatlands in the north of West Siberia: distribution and classification issues. *Sbornik докладов Шестой конференции геокриологов России "Monitoring v kriolitozone"*. Collection of reports of the Sixth Conference of geocryologists of Russia "Monitoring of permafrost zone". Moscow, 2022, 745–751. Available at: <https://bookonlime.ru/node/44945> (accessed 25.09.2022). [In Russian].
38. *Khomutov A.V., Leibman M.O., Gubar'kov A.A., Dvornikov Yu.A., Mullanurov D.R., Babkin E.M., Babkina E.A.* Monitoring of permafrost zone: new data from Central Yamal and arrangement of observations on Gydan. *Nauchnyi vestnik YaNAO*. Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2016, 93 (4): 17–19. [In Russian].
39. *Khomutov A.V., Babkin E.M., Tikhonravova Ya.V., Khairullin R.R., Dvornikov Yu.A., Babkina E.A., Kaverin D.A., Gubar'kov A.A., Slagoda E.A., Sadurtdinov M.R., Sudakova M.S., Koroleva E.S., Kuznetsova A.O., Fakashchuk N.Yu., Soshchenko D.D.* Complex studies of the cryolithozone of the north-eastern part of the Pur-Taz interfluv. *Nauchnyi vestnik IaNAO*. Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2019, 102 (1): 53–64. [In Russian].
40. *Babkin E.M., Khomutov A.V., Dvornikov Yu.A., Khairullin R.R., Babkina E.A.* Relief changes of the peat plateau with melting of polygonal-wedge ice in the northern part of the Pur-Taz interfluv. *Problemy regional'noi ekologii*. Regional Environmental Issues. 2018, 4: 115–119.
41. *Khairullin R.R., Khomutov A.V., Dvornikov Yu.A., Babkin E.M., Babkina E.A., Soshchenko D.D.* Analysis of peatland changes in the northeastern part of the Pur-Taz interfluv based on remote sensing and ground monitoring data. *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2019, 16 (4): 54–62. [In Russian].
42. *Atlas Iamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga*. Atlas of the Yamal-Nenets Autonomous District. Omsk: Omsk Cartographic Factory, 2004: 304 p. [In Russian].
43. *Lebedeva E.A., Faibusovich Ia.E., Nazarov D.V., Voronin A.S., Gerasicheva A.V., Markina T.V., Nikol'skaia O.A., Rubin L.I., Chekanov V.I.* Gosudarstvennaia geologicheskaiia karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:1000000. Tret'e pokolenie. Seriia Zapadno-Sibirskaiia. List Q-44–Tazovskii. Ob'iasnitel'naia zapiska. State geological map of the Russian Federation, scale 1:1000000. Third generation. Series West Siberian. Sheet Q-44–Tazovsky. Explanatory note. FGBU «VSEGEI». St. Petersburg: VSEGEI, 2020: 191 p. [In Russian].
44. *Ershov E.D. (Ed.)* *Geokriologicheskaiia karta SSSR*. Geocryological map of the SSSR. Moscow: Lomonosov MSU, 1991: 16 p. [In Russian].
45. *Geofizika opasnykh prirodnnykh vozdviistvii*. SP 115.1330.2016. Geophysics of hazardous natural processes. Moscow: Standartinform Publ., 2016: 40 p. [In Russian].
46. *Trofimov V.T., Vasil'chuk Yu.K., Baulin V.V., Yershov E.D. (Ed.)*. *Geokriologiya SSSR Zapadnaia Sibir'*. Geocryology of the USSR. Western Siberia. Moscow: Nedra, 1989: 454 p. [In Russian].
47. *Pogoda v Tazovskom*. Weather in Tazovsky. Available at: http://rp5.ru/Weather_in_Tazovsky (accessed 01.09.2022).
48. Remote access to the Hydrometeorological Data Description Language-archives. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=8> (accessed 01.09.2022).

49. Bakulin A.A., Pizhankova E.I., Gavrilov A.V. Multiple cryogenic processes in the coastal zone of the Laptev and Eastern Siberian seas. *Evrasiiskii soiuz uchenykh*. Eurasian of Union of scientists. 2016, 4–4 (25): 138–140. [In Russian].
50. Kunitskii V.V., Syromiatnikov I.I., Shirmmeister L., Skachkov Iu.B., Grosse G., Vetterikh S., Grigor'ev M.N. Ice-rich permafrost and thermal denudation in the Batagay area (Yana upland, East Siberia). *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2013, 17 (1): 56–68. [In Russian].
51. Pizhankova E.I. Modern climate change at high latitudes and their influence on the coastal dynamics of the Dmitry Laptev strait area. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2016, 20 (1): 51–64. [In Russian].
52. Günther F., Overduin P.P., Yakshina I.A., Opel T., Baranskaya A.V., Grigoriev M.N. Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to arctic summer warming and sea ice reduction. *The Cryosphere*. 2015, 9: 151–178.
53. Kizyakov A.I., Leibman M.O. Cryogenic relief-formation processes: a review of 2010–2015 publications. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2016, 20 (4): 45–58. [In Russian].
54. Romanovsky V., Isaksen K., Drozdov D., Anisimov O., Instanes A., Leibman M., McGuire A.D., Shiklomanov N., Smith S., Walker D., Grosse G., Jones B.M., Jorgensen M.T., Kanevskiy M., Kizyakov A., Lewkowicz A., Malkova G., Marchenko S., Nicolsky D.J., Streletskiy D., Westermann S. Changing permafrost and its impacts. (Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2017: 65–102. Available at: <https://www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost-in-the-arctic-swipa-2017/1610> (accessed 25.09.2022).