

УДК 631.436:551.34

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4456

Шифр специальности ВАК: 1.6.12

Температурный режим торфяников Западной Сибири вблизи южной границы распространения многолетнемерзлых пород

Д.В. Московченко^{1✉}, А.А. Губарьков², А.В. Фахретдинов¹

¹ Институт проблем освоения Севера ТюмНЦ СО РАН, Россия, г. Тюмень

² Тюменский индустриальный университет, Россия, г. Тюмень

✉ moskovchenko1965@gmail.com

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена деградацией многолетнемерзлых пород под влиянием глобального потепления. Это обуславливает необходимость прогнозной оценки устойчивости мерзлоты для минимизации нарушений инженерных сооружений в криолитозоне. *Цель:* оценка устойчивости мерзлых торфяников в южной части зоны островного распространения мерзлоты. *Объекты:* почвы плоскобугристых и крупнобугристых торфяников, которые сохраняют мерзлоту на южной границе островной криолитозоны. *Методы:* замеры температуры торфа и минерального грунта в наблюдательных геокриологических скважинах на глубинах от 0 до 10 м с применением системы автоматического мониторинга «САМ-Н»; определение температуры поверхности по данным тепловых каналов спутниковых снимков MODIS за 2000–2022 гг.; анализ метеопоказателей и определение трендов температурного режима воздуха для прогнозной оценки устойчивости многолетнемерзлых пород; вычисление индикаторных показателей состояния мерзлоты – суммы положительных и отрицательных температур, коэффициентов морозности воздуха и температурного индекса поверхности. *Результаты.* Отмечены многочисленные признаки неустойчивого состояния мерзлоты: среднегодовая температура поверхностного слоя была положительная во всех обследованных скважинах (+0,8...+1,3 °С); на глубине нулевых теплооборотов (10 м) температура близка к точке таяния (преобладает диапазон –0,2...–0,3 °С), выявлено появление слоя грунта, который не замерзает в течение всего года («несливающаяся мерзлота»). Значения коэффициентов таяния и морозности воздуха соответствуют значениям в области с немерзлыми грунтами. Наблюдаются положительные тренды температуры воздуха, температуры поверхности Земли и высоты снежного покрова. За 2000–2022 гг. приземная температура воздуха в среднем увеличивалась на 0,76 °С/10 лет. Температура поверхности Земли в летний период возрастала в среднем на 0,42 °С/10 лет. При сохранении тенденции к росту температур приземного слоя воздуха мерзлые торфяники в южной части зоны криолитозоны полностью растают через 50–70 лет.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, островная криолитозона, потепление климата, торфяники, температурный режим, Западная Сибирь

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ 23-27-00366 «Современная динамика мерзлых торфяников на южной границе распространения в Западной Сибири».

Для цитирования: Московченко Д.В., Губарьков А.А., Фахретдинов А.В. Температурный режим торфяников Западной Сибири вблизи южной границы распространения многолетнемерзлых пород // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 160–168. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4456

UDC 631.436:551.34

DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4456

Thermal regime of peatlands in Western Siberia near the southern border of the permafrost

D.V. Moskovchenko^{1✉}, A.A. Gubarkov², A.V. Fakhretdinov¹

¹ Tyumen Scientific Center SB RAS, Tyumen, Russian Federation

² Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

✉ moskovchenko1965@gmail.com

Abstract. Relevance. The permafrost degradation under the effect of global warming. It determines the necessity for a predictive assessment of permafrost stability to minimize disturbances to engineering installations in the permafrost zone. **Aim.** To assess the stability of frozen peatlands in the southern part of the zone of insular distribution of permafrost. **Objects.** Soils of flat-mound and high-mound palsa mires, which preserve permafrost on the southern border of the insular permafrost zone. **Methods.** Measurements of the temperature of peat and mineral soil in geocryological boreholes from 0 to 10 m deep using the SAM-N automatic monitoring surveillance network; determination of surface temperature from thermal channels of MODIS satellite images from 2000 to 2022; analysis of meteorological indices and determination of air temperature trends for predictive assessment of permafrost stability; calculation of indicator values of permafrost state, such as freezing degree-days and thawing degree-days, frost index, freezing and thawing N-factors. **Results.** Numerous features of unstable permafrost have been observed. In particular, the mean annual temperature of the surface layer was positive in all studied boreholes (+0.8...+1.3°C), and the temperature at the depth of zero amplitudes (10 m) is close to the melting point (with the predominance of temperatures in the range of –0.2...–0.3°C). Besides, a layer of soil that does not freeze throughout the year (non-merging permafrost) was identified. The thawing degree-days and frost number values correspond to areas with unfrozen soils. Positive trends in air temperature, Earth's surface temperature, and snow depth were observed. For 2000–2022, surface air temperature increased by 0.76°C/10 years on average. The land surface temperature increased in summer by an average of 0.42°C/10 years. If the positive trend in surface air temperatures continues, frozen peatlands in the southern part of the permafrost zone will completely melt in 50–70 years.

Keywords: permafrost, island cryolithozone, climate warming, peatlands, temperature regime, Western Siberia

Acknowledgements: This research was supported by the Russian Science Foundation, Project no. 23-27-00366 “Contemporary dynamics of permafrost peatlands at the southern boundary of distribution in Western Siberia”.

For citation: Moskovchenko D.V., Gubarkov A.A., Fakhretdinov A.V. Thermal regime of peatlands in Western Siberia near the southern border of the permafrost. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 160–168. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4456

Введение

Одной из наиболее актуальных геоэкологических проблем является деградация многолетнемерзлых пород (ММП) под влиянием современного потепления климата. В настоящее время температура ММП в полярных и горных районах повышается в среднем на 0,29 °С за 10 лет [1]. Вследствие потепления может нарушиться устойчивость зданий и инженерных сооружений на многолетнемерзлых грунтах, что вызовет огромный экономический ущерб, измеряемый триллионами рублей [2].

Разработка мер по предотвращению ущерба требует прогноза реакции ММП на изменение климата. Точность прогноза зависит от количества и качества исходной информации о температурном режиме грунтов. В научной литературе преобладают оценки и расчеты, но явно недостаточно реаль-

ных наблюдений за деградацией ММП в различных биоклиматических зонах [3]. Особенно важна оценка температурного режима мерзлых пород там, где они наиболее неустойчивы и подвержены климатическим изменениям, – вблизи южной границы распространения. На южной границе островной криолитозоны мерзлота приурочена исключительно к торфяным массивам [4], которые, таким образом, являются своеобразными «хранителями» мерзлоты. Под влиянием потепления климата в настоящее время происходят изменения их морфологии, гидрологии, экологии и биогеохимии [5].

В Западной Сибири сосредоточены крупнейшие торфяные массивы на Земном шаре. В полярных и приполярных районах Западной Сибири торфяники являются одним из преобладающих типов болот и играют большую роль в консервации углерода, ре-

гулировании выбросов парниковых газов, сохранении биоразнообразия и обеспечении стабильности экосистем. Однако сведения о температурном режиме и устойчивости мерзлых торфяников Сибири немногочисленны. В обобщающей оценке современной деградации мерзлоты в Западном секторе Российской Арктики [3] использованы данные только двух площадок мониторинговых геокриологических наблюдений, расположенных в районе Надыма и Тарко-Сале, а более южные участки остались вне рассмотрения.

С 2019 г. проводится оценка температурного режима торфяников на одном из самых южных участков распространения мерзлоты в Западной Сибири – в районе природного парка Нумто (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, $63^{\circ}10'–64^{\circ}20'$ с.ш., $70^{\circ}00'–71^{\circ}35'$ в.д.). Исследуемая территория находится в зоне спорадического и островного распространения ММП, мощность которых не превышает 10–20 м [6]. Отличительной особенностью ландшафтов парка является присутствие здесь бугристых мерзлых торфяников тундрового типа, своеобразного анклава тундровых экосистем в таежной зоне, образующих комплексы площадью до нескольких десятков км² [7]. В 1960–1970-х гг. здесь действовал болотный пост Государственного гидрологического института, исследовавший, в числе прочего, температурный режим и глубину сезонного протаивания мерзлых торфяников [8, 9]. Среди ландшафтов парка Нумто олиготрофные плоско- и крупнобугристые торфяники наиболее неустойчивы к повышению температуры воздуха [10]. В настоящее время здесь отмечена активизация термокарста, в особенности в годы с теплыми и влажными летними сезонами [11]. На мерзлых буграх проявляются различные признаки деградации: пятна оголенного торфа, полигональные трещины-разрывы, термокарстовые просадки, оползневые процессы [12, 13].

Цель работы – оценка устойчивости мерзлых торфяников в южной части зоны островного распространения ММП. Задачи включали в себя: 1) определение температурного режима мерзлых торфяников по данным наблюдений в геокриологических скважинах и вычисление температуры поверхности с применением данных дистанционного зондирования; 2) выявление трендов изменения температурных показателей; 3) оценка современного состояния сезонно-талого слоя; 4) прогноз изменения ММП под влиянием климатических изменений. Поскольку обследованные торфяники типичны для северной тайги Западной Сибири, оценка их температурного режима и устойчивости может способствовать прогнозированию масштабных изменений ландшафтов, гидрологического режима, биоразнообразия и углеродного баланса.

Материалы и методы

Для определения температурного режима были выбраны участки, различающиеся по морфологическим особенностям торфяников, типу растительности и интенсивности экзогенных процессов. На плоскобугристых торфяниках, крупнобугристых торфяниках и на отдельно стоящих буграх пучения было пробурено девять скважин глубиной 10 м. В скважинах были установлены логгеры – устройства для автоматического измерения, хранения и передачи данных за длительный период времени. Определение температуры грунта проводилось с применением системы автоматического мониторинга «САМ-Н» (ИМКЭС СО РАН, г. Томск) [14]. Погрешность калибровки датчиков не более $\pm 0,1$ °С. Датчики, установленные с шагом 0,5 м до глубины 2 м и далее через 1 м, были запрограммированы на четыре измерения в сутки. В пяти скважинах измерения проводились начиная с 2019 г., в остальных – с 2021 г. В наиболее типичных ландшафтно-геокриологических условиях – на обширном торфяном массиве, сочетающем плоскобугристые мерзлые торфяники, крупные бугры и немерзлые мочажины, проводилось определение глубины сезонного протаивания на площадке, оборудованной в соответствии с международной методикой циркулярного мониторинга деятельного слоя CALM [15]. Размеры площадки составляют 100×100 м, расстояние между точками измерения сезонно-талого слоя (СТС) – 10 м. Измерения СТС проведены металлическим щупом диаметром 8 мм, что соответствует ГОСТ 26262-2014 [16].

Поскольку небольшой (2019–2022 гг.) период наблюдений не позволяет достоверно оценить тренд межгодового изменения температуры ММП, для прогноза устойчивости были привлечены: 1) результаты многолетних наблюдений на ближайшей метеостанции Юильск (температура атмосферного воздуха, количество осадков, глубина снежного покрова); 2) результаты определения температуры поверхности Земли (Land Surface Temperature, LST), полученные в процессе обработки тепловых каналов спутниковых снимков MODIS за 2000–2022 гг. [17] Был использован продукт MOD11A1 V6 с пространственным разрешением 1 км, включающий значения по серии восьмидневных временных композитов. LST даёт представление о температуре земной поверхности на границе взаимодействия с атмосферой, включая тепло как от открытой почвы, так и от растительности [18]. Данные о температуре поверхности, полученные с использованием снимков MODIS, коррелируют с данными наземных наблюдений на метеостанциях с коэффициентами корреляции более 0,9 [19], что позволяет использовать этот показатель при оценке климатических изменений.

Для прогноза возможного таяния ММП были подсчитаны климатические параметры и индексы, которые, согласно [20], могут служить маркерами состояния ММП и геокриологических границ: годовые суммы положительных среднесуточных температур воздуха или поверхности почвы (thawing degree-days – TDD); годовые суммы поверхности почвы либо воздуха за период с отрицательными температурами (freezing degree-days, FDD – FDD). Затем был вычислен коэффициент морозности воздуха (Fn) [21].

$$Fn = \frac{\sqrt{|FDD|}}{\sqrt{|FDD|} + \sqrt{TDD}}$$

При расчете индексов суммы отрицательных температур приводятся к положительным значениям. Также был посчитан N-фактор (температурный индекс поверхности) – отношение положительных и отрицательных температур на поверхности почвы к аналогичным суммам температур воздуха за тот же период [22].

Результаты и обсуждение

Результаты измерения температуры грунтов в трех скважинах, характеризующих разные торфяники – плоскобугристые, крупнобугристые и отдельно стоящие бугры пучения представлены в таблице. Среднегодовая температура поверхностного слоя обследованных торфяников была положительная во всех обследованных скважинах и варьировала от +0,8 до +1,3 °С. Мерзлота считается деградирующей, если хотя бы в части разреза (обычно верхней) среднегодовая температура пород стала положительной [23]. Таким образом, от-

меченная различными исследователями активизация экзогенных процессов на обследованном участке – термокарста, оползней, эрозии на берегах озер [11–13], вызвана ростом температуры поверхностного слоя торфяников и переходом ее в положительный диапазон.

Глубина сезонного протаивания на плоскобугристых торфяниках изменялась от 0,4 до 1,0 м. В 1960–1970 гг. глубина сезонного протаивания торфяников в районе оз. Нумто, по данным [8, 9], составляла 0,4–0,6 м. На площадке CALM средняя глубина протаивания варьировала в разные годы от 0,56 до 0,67 м в зависимости от температурного режима воздуха – наименьшее значение отмечено в холодный 2021 г., в теплый 2022 г. наблюдался рост глубины СТС. На крупнобугристых торфяниках и буграх пучения протаивание интенсивнее: кровля ММП залегает на глубинах от 1,0 до 2,0 м. Таким образом, на фоне потепления климата наблюдается тенденция увеличения глубины протаивания.

Особенности теплового режима характеризуют величины N-факторов, максимальные значения которых отмечены на крупнобугристых торфяниках, а минимальные – на плоскобугристых (таблица). Крупные бугры пучения сильнее прогреваются летом, поскольку влагонасыщенность торфа в них меньше по сравнению с плоскими участками, а растительный покров местами деградировал и слабее затеняет поверхность. Вместе с тем они сильнее охлаждаются зимой, поскольку маломощный снежный покров не препятствует промерзанию.

Таблица. Показатели температурного режима бугристых торфяников островной криолитозоны Западной Сибири (природный парк Нумто, 2019–2022 гг.)

Table. Indicators of the temperature regime of palsa mires in the island permafrost zone of Western Siberia (Numto Nature Park, 2019–2022)

Глубина, м Depth, m	Участки и показатели/Sites and indicators									
	1			2			3			
	t cp (mean), °C	Σt>0 °C		t cp (mean), °C	Σt>0 °C		t cp (mean), °C	Σt>0 °C		
0	0,8	1609	-1331	1,3	2410	-1929	1,3	1040	-560	
0,5	1,1	1215	-853	2,3	1583	-749	-0,4	6	-153	
1	1,3	837	-391	-0,3	106	-211	-0,4	0	-144	
1,5	0,9	347	-18	-0,3	0	-120	-0,3	0	-96	
2	-0,1	0	-29	-0,3	0	-109	-0,2	0	-80	
3,0	-0,2	0	-56	-0,3	0	-113	-0,2	0	-75	
4,0	-0,2	0	-78	-0,4	0	-130	-0,1	0	-43	
5,0	-0,2	0	-81	-0,3	0	-119	-0,1	0	-49	
6,0	-0,3	0	-111	-0,3	0	-124	-0,1	0	-35	
7,0	-0,3	0	-102	-0,3	0	-127	-0,1	0	-43	
8,0	-0,3	0	-123	-0,3	0	-120	-0,1	0	-42	
9,0	-0,3	0	-110	-0,4	0	-129	-0,1	0	-46	
10,0	-0,3	0	-105	-0,4	0	-134	-0,1	0	-48	
N-фактор/T-factor		0,83	0,52	-	1,24	0,75	-	0,54	0,22	

1 – бугор пучения/pingo; 2 – крупнобугристый торфяник/high-mound palsa mire; 3 – плоскобугристый торфяник/flat-mound palsa mire.

При анализе температурного режима мерзлоты обычно используют данные о температуре на глубине годовых нулевых амплитуд, где сезонные изменения отсутствуют либо крайне малы ($<0,1$ °C) [1]. В районе исследований температура ММП на глубине нулевых амплитуд (10 м) изменялась на плоскобугристых торфяниках в пределах $-0,1...-0,4$ °C, на буграх пучения $-0,2...-0,5$ °C. Близкие к 0 °C температуры ММП отмечены на низких торфяных грядах, окруженных болотами и озерами. Здесь сказывается отепляющее действие обводненных участков. Средний, наиболее часто встречающийся диапазон температур ($-0,3...-0,2$ °C) наблюдается на плоскобугристых торфяниках и в бугре пучения с небольшим (0,2–0,3 м) слоем деградирующего торфа на вершине. Наиболее низкая температура ($-0,4...-0,5$ °C) измерена в скважине, расположенной на многолетнем бугре пучения с мощным (1,6 м) слоем торфа. При этом наиболее низкие значения $-0,5$ °C наблюдались редко, преобладали значения $-0,4$ °C. В аналогичных торфяниках стационара Надым с деградирующей мерзлотой наблюдались близкие температуры: на крупнобугристом торфянике $-0,3$ °C, в других ландшафтах $-0,2...0$ °C [3].

По данным болотного поста ГГИ, в 1960–1970-х гг. в холодный период года слияние слоя сезонного промерзания с многолетней мерзлотой происходило обычно во второй–третьей декаде января [9]. По нашим наблюдениям, слияние сезонной и многолетней мерзлоты в настоящее время наблюдается не повсеместно, а преимущественно в плоскобугристых комплексах. Распространение ММП несливающегося типа, когда не происходит слияния сезонной и многолетней мерзлоты в холодный период года, является одним из признаков неустойчивого состояния криолитозоны. На обширных массивах плоскобугристых торфяников парка Нумто

мерзлота, как правило, сливающаяся. Промерзание идет значительно быстрее, чем указано в [9]. Переход температур в отрицательный диапазон в профиле плоскобугристых торфяников наблюдался в различные сроки – от первой декады ноября до начала января. Быстрое промерзание, вероятно, связано с относительно низкой влажностью торфа и малым количеством снега в начале зимы. Там, где торфяники чередуются с тальми мочажинами, формируются участки несливающейся мерзлоты. Так, на площадке CALM площадь сливающихся ММП составляет приблизительно одну треть (32–35 %). Образование несливающейся мерзлоты также отмечено на бугре пучения, где кровля ММП опустилась на глубину 2,0 м. Расширение участков с мерзлотой несливающегося типа – характерная реакция торфяников на современные изменения климата [24]. Широкое распространение несливающейся мерзлоты на обследованной территории является очевидным признаком неустойчивого состояния ММП.

Неоднократно отмечено, что современные климатические изменения вызывают рост температуры ММП [1–3]. В зоне островной мерзлоты на глубине нулевых амплитуд температура грунта увеличивается со средней скоростью $0,2$ °C за 10 лет [1]. В скважинах температура в период наблюдений (2019–2022) оставалась относительно стабильной, межгодовая изменчивость температуры не превышала $0,1$ °C (рис. 1). Причинами варьирования являются погодичные флуктуации температуры воздуха и количества снега. Так, на плоскобугристом торфянике, на котором размещена площадка CALM, в 2022 г., по сравнению с 2020–2021 гг., произошло снижение температуры ММП от $-0,1$ до $-0,2$ °C, как результат уменьшения высоты снежного покрова.

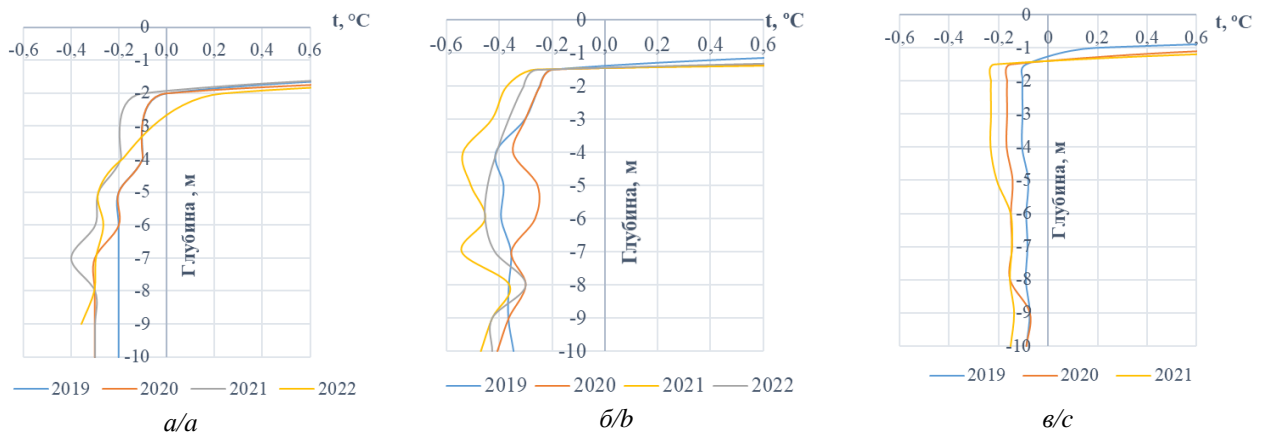


Рис. 1. Температурный режим грунта в скважинах: а) бугор пучения; б) крупнобугристый торфяник; в) плоскобугристый торфяник

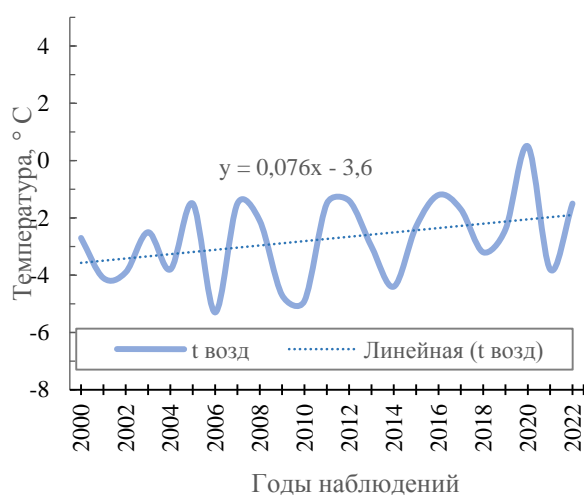
Fig. 1. Temperature regime of the soil in boreholes: a) pingo; b) high-mound palsamire; c) flat-mound palsamire

Небольшая продолжительность периода наблюдений не дает возможность достоверно определить тренд изменения температуры ММП. Поэтому целесообразно рассмотреть долгосрочные ряды наблюдений за температурой земной поверхности (LST) и приземного слоя атмосферного воздуха. Изменения средней приземной температуры воздуха в местах расположения наблюдательных геокриологических скважин аналогичны изменениям температуры вечной мерзлоты по направлению и порядку величины, поэтому могут быть использованы для прогноза динамики температурного режима ММП [1].

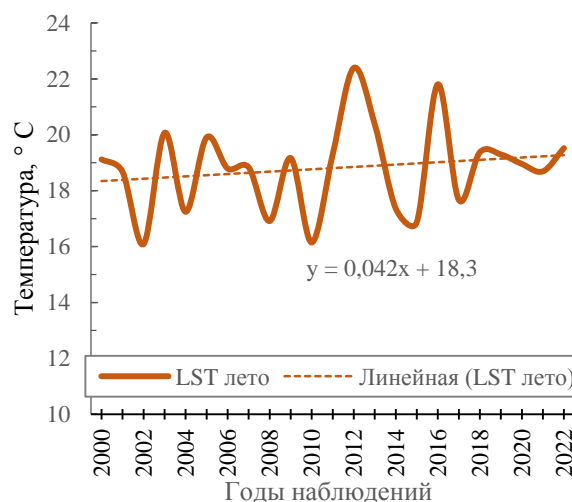
Обработка результатов метеонаблюдений и данных LST показала, что в районе исследований наблюдается устойчивый положительный тренд роста температур воздуха и поверхности грунта. Рост среднегодовой температуры воздуха в 2000–2022 гг. составил $0,76\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. Это значение примерно в 1,5 раза больше, чем средний темп роста температуры воздуха в России, составляющий $0,49\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет [25]. Наблюдается увеличение периода с положительными температурами воздуха. Если в 1970-х гг. он продолжался 135–140 дней – с середины мая до начала октября, то в 2020-х гг. его продолжительность увеличилась до 160–165 дней – с начала мая до середины октября. Температура поверхности возрастала слабее, в среднем на $0,42\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет (рис. 2). Также наблюдается рост количества осадков, в том числе снега. Глубина снежного покрова возрастает со средней интенсивностью $2,5\text{ см}/10$ лет. Рост глубины снежного покрова является фактором, ослабляющим зимнее промерзание и усиливающим риск деградации ММП [26].

Исследование взаимосвязи климатических показателей и распространения многолетней мерзлоты показало, что южная граница криолитозоны маркируется средними значениями климатических показателей: $\text{TDD} \leq 1353\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$, $\text{FDD} \leq -2442\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$, $\text{Fn} > 0,57$ [19]. Подсчеты аналогичных показателей для района исследований за 2019–2022 гг. выявили следующие значения: $\text{TDD} = 1848\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$, $\text{FDD} = -2547\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$, $\text{Fn} = 0,54$. Таким образом, только коэффициент FDD соответствует климатическим критериям, при которых возможно сохранение мерзлоты. Вероятно, это связано с довольно холодными зимами в условиях континентального климата. Остальные показатели соответствуют показателям территорий, где ММП отсутствуют. Исходя из положительного тренда температуры воздуха, таяние ММП в обследованном районе – только вопрос времени. В особенности интенсивным таяние может быть в годы с многоснежными зимами и высокими температурами воздуха в летний период.

Основываясь на моделировании теплопроводности почвы, М. Смит и Д. Райзборо [27] выявили, что на южной границе криолитозоны мерзлые торфяники сохраняются, если среднегодовая температура воздуха не превышает $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом случае поверхностный слой грунта имеет температуру на уровне $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Применение порогового уровня температуры воздуха $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ дает простой метод оценки максимальной продолжительности существования ММП под торфяниками при потеплении климата [28]. Простые арифметические подсчеты показывают, что, если тренд роста температур воздуха на последние два десятилетия ($0,76\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет) сохранится на прежнем уровне, пороговый уровень $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на обследованной территории будет достигнут приблизительно через 50 лет.



a/a



б/б

Рис. 2. Среднегодовая температура воздуха (a) и температура поверхности Земли (LST) в летний период (б); 2000–2022 гг.
Fig. 2. Annual air temperature (a) and Land Surface Temperature – LST (b) for the summer period; 2000–2022

При среднем уровне потепления $0,5^{\circ}/10$ лет, типичном для России, период существования обследованных мерзлых торфяников составит около 70 лет. Прогнозное моделирование температуры мерзлых торфяников в районе Надьма также показало, что при сохранении тенденции потепления будет происходить постепенное таяние ММП [29]. Прогнозируемое таяние требует принятия мер для предотвращения негативных последствий, таких как проведение геотехнического мониторинга, искусственное охлаждение оснований и фундаментов инженерных сооружений, внедрение новых методов строительства.

Заключение

Исследование температурного режима грунтов и метеорологических показателей на юге зоны островного распространения ММП в Западной Сибири выявило многочисленные предикторы таяния мерзлоты. Среднегодовая температура поверхностного слоя торфа была положительная во всех обследо-

ванных скважинах ($+ 0,8...+1,3$ °C). Температура торфяников на глубине нулевых теплооборотов близка к 0 °C, преобладает диапазон температур от $-0,2$ до $-0,3$ °C. Широко распространены ММП неслюющего типа, то есть в почве сформировался слой, не замерзающий в течение года. Значения коэффициентов протаивания TDD и морозности воздуха F_n соответствуют значениям в области с немерзлыми грунтами. Наблюдаются положительные тренды температуры воздуха, температуры поверхности Земли (LST) и высоты снежного покрова. За 2000–2022 гг. приземная температура воздуха в среднем увеличивалась на $0,76^{\circ}\text{C}/10$ лет. Температура поверхности Земли (LST) в летний период возрастала в среднем на $0,42$ °C/10 лет. При сохранении тенденции к росту температур приземного слоя воздуха мерзлые торфяники в южной части зоны островного распространения ММП растают через 50–70 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Permafrost is warming at a global scale / B.K. Biskaborn, S.L. Smith, J. Noetzi et al. // *Nature Communications*. – 2019. – № 10. – 264.
2. Оценка ущерба жилым и промышленным зданиям и сооружениям при изменении температур и оттаивании многолетнемерзлых грунтов в арктической зоне Российской Федерации к середине XXI века / В.П. Мельников, В.И. Осипов, А.В. Брушков, С.В. Бадина, Д.С. Дроздов, В.А. Дубровин, М.Н. Железняк, М.Р. Садуртдинов, Д.О. Сергеев, Н.А. Остарков, А.А. Фалалеева, Я.Ю. Шелков. // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. – 2021. – № 1. – С. 14–31.
3. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе Российской Арктики / А.А. Васильев, А.Г. Гравис, А.А. Губарьков, Д.С. Дроздов, Ю.В. Коростелев, Г.В. Малкова, Г.Е. Облогов, О.Е. Пономарева, М.Р. Садуртдинов, И.Д. Стрелецкая, Д.А. Стрелецкий, Е.В. Устинова, Р.С. Широков // *Криосфера Земли*. – 2020. – Т. 24. – № 2. – С. 15–30.
4. Shur Y.L., Jorgenson M.T. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2007. – Vol. 18. – № 1. – P. 7–19.
5. Permafrost thaw in northern peatlands: rapid changes in ecosystem and landscape functions / D. Olefeldt, L. Heffernan, M.C. Jones, A.B.K. Sannel, C.C. Treat, M.R. Turetsky // *Ecosystem Collapse and Climate Change. Ecological Studies* / Eds. J.G. Canadell, R.B. Jackson. – Cham: Springer, 2021. – Vol. 241. – P. 27–67.
6. Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 454 с.
7. Валеева Э.И., Московченко Д.В., Арефьев С.П. Природный комплекс парка «Нумто». – Новосибирск: Наука, 2008. – 280 с.
8. Болота Западной Сибири. Их строение и гидрологический режим / под ред. К.Е. Иванова, С.М. Новикова. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 447 с.
9. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под ред. С.М. Новикова. – СПб.: ВВМ, 2009. – 536 с.
10. Connecting biodiversity and human dimensions through ecosystem services: The Numto Nature Park in West Siberia Minayeva T.Y., Filippov I.V., Tysiachniouk M.S., Markina A.V., Kiselev S.B., Lapshina E.D., Sirin A.A. // *Ambio*. – 2021. – Vol. 50. – № 2. – P. 2009–2021.
11. Аветов Н.А., Кузнецов О.Л., Шишконокова Е.А. Опыт использования классификации и диагностики почв России в систематике торфяных почв биогеоценозов олиготрофных болот северотаежной подзоны Западной Сибири // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. – 2019. – № 4. – С. 37–47.
12. Растительная индикация термокарстовых образований бугристых болот в южной части парка Нумто (Западная Сибирь) / Е.А. Шишконокова, Н.А. Аветов, Т.Ю. Толпышева, А.А. Тарлинская // *Социально-экологические технологии*. – 2019. – № 1. – С. 27–57. DOI: <https://doi.org/10.31862/2500-2961-2019-9-1-27-57>.
13. Проявления регрессивных процессов на болотах южной части природного парка Нумто (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра) / Е.А. Шишконокова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический*. – 2016. – Т. 121. – № 3. – С. 39–50.
14. Кураков С.А. Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // *Датчики и системы*. – 2012. – № 4. – С. 29–32.
15. Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: historical perspectives and initial results // *Polar Geography*. – 2000. – Vol. 24. – P. 165–258.
16. ГОСТ 26262-2014. Грунты. Методы полевого определения глубины сезонного оттаивания. – М.: Стандартинформ, 2019. – 7 с.

17. USGS EarthExplorer (2022). URL: <https://earthexplorer.usgs.gov> (дата обращения 16.02.2024).
18. Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate / I. Esau, V. Miles, M. Varentsov, P. Konstantinov, V. Melnikov // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2019. – Vol. 137. – № 12. – P. 2513–2528.
19. Comparison of land skin temperature from a land model, remote sensing, and in situ measurement / A. Wang, M. Barlage, X. Zeng, C.S. Drapert // *Journal of Geophysical Researches: Atmospheres*. – 2014. – Vol. 119. – № 6. – P. 3093–3106.
20. Геоинформационный анализ климатических условий криолитозоны Европейского северо-востока России / Д.А. Каверин, Е.М. Лаптева, В.М. Щанов, А.В. Пастухов, Л.С. Шарая, П.А. Шарый // *Криосфера Земли*. – 2019. – Т. XXIII. – № 4. – С. 68–78.
21. Nelson F.E., Outcalt S.I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost // *Arctic, Antarctic and Alpine Researches*. – 1987. – Vol. 19 (3). – P. 279–288.
22. Lunardini V.J. Theory of n-factors and correlation of data // *Proc. 3rd International Conference on Permafrost*. – Edmonton, Alberta, National Research Council of Canada. Ottawa, 1978. – № 1. – P. 40–46.
23. Burn C.R. The thermal regime of cryosols // *Cryosols (Permafrost-affected soils)* / Ed. by J. Kimble. – Berlin, Heidelberg. New York: Springer-Verlag, 2004. – P. 391–414.
24. Особенности современного состояния криогенных ландшафтов Западной Сибири в зоне островного и прерывистого распространения мерзлоты / Д.С. Дроздов, Н.М. Бердников, А.Г. Гравис, А.А. Губарьков, О.Е. Пономарева, А.Г. Скворцов, Е.В. Устинова, А.Г. Царев // *Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике*. – Салехард, 03–12 ноября 2021. – С. 121–124.
25. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. – М.: Государственный гидрологический институт Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации, 2021. – 104 с. URL: <http://downloads.igce.ru/reports> (дата обращения 19.10.2023).
26. Вклад климатических факторов в формирование температурных режимов почв прерывистой криолитозоны северной тайги Западной Сибири / О.Ю. Гончарова, Г.В. Матьшак, А.А. Бобрик, Д.Г. Петров, М.О. Тархов, М.М. Удовенко // *Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева*. – 2017. – № 87. – С. 39–54.
27. Smith M.W., Riseborough D.W. Climate and the limits of permafrost: a zonal analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2002. – Vol. 13. – № 1. – P. 1–15.
28. Camill P. Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late 20th century climate warming // *Climatic Change*. – 2005. – Vol. 68. – № 1. – P. 135–152.
29. Observations and modelling of ground temperature evolution in the discontinuous permafrost zone in Nadym, north-west Siberia / E. Kukkonen, E. Suhonen, E. Ezhova, H. Lappalainen, V. Gennadinik, O. Ponomareva, A. Gravis, V. Miles, M. Kulmala, V. Melnikov, D. Drozdov // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2020. – Vol. 31. – № 2. – P. 264–280.

Информация об авторах

Дмитрий Валерьевич Московченко, доктор географических наук, главный научный сотрудник Института проблем освоения Севера ТюмНЦ СО РАН, Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86. <https://orcid.org/0000-0001-6338-7669>; moskovchenko1965@gmail.com

Анатолий Анатольевич Губарьков, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Субарктического научно-учебного полигона Тюменского индустриального университета, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38. agubarkov@rambler.ru

Артур Венерович Фахретдинов, младший научный сотрудник Института проблем освоения Севера ТюмНЦ СО РАН, Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86. <https://orcid.org/0000-0002-8975-9771>; arthurfahretdinov@gmail.com

Поступила в редакцию: 01.11.2023

Поступила после рецензирования: 04.12.2023

Принята к публикации: 09.09.2024

REFERENCES

1. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 2019, no. 10, 264.
2. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V., Badina S.V., Drozdov D.S., Dubrovin V.A., Zheleznyak M.N., Sadurtdinov M.R., Sergeev D.O., Ostarkov N.A., Falaleeva A.A., Shelkov Y.Yu. Damage assessment for residential and industrial buildings and structures due to temperatures change and permafrost thawing in the arctic zone of the Russian Federation by the middle of the XXI century. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2021, no. 1, pp. 14–31. (In Russ.)
3. Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A., Drozdov D.S., Korostelev Yu.V., Malkova G.V., Oblogov G.E., Ponomareva O.E., Sadurtdinov M.R., Streletskaya I.D., Streletskiy D.A., Ustinova E.V., Shirokov R.S. Permafrost degradation: results of the long-term geocryological monitoring in the western sector of Russian Arctic. *Earth's Cryosphere*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 15–30. (In Russ.)
4. Shur Y.L., Jorgenson M.T. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2007, vol. 18, no. 1, pp. 7–19.
5. Olefeldt D., Heffernan L., Jones M.C., Sannel A.B.K., Treat C.C., Turetsky M.R. Permafrost thaw in northern peatlands: rapid changes in ecosystem and landscape functions. *Ecosystem Collapse and Climate Change. Ecological Studies*. Eds. J.G. Canadell, R.B. Jackson. Springer, Cham, 2021. Vol. 241, pp. 27–67.
6. *Geocryology of the USSR. Western Siberia*. Ed. by E.D. Ersov. Moscow, Nedra Publ., 1989. 454 p. (In Russ.)

7. Valeeva E.I., Moskovchenko D.V., Arefev S.P. *Natural complex of the Numto Park*. Novosibirsk, Nauka Publ., 2008. 280 p. (In Russ.)
8. *Swamps of Western Siberia. Their structure and hydrological regime*. Eds. K.E. Ivanov, S.M. Novikov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1976. 447 p. (In Russ.)
9. *Hydrology of wetlands in the permafrost zone of Western Siberia*. Ed. by S.M. Novikov. St Petersburg, VVM Publ., 2009. 536 p. (In Russ.)
10. Minayeva T.Y., Filippov I.V., Tysiachniouk M.S., Markina A.V., Kiselev S.B., Lapshina E.D., Sirin A.A. Connecting biodiversity and human dimensions through ecosystem services: The Numto Nature Park in West Siberia. *Ambio*, 2021, vol. 50, no. 2, pp. 2009–2021.
11. Avetov N.A., Kuznetsov O.L., Shishkonakova E.A. Experience in the use of russian soil classification and diagnosis in the systematics of peat soils of oligotrophic bogs in the north taiga subzone of West Siberia. *Moscow University Bulletin. Series 17. Soil Science*, 2019, no. 4, pp. 37–47. (In Russ.)
12. Shishkonankova E.A., Avetov N.A., Tolpysheva T.Yu., Tarlinskaya A.A. Plant indication of thermocarst forms in palsa mires in the south of nature park Numto (West Siberia). *Socialno-ecologicheskie Tekhnologii*, 2019, no. 1, pp. 27–57. (In Russ.)
13. Shishkonakova E.A., Avetov N.A., Berezina N.A., Tolpysheva T.Yu., Shvedchikova N.K. Manifestation of regressive processes in mires of south part of Numto nature park (Khanty-Mansi Autonomous okrug – Yugra). *Bulletin of Moscow Society of naturalists. Biological Series*, 2016, vol. 121, no. 3, pp. 39–50. (In Russ.)
14. Kurakov S.A. Environmental condition autonomous monitoring system. *Datchiki & Systemi (Sensors & Systems)*, 2012, no. 4, pp. 29–32. (In Russ.)
15. Brown J., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: historical perspectives and initial results. *Polar Geography*, 2000, vol. 24, pp. 165–258.
16. *SS 26262-2014. Soils. Methods for field determination of the depth of seasonal thawing*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 7 p.
17. *USGS EarthExplorer* (2022). Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov> (accessed 16 February 2024).
18. Esau I., Miles V., Varentsov M., Konstantinov P., Melnikov V. Spatial structure and temporal variability of a surface urban heat island in cold continental climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, vol. 137, no. 12, pp. 2513–2528.
19. Wang A., Barlage M., Zeng X., Drapert C.S. Comparison of land skin temperature from a land model, remote sensing, and in situ measurement. *Journal of Geophysical Researches: Atmospheres*, 2014, vol. 119, no. 6, pp. 3093–3106.
20. Kaverin D.A., Lapteva E.M., Shchanov V.M., Pastukhov A.V., Sharaya L.S., Shary P.A. Climatic geoinformation analysis of the cryolithozone in the northeast of European Russia. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. 23, no. 4, pp. 68–78. (In Russ.)
21. Nelson F.E., Outcalt S.I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost. *Arctic, Antarctic and Alpine Researches*, 1987, vol. 19, no. 3, pp. 279–288.
22. Lunardini V.J. Theory of n-factors and correlation of data. *Proc. of the 3rd International Conference on Permafrost*. Edmonton, Alberta, National Research Council of Canada, Ottawa, 1978. No. 1, pp. 40–46.
23. Burn C.R. The thermal regime of cryosols. *Cryosols (Permafrost-affected soils)*. Ed. by J. Kimble. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 2004. pp. 391–414.
24. Drozdov D.S., Berdnikov N.M., Gravis A.G., Gubarkov A.A., Ponomareva O.E., Skvortsov A.G., Ustinova E.V., Tsarev A.M. Features of the current state of cryogenic landscapes of Western Siberia in the zone of insular and intermittent permafrost distribution. *Modern research into the transformation of the cryosphere and issues of geotechnical safety of structures in the Arctic. Proc. of the Conference*. Salekhard, 2021. pp. 121–124. (In Russ.)
25. *Report on climate features on the territory of the Russian Federation in 2022*. Moscow, 2023. (In Russ.) Available at: <http://downloads.igce.ru/reports> (accessed 19 October 2023).
26. Goncharova O.Yu., Matyshak G.V., Bobrik A.A., Petrov D.G., Tarhov M.O., Udovenko M.M. The input of the climatic factors in the temperature regime of soils of discontinuous permafrost of northern taiga of Western Siberia. *Byulleten Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*, 2017, vol. 87, pp. 39–54. (In Russ.)
27. Smith M.W., Riseborough D.W. Climate and the limits of permafrost: a zonal analysis. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2002, vol. 13, no. 1, pp. 1–15.
28. Camill P. Permafrost thaw accelerates in boreal peatlands during late-20th century climate warming. *Climatic Change*, 2005, vol. 68, no. 1, pp. 135–152.
29. Kukkonen E., Suhonen E., Ezhova E., Lappalainen H., Gennadinik V., Ponomareva O., Gravis A., Miles V., Kulmala M., Melnikov V., Drozdov D. Observations and modelling of ground temperature evolution in the discontinuous permafrost zone in Nadyem, north-west Siberia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2020, vol. 31, no. 2, pp. 264–280.

Information about the authors

Dmitrii V. Moskovchenko, Dr. Sc., Principal Researcher, Tyumen Scientific Center SB RAS, 86, Malygin street, Tyumen, 625026, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0001-6338-7669>; moskovchenko1965@gmail.com
Anatoly A. Gubarkov, Cand. Sc., Senior Researcher, Industrial University of Tyumen, 38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russian Federation. agubarkov@rambler.ru
Artur V. Fakhretdinov, Junior Researcher, Tyumen Scientific Center SB RAS, 86, Malygin street, Tyumen, 625026, Russian Federation. <https://orcid.org/0000-0002-8975-9771>; arthurfahretdinov@gmail.com

Received: 01.11.2023

Revised: 04.12.2023

Accepted: 09.09.2024