

ГЕОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОСФЕРЕ

УДК 551.525.5 (551.345)

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(23-33)

**ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА
ПОЧВОГРУНТОВ НА УЧАСТКЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ БУТРИСТОГО ТОРФЯНИКА
АВТОДОРОГОЙ НА ЮГЕ БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ ТУНДРЫ****Д.А. Каверин, А.В. Пастухов, А.Б. Новаковский***Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия; dkav@mail.ru*

Исследованы особенности современного температурного режима антропогенно-трансформированных и ненарушенных многолетнемерзлых почвогрунтов на участке пересечения бугристого болота автодорогой Усинск–Харьяга с частично разрушенным цементно-бетонным покрытием. Для оценки характера температурного режима почвогрунтов исследования проводили на южном пределе криолитозоны в Большеземельской тундре в период относительно высоких температур воздуха (2015–2018 гг.). Для измерений температуры почвогрунтов бугристого болота и придорожного понижения пробурили две 10-метровые термоскважины. При исследовании температурной динамики тела дорожной насыпи в качестве ее модели использовали сходную по основным характеристикам насыпную песчаную площадку высотой 5 м. Исследования показали, что строительство насыпной автодороги на южном пределе европейского Северо-Востока России способствует существенной дифференциации температурных условий антропогенно-трансформированных почвогрунтов. Нарушение условий строительства и дальнейшая эксплуатация автодороги в условиях продолжающегося климатического потепления привели к значительному повышению температуры почвогрунтов и частичному разрушению дорожного полотна.

Температурный режим почвогрунтов, автодорога, бугристое болото, изменение климата, многолетнемерзлые породы

**SPECIFICITY OF THE PRESENT-DAY SOIL TEMPERATURE REGIME
IN A PEAT PLATEAU (SOUTHERN PART OF BOLSHEZEMELSKAYA TUNDRA)
AT LOCATIONS CROSSED BY REGIONAL HIGHWAY****D.A. Kaverin, A.V. Pastukhov, A.B. Novakovsky***Institute of Biology, Komi Scientific Center UB RAS,
28, Kommunisticheskaya str., Syktyvkar, 167982, Russia; dkav@mail.ru*

The study investigates characteristics of the present-day temperature regime of anthropogenically transformed and virgin permafrost-affected soils of the peat plateau at a location crossed by the Usinsk–Kharyaga highway with its concrete surface partially destroyed. To assess the specifics of soil temperature regime, the research was carried out in 2015–2018 at the southern limit of permafrost in the Bolshezemelskaya tundra during periods of relatively high air temperatures. Soil temperatures of the peat plateau and a roadside hollow were measured in two 10-meter thermal boreholes. To study the temperature dynamics of the roadway embankment, a 5-meter high site backfilled with stockpiled sand with rather similar basic characteristics, was used as its model. Results of the study have revealed that construction of a road embankment on the southern permafrost limit in the Russian European Northeast entails a significant temperature differentiation of anthropogenically transformed soils. Violations of building codes and further road operation under ongoing climate warming have led to a significant soil temperature increase and partial roadbed destruction.

Soil temperature regime, road, peat plateau, climate change, permafrost

ВВЕДЕНИЕ

Особенности воздействия автомобильных дорог на температурное состояние многолетнемерзлых пород (ММП) хорошо известны [Цытович, 1973; Геокриология..., 1988]. В нашей стране при изысканиях, проектировании и строительстве автомобильных дорог общего пользования в криолитозоне применяются нормы, предписанные в

ВСН 84-89 [1990]. Тем не менее строительство и эксплуатация насыпных автомобильных дорог меняет естественный режим промерзания и протаивания почв [Smith et al., 2005], что обуславливает значительные горизонтальные и вертикальные смещения почвогрунтов [Brown, 1967; Hinkel et al., 2003]. Снижение устойчивости и разрушение до-

рожного полотна происходят в результате повышения температуры грунтов основания, вызывающего их оттаивание. Анализ деформаций автомобильных дорог в условиях высокотемпературной криолитозоны актуален в современных инженерно-геокриологических исследованиях [Кондратьев, Соболева, 2009; Дроздов, Шабуров, 2015].

Климатические изменения последних десятилетий способствуют повышению температуры антропогенно-трансформированных почвогрунтов, что вызывает деформацию дорожного полотна в результате активизации термокарстовых процессов [Fortier et al., 2011].

Субарктический сектор европейского Северо-Востока с высокотемпературной криолитозонной – один из особо чувствительных к происходящим климатическим изменениям регионов России [Павлов, Малкова, 2010]. При освоении углеводородных месторождений на европейском Севере строительство автодорог различных категорий является одним из главных факторов антропогенного воздействия на тундровые экосистемы и ММП [Ананьева (Малкова), 1997; Гребенец, Исаков, 2016]. Неполное соблюдение технологии строительства автодорог в условиях распространения высокотемпературных ММП и современного климатического потепления способствует деформациям дорожного полотна. Кроме того, недостаточное финансирование транспортной инфраструктуры в регионе ограничивает возможности ремонтных работ, в результате покрытие региональных автомобильных дорог часто находится в неудовлетворительном состоянии.

Для оценки теплового состояния грунтов автодорог в области криолитозоны необходимо проведение геотермических измерений в оборудованных скважинах [<http://transportrussia.ru/avtomobilnye-dorogi/doroga-na-merzlote.html>]. Исследования температурного поля грунтов дорожных насыпей Большеземельской тундры проводились на основе моделирования, но не были подкреплены полевыми данными [Исаков, 2014]. Модельные расчеты показали, что в основании склонов дорожных насыпей должны развиваться неглубокие несквозные талики.

Цель настоящей работы – анализ особенностей дифференциации температурного режима почвогрунтов на участке пересечения многолетнемерзлого бугристого болота насыпной автодорогой с частично разрушенным цементно-бетонным покрытием, функционирующей в условиях современного климатического потепления на южном пределе высокотемпературной криолитозоны европейского Севера России. Рассмотрены температурные режимы антропогенно-трансформированных (придорожное понижение и дорожная насыпь) и ненарушенных участков (бугристый торфяник).

Настоящая работа имеет прикладное значение при эксплуатации автомобильных дорог на южном пределе распространения ММП, ее результаты актуальны при проведении современных инженерно-геокриологических исследований. Статья является продолжением ранее проведенных на данном участке георадиолокационных исследований, в результате которых было установлено, что строительство и эксплуатация насыпной автодороги с твердым цементно-бетонным покрытием на бугристых болотах в южной части криолитозоны способствует значительному опусканию кровли ММП. Протаивание и заглупление кровли ММП зафиксировано в придорожной полосе шириной до 50 м, достигая максимума (до 8 м) в придорожных понижениях [Каверин и др., 2018].

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Территория исследований относится к бассейну р. Колва (Ненецкий автономный округ). Этот район расположен на границе южной тундры и лесотундры с массивно-островным распространением ММП мощностью 0–100 м и температурами почвогрунтов в диапазоне +1...–1 °С [Геокриологическая карта..., 1996]. Исследуемый участок находится на территории с повсеместным протаиванием ММП с поверхности [Оберман, Шеслер, 2009]. В соответствии со схемой дорожно-климатических районов криолитозоны территория относится к южному району высокотемпературных вечномерзлых грунтов островного и частично сплошного распространения [Давыдов, 1979]. Данный участок относится к 3-му типу местности с грунтами 3-й и 4-й категорий просадочности. По сложности мерзлотно-грунтовых условий он является особо сложным [ВСН 84-89, 1990]. На поверхности почв бугристых торфяников хорошо выражен микрорельеф, широко развиты оголенные торфяные пятна, распространены мочажины и озера.

Территория характеризуется умеренно континентальным умеренно холодным климатом. В районе исследований среднегодовое количество осадков в период 2000–2016 гг. составило 475 ± 98 мм (по данным ближайшей метеостанции Хоседа-Хард). За последние 50 лет здесь значительно увеличилась среднегодовая температура воздуха, что фиксируется по статистически значимым ($p < 0.01$) ее изменениям (рис. 1). При этом среднее за так называемый фоновый период (1960–1990 гг.) значение среднегодовой температуры воздуха составило -5.1 ± 1.5 °С, тогда как в 2000–2018 гг. этот показатель повысился до -3.6 ± 1.2 °С (данные метеостанции Хоседа-Хард). В гидрологическом 2017/18 году среднегодовая температура воздуха на участке исследований, по данным установленного температурного логгера,

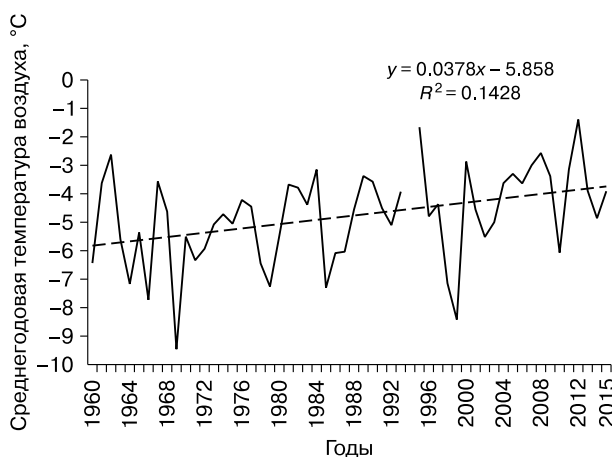


Рис. 1. Изменение среднегодовой температуры воздуха по данным метеостанции Хоседа-Хард в 1960–2015 гг.



Рис. 2. Географическое положение объектов исследования.

1 – скважина и ее номер; 2 – автодорога.

составила -1.4°C , сумма положительных температур воздуха $1156^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$, сумма отрицательных температур воздуха $-2067^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$.

Температурный режим почвогрунтов исследовался в 2015–2018 гг. в трех скважинах (рис. 2, табл. 1). Скважины 1 и 2 расположены на участке пересечения автодорогой Усинск–Харьяга крупного массива многолетнемерзлых бугристых болот. Мощность торфа в условиях ненарушенных

бугристых торфяников около 3.5 м (рис. 3). Автодорога имеет статус региональной и используется преимущественно предприятиями нефтедобывающей промышленности. В настоящее время она включена в проект строящейся федеральной автодороги Сыктывкар–Нарьян-Мар [<https://regnum.ru/news/2423624.html>]. Общая длина автодороги – 164 км, большая часть трассы покрыта цементно-бетонными плитами.

Таблица 1. Характеристика объектов исследования

Номер скв.	Элемент рельефа	Координаты	Характеристика ландшафта	Макс. высота растит. яруса, см	Глубина кровли ММП, м	Средняя мощность снега, м	Объемная влажность верхнего (10 см) слоя почв*, %	Название профиля почвы**
1	Бугристое болото	67°01' с.ш., 56°54' в.д.	Вершина торфяного бугра. Ерниково-травянисто-моховое сообщество (30–40 см): <i>Betula nana</i> , <i>Ledum</i> sp., <i>Rubus chamaemorus</i> , <i>Vaccinium vitis-idaea</i> , <i>Cladonia</i>	27 ± 15	0.4	0.2	18	Торфяная олиготрофная мерзлотно-тая почва (степень разложения торфа 35–40 %)
2	Придорожное понижение	67°01' с.ш., 56°54' в.д.	Ивняк травяно-ерниковый: <i>Salix glauca</i> , <i>Chamerion</i> sp., <i>Trifolium</i> sp., <i>Equisetum arvense</i>	65 ± 21	9.0	1.3	35	Эмбриозем слоистый глеевый на насыщенном слоистом супесчаном грунте (содержание физической глины 12 %)
3	Насыпная площадка – аналог дорожной насыпи	67°09' с.ш., 56°47' в.д.	Растительный покров разреженный: <i>Chamerion</i> sp., <i>Equisetum arvense</i>	15 ± 10	3.0–4.0	0.2	10	Насыпные песчаные грунты (содержание физической глины до 10 %)

* На дату: 23.08.2018 г.

** По: [Классификация..., 2004; Герасимова и др., 2019].

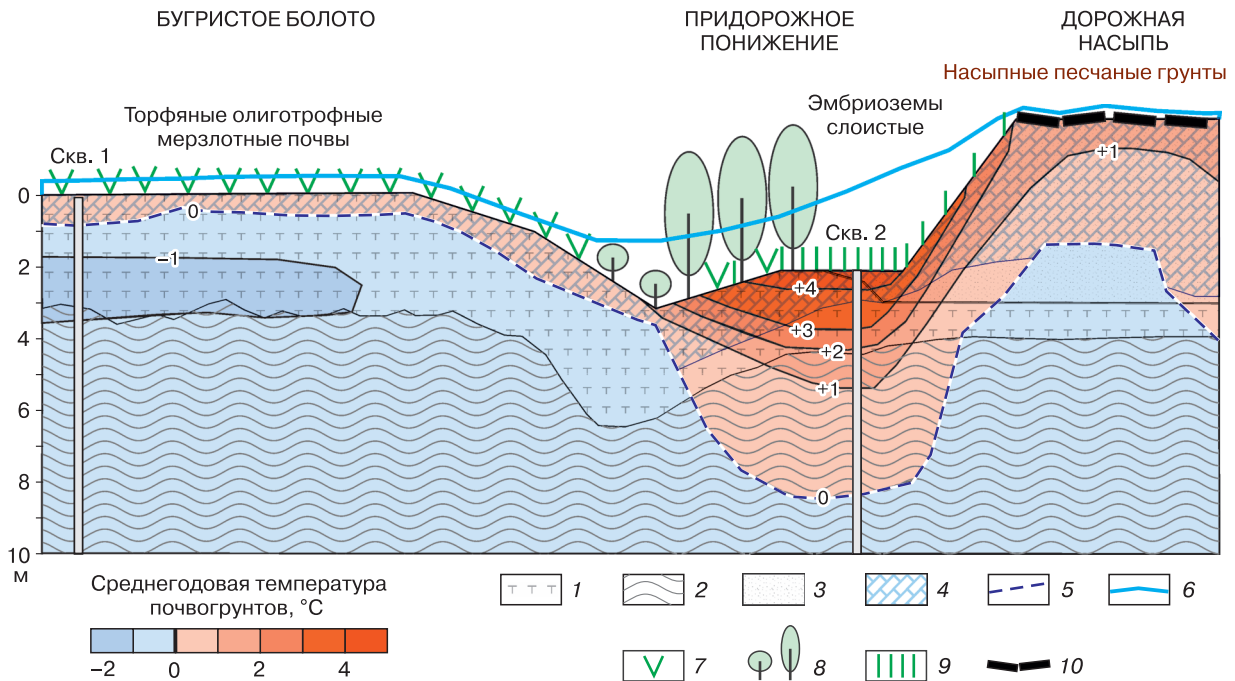


Рис. 3. Комплексный физико-географический профиль по линии “бугристое болото – насыпь автодороги”:

1 – торф; 2 – суглинки; 3 – насыпные материалы; 4 – сезонномерзлый слой; 5 – кровля многолетнемерзлых пород; 6 – снежный покров; 7 – мохово-лишайниково-кустарничковая растительность; 8 – ивняки травяно-моховые; 9 – разреженная травянистая растительность; 10 – цементно-бетонные плиты.

Для бурения термоскважин 1 и 2 и проведения в них температурного мониторинга в рамках реализуемых научных проектов Институтом биологии Коми НЦ УрО РАН получено разрешение № 4571/07 (25.11.2014) от ГКУ Архангельской области “Архангельскавтодор”. Для исследования температурного режима в толще дорожной насыпи, где бурение запрещено, использовалась скважина 3, ранее пробуренная в теле насыпной песчаной площадки (см. рис. 2, табл. 1). Скважина глубиной 4 м находится на территории нефтяного месторождения в районе вахтового поселка Харьяга, расположенного в 18 км к северо-западу от скважин 1, 2. Насыпная площадка имеет сходство с насыпью автодороги Усинск–Харьяга по следующим характеристикам: сложена песчаными почвогрунтами высотой 5 м; растительный покров фрагментарный; верхний органогенный горизонт отсутствует; снег зимой расчищается. Насыпная площадка была использована в качестве модели дорожной насыпи, а температурные условия скв. 3 взяты для сравнительного анализа.

Бугристое болото характеризуется преобладанием торфяных олиготрофных мерзлотных почв [Классификация..., 2004; Полевой определитель..., 2008]. В придорожном понижении развиты эмбриоземы слоистые глееватые [Герасимова и др.,

2019]. Насыпная площадка, как и дорожная насыпь, сложена песчаными насыпными грунтами.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОЧВОГРУНТОВ

Названия почв и индексы горизонтов даны по классификации антропогенных почв [Герасимова и др., 2019], “Классификации и диагностики почв России” [2004], “Полевому определителю почв России” [2008]. Термин “почвогрунты” здесь используется для обозначения единой толщи почв и подстилающих их пород общей мощностью 2–10 м [Пармузин, Карпов, 1994]. Температура измерялась цифровыми логгерами НОВО U-12-008, запрограммированными на 8 измерений в сутки. В пределах почвенных профилей были установлены датчики логгеров ТМС6-НД на глубинах 0, 0,2, 0,5, 1,0 м, в подстилающих породах – датчики ТМС20-НД на глубинах 2,0, 3,0, 5,0, 10,0 м. В грунтах насыпной площадки датчики логгеров были установлены на глубинах 0, 0,2, 1,0, 2,0 и 3,0 м. Точность измерения датчиков температурных логгеров НОВО составляет $\pm 0,1$ °С. В почве датчики логгеров были закреплены на деревянной рейке, погруженной в микроскважину (отверстие) диаметром 2 см и глубиной 100 см. В подстилаю-

щих породах датчики логгеров были погружены в скважины глубиной 10 м (скв. 1, 2) и 3.0 м (скв. 3), выполненные в виде стальных труб диаметром 7 см. К верхней части трубы был прикреплен стальной оголовок для размещения температурного логгера. Измерение температуры воздуха в 2017–2018 гг. проводили с помощью логгера НОВО Water Pro, установленного на высоте 2 м в 40 м к западу от скв. 1.

Измерения мощности сезонноталого слоя (СТС) (3-я декада августа) и снежного покрова (3-я декада марта) были выполнены градуированным металлическим зондом. В августе 2018 г. на участках исследований была определена объемная влажность верхнего горизонта почв (0–10 см) с помощью портативного влагомера HH2 Delta-T с сенсором ML3 Theta Probe (точность до 0.1 %).

Скорость затухания сезонных температурных колебаний в почвогрунтах оценена на основе изменений величин стандартного отклонения массивов температурных данных на разных глубинах.

В качестве аппроксимирующей функции для изменения значений стандартных отклонений использовалась экспоненциальная функция вида

$$y = a \exp(bx), \quad (1)$$

которая является упрощенным решением общего дифференциального уравнения теплопроводности Фурье [Полякова, Кашарин, 2004]. Здесь a – начальное значение стандартного отклонения на глубине 0 см, °С; b – скорость изменения значений стандартного отклонения с глубиной, %/см; x – глубина размещения температурного датчика, см.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зимний температурный режим почв. Сезонное промерзание верхней части почвогрунтов начинается в октябре с приходом устойчивых отрицательных температур воздуха (рис. 4). Почвогрунты бугристого болота и насыпной площадки характеризуются значительным зимним промер-

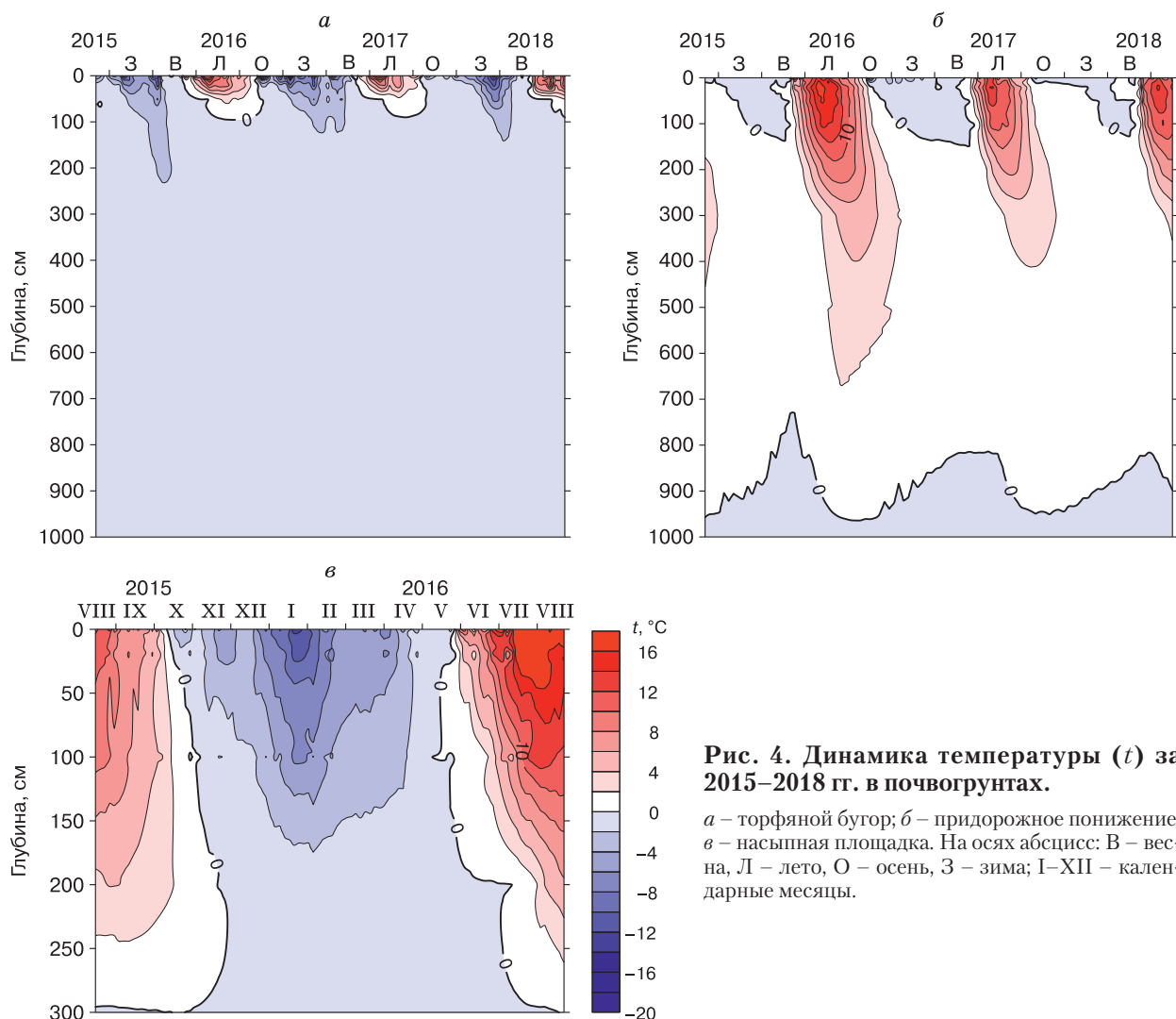


Рис. 4. Динамика температуры (t) за 2015–2018 гг. в почвогрунтах.

a – торфяной бугор; b – придорожное понижение; v – насыпная площадка. На осях абсцисс: В – весна, Л – лето, О – осень, З – зима; I–XII – календарные месяцы.

занием в связи с маломощным снежным покровом, так как с бугров снег выдувается, а на насыпной площадке производится очистка от снега. Глубокому сезонному промерзанию почвогрунтов этих участков способствует повышенная теплопроводность мерзлых отложений [Алексютина, Мотенко, 2017]: в бугристых торфяниках – высокольдистых многолетнемерзлых торфяных горизонтов, на насыпной площадке – песчаной толщи. Отсутствие или малая мощность снега способствует значительному зимнему охлаждению почвогрунтов поверхности автодорог [M-Lepage et al., 2012]. Грунты насыпной площадки характеризуются глубоким зимним промерзанием, при этом сезонная мерзлота сливается с многолетней на глубине 3 м.

Почвогрунты придорожного понижения, где формируется мощный снежный покров (до 1.5 м и более), сильно отличаются по зимнему температурному режиму от почв других участков. Почвы придорожного понижения промерзают очень медленно, на глубине 20 см отрицательные температуры зафиксированы в конце декабря, на глубине 50 см – в конце января. На глубине 100 см в период с февраля по май наблюдались только околону-

левые отрицательные температуры. В целом отрицательные температуры (0...–2 °С) зафиксированы в верхнем 1.5-метровом слое почвогрунтов придорожного понижения. Горизонты подстилающих пород в пределах глубин 1.5–8 м находятся в постоянном талом состоянии, формируя глубокий несквозной талик. Нулевая изотерма в почвогрунтах придорожного понижения проходит значительно ниже расчетных значений, определенных для территории Большеземельской тундры [Исаков, 2014]. Это объясняется недооценкой эффекта снегонакопления в основании дорожной насыпи и смягчением климатических условий в последние десятилетия. Избыточное снегонакопление вблизи земляного полотна происходит в результате метелевой деятельности и расчистки автодороги от снега. Зимнее охлаждение толщи насыпных почвогрунтов понижений не компенсирует летнее прогревание, что в итоге приводит к значительному опусканию кровли ММП. Суммы отрицательных температур верхнего слоя почвогрунтов (глубина 0–1 м) бугристого болота и насыпной площадки значительно больше таковых для придорожного понижения (табл. 2).

Таблица 2. Основные температурные параметры исследуемых почвогрунтов на гидрологический год

Гидрологический год	Параметр	Глубина, см							
		0	20	50	100	200	300	500	1000
<i>1. Бугристое болото</i>									
2015/16	<i>FDD</i>	–1006	–542	–338	–258	–349	–352	–309	–286
	<i>DDT</i>	1520	731	100	0	0	0	0	0
	$T_{\text{год}}$	1.4	0.5	–0.7	–0.7	–1.0	–1.0	–0.8	–0.8
2016/17	<i>FDD</i>	–1493	–733	–449	–268	–315	–322	–286	–274
	<i>DDT</i>	1583	717	108	0	0	0	0	0
	$T_{\text{год}}$	0.2	–0.3	–1.1	–0.8	–0.9	–0.9	–0.8	–0.7
2017/18	<i>FDD</i>	–1111	–563	–338	–213	–271	–297	–280	–280
	<i>DDT</i>	1355	1126	77	0	0	0	0	0
	$T_{\text{год}}$	0.7	1.5	–0.7	–0.6	–0.7	–0.8	–0.8	–0.8
<i>2. Придорожное понижение</i>									
2015/16	<i>FDD</i>	–101	–35	–9	–7	0	0	0	–55
	<i>DDT</i>	1851	1646	1530	1416	1070	632	0	0
	$T_{\text{год}}$	4.8	4.4	4.2	3.9	2.9	1.7	Не опр.	–0.2
2016/17	<i>FDD</i>	–337	–143	–74	–28	0	0	0	–56
	<i>DDT</i>	1454	1330	1236	1145	1018	755	5	0
	$T_{\text{год}}$	2.8	3.0	2.9	2.7	2.4	1.8	0.5	–0.2
2017/18	<i>FDD</i>	–108	–19	–2	–4	0	0	0	–46
	<i>DDT</i>	1307	1308	1244	1162	892	541	244	0
	$T_{\text{год}}$	3.3	3.5	3.4	3.2	2.4	1.5	0.7	–0.1
<i>3. Насыпная площадка</i>									
2015/16	<i>FDD</i>	–1097	–942	Не опр.	–552	–83	–30	Не опр.	Не опр.
	<i>DDT</i>	1468	1330	Не опр.	830	292	0	Не опр.	Не опр.
	$T_{\text{год}}$	1.0	1.1	Не опр.	0.8	0.6	–0.1	Не опр.	Не опр.

Примечание. *FDD* – суммы отрицательных температур, °С-сут; *DDT* – суммы положительных температур, °С-сут; $T_{\text{год}}$ – среднегодовые температуры, °С.

В почвах бугристого болота минимальные температуры сезонномерзлых горизонтов (0–50 см) зафиксированы в январе–марте, в подстилающих многолетнемерзлых породах на глубинах 1–2 м – в марте–апреле, на глубинах 3–5 м – в апреле–июне (см. рис. 4). В верхних горизонтах (0–20 см) эмбриозема придорожного понижения минимальные температуры отмечены в январе, тогда как на глубинах 50–100 см этот период смещается к февралю–апрелю. В подстилающих породах (глубже 1 м) минимальные температуры наблюдаются в мае. Значительное смещение температурных минимумов с глубиной в почвогрунтах придорожного понижения связано с теплоизоляционным действием мощного снежного покрова. На насыпной площадке период минимальных температур зафиксирован в январе–феврале во всей исследуемой толще почвогрунтов.

Летний температурный режим почв. Активное сезонное протаивание исследуемых почвогрунтов начинается в мае. В конце мая в торфяной почве бугристого болота протаивают верхние 20 см, в грунтах насыпной площадки – 50 см, а в эмбриоземе придорожного понижения оттаивает верхний метровый слой. В отличие от зимнего, по летнему температурному режиму почвогрунты придорожного понижения и насыпной площадки схожи. Они характеризуются быстрым и глубоким летним прогреванием, тогда как почва бугристого торфяника протаивает медленно и неглубоко (см. рис. 4).

На поверхности почв суммы положительных температур участков сопоставимы, с глубиной различия по данным показателям существенно возрастают (см. табл. 2). Максимальные значения сумм положительных температур характерны для почвогрунтов придорожного понижения (см. табл. 2). В меньшей степени прогревается насыпная площадка, суммы положительных температур которой резко уменьшаются с глубиной по мере приближения к кровле ММП. Суммы положительных температур почвогрунтов зависят от их литологического состава, ландшафтного положения участка и от типа почвенно-растительного покрова [Bertoldi et al., 2010].

Наибольшие температуры на поверхности почв зафиксированы в июне–июле, с глубиной период температурных максимумов смещается (см. рис. 4). В многолетнемерзлых породах бугристого болота на глубине 1–3 м максимальные (в отрицательном диапазоне) температуры наблюдались в декабре. На глубине 5 м период максимальных температур более продолжителен и приходится на зимние месяцы. В верхнем метровом слое почвогрунтов придорожного понижения и насыпной площадки максимальные температуры отмечены в июле–августе. В почвогрунтах придорожного понижения на глубине 2 м максимальные температу-

ры зафиксированы в августе–сентябре, на глубине 5 м – в сентябре–октябре. В грунтах насыпной площадки на глубине 2–3 м период максимальных температур практически не сдвигается (август–сентябрь).

Глубокому прогреванию почвогрунтов придорожного понижения способствуют несколько факторов: относительно слабое зимнее промерзание почв (см. табл. 2); накопление почвенной влаги при ее стоке с дорожной насыпи (см. табл. 1); легкий гранулометрический состав насыпных отложений (содержание физической глины $15 \pm 2\%$); отсутствие выраженного поверхностного органогенного горизонта (мощность 1 см).

Известно, что при нагреве поверхности откосов насыпи максимальное прогревание почвогрунтов происходит у подножий насыпей, где мощность насыпных грунтов минимальная [Исаков, 2014]. При этом наибольшее протаивание в основаниях откосов насыпи увеличивает риск снижения устойчивости земляного полотна и служит причиной его неравномерных деформаций [Дроздов, Шабуров, 2015].

Глубокое прогревание грунтов насыпной площадки обусловлено отсутствием растительного покрова, верхнего органогенного горизонта и значительным дренажом насыпных песков. В отличие от площадки, наличие бетонных плит на автодороге способствует дополнительному нагреву поверхности грунтов дорожной насыпи. В результате “накопления” тепла в придорожных понижениях и контрастного температурного режима дорожных насыпей кровля ММП под автодорогами приобретает W-образную форму.

При строительстве насыпной автодороги в районе, где ММП сохраняются преимущественно в контурах бугристых болот, происходит их глубокое протаивание. Это объясняется нарушением экосистемной защиты многолетней мерзлоты, происходящей из-за разрушения почвенно-растительного покрова бугристых болот [Shur, Jorgenson, 2007]. В результате кровля ММП остается “незащищенной” для относительно теплых современных климатических условий, неблагоприятных для сохранения многолетней мерзлоты вне экосистем бугристых болот.

Годовые показатели температурного режима почв. Статистический анализ показал, что вниз по профилю почвогрунтов сезонные колебания температуры затухают, достигая нулевых значений на глубине от 2.5 до 10 м. Максимально быстрое затухание температурных колебаний наблюдается в почвогрунтах бугристого болота и, согласно модели (1), составляет 2.9%/см. Это в 3–5 раз быстрее, чем в почвогрунтах антропогенно-трансформированных участков (табл. 3, рис. 5). Быстрое затухание температурных колебаний в почвах торфяников связано с наличием мощной торфяной залежи,

Таблица 3. Параметры экспоненциальной модели, описывающей зависимость стандартного отклонения температуры от глубины

Участок	Коэффициент в формуле (1)		R^2	F
	a	b		
Бугристое болото	9.186**	-2.9**	0.992	747.1
Придорожное понижение	6.709**	-0.5**	0.984	378.2
Насыпная площадка	9.769**	-0.8*	0.977	127.8

* Коэффициент является значимым на уровне $p < 0.01$.

** На уровне $p < 0.001$.

Примечание. a – начальное значение экспоненты, °C; b – скорость затухания сезонных колебаний температуры с глубиной, %/см; R^2 – коэффициент детерминации (общая доля дисперсии, объясненная моделью); F – значение критерия Фишера согласованности модели.

действующей как эффективный теплоизолятор в теплую половину года [Геокриология..., 1988]. Медленнее всего температурные колебания затухают в талике придорожного понижения (см. табл. 3, рис. 5), что объясняется повышенной теплопроводностью насыпных почвогрунтов придорожного понижения. В данных условиях погребенные на глубине 1.6–3.0 м горизонты торфяной залежи уже не выполняют функции эффективного теплоизолятора.

Общий диапазон среднегодовых температур СТС участка бугристого болота составил +1.5...–1.1 °C (см. табл. 2). Данные показатели в целом характерны для мерзлотных почв региона, функционирующих в южной части криолитозоны [Мажитова, 2008]. Положительная среднегодовая температура в сезонноталом слое мерзлотных почв является одним из признаков деградации мерзлоты [Burn, 2004]. Подстилающие ММП характеризуются относительно высокими среднегодовыми температурами в диапазоне –0.6...–1.0 °C. Высокотемпературные ММП в южной части криолитозоны являются достаточно уязвимыми при климатическом потеплении. Согласно адаптированной для региона модели GIPL2, разработанной в Университете Аляски, прогнозируется, что к середине XXI в. на участках исследований будут преобладать почвогрунты со среднегодовой температурой 0...+0.5 °C [Stendel et al., 2011]. Многолетнемерзлые породы со среднегодовыми температурами (–0.5...0 °C) в слое нулевых оборотов сохранятся только в изолированных условиях под ненарушенными бугристыми торфяниками [Ривкин и др., 2017].

Почвогрунты придорожного понижения характеризуются наиболее высокими, преимущественно положительными, среднегодовыми температурами (см. табл. 2), что связано с повышенными температурами в течение всего года. Согласно

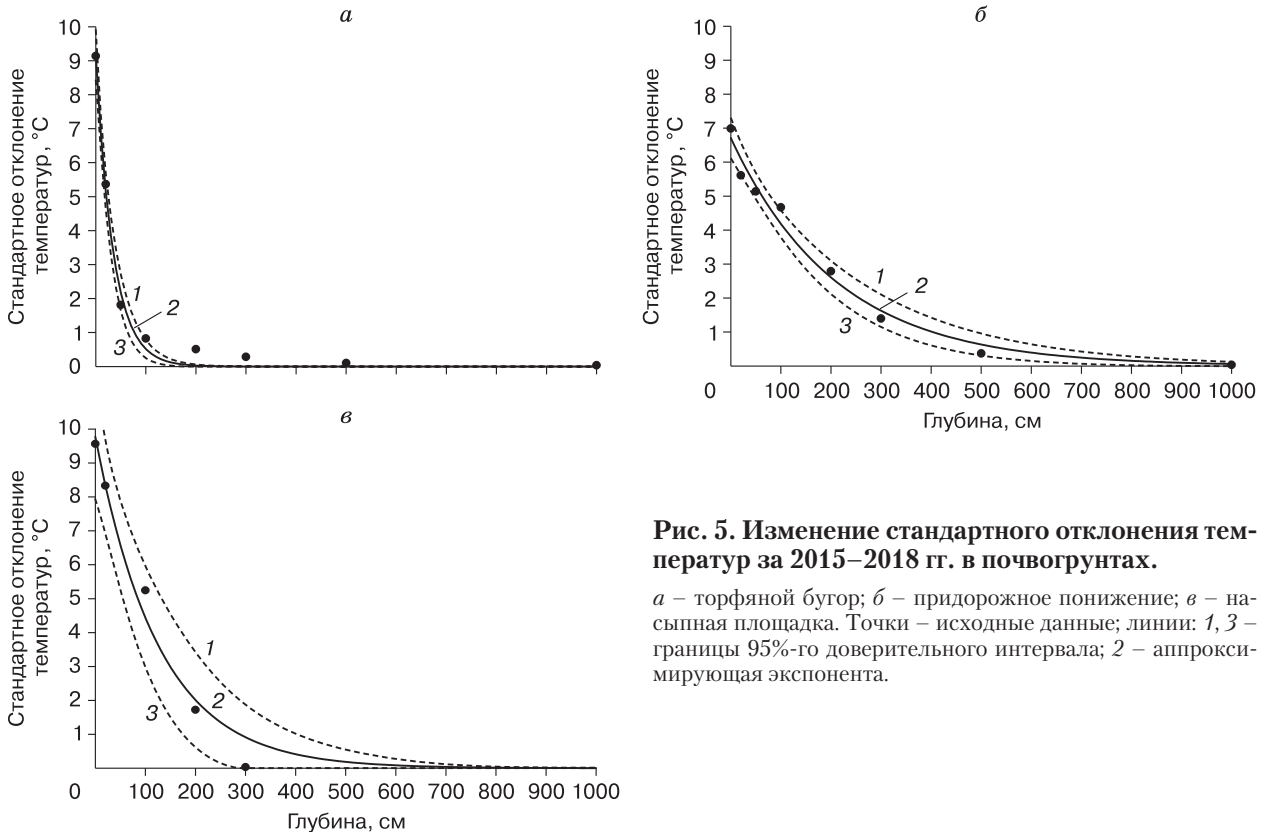


Рис. 5. Изменение стандартного отклонения температур за 2015–2018 гг. в почвогрунтах.

a – торфяной бугор; b – придорожное понижение; v – насыпная площадка. Точки – исходные данные; линии: 1, 3 – границы 95%-го доверительного интервала; 2 – аппроксимирующая экспонента.

прогнозу деградации ММП, во второй половине XXI в. в районе исследований будут распространены редкоостровные многолетнемерзлые породы [Stendel et al., 2011]. В этих условиях в зоне влияния дорог ММП полностью протаивают и существующие таликовые зоны станут сквозными. В настоящее время аналогичная ситуация наблюдается в бугристых болотах крайнесеверной тайги европейского Северо-Востока, где ММП сохраняются непосредственно в основаниях торфяных бугров, а почвогрунты обводненных мочажин полностью талые [Каверин, Пастухов, 2018].

По среднегодовым параметрам грунты насыпной площадки характеризуются промежуточным положением между почвогрунтами бугристого болота и придорожного понижения (см. табл. 2). На фоне контрастного годового цикла температурного режима почв положительными среднегодовые температуры насыпи указывают на преобладание летнего тепла над зимним охлаждением. В условиях естественных тундровых ландшафтов почвы с аналогичными параметрами температурного режима практически не встречаются. Наиболее близкими по температурным показателям к почвогрунтам насыпной площадки являются ненарушенные глубокомерзлотные почвы песчаных бугров на приозерных террасах. Однако в почвах естественного сложения глубина сезонного промерзания и протаивания значительно меньше (1.0–1.2 м).

Таким образом, разрушение дорожного полотна с цементно-бетонным покрытием, очевидно, связано с неравномерным протаиванием ММП и контрастным циклом температурного режима дорожной насыпи на фоне формирования глубоких высокотемпературных таликов в придорожных понижениях. Одной из причин деформаций дорожного полотна автодороги является также неполное вынимание грунта торфяной залежи при строительстве. Деформации дорожного покрытия на автомобильной дороге Усинск–Харьга выражены преимущественно на участках ее пересечения с многолетнемерзлыми бугристыми болотами. На участках с крупными (высотой >1.5 м и диаметром >6 м) буграми пучения дороги необходимо проектировать по принципу, предусматривающему удаление бугров на глубину залегания торфа в примыкающих к ним мочажинах [ВСН 84-89, 1990].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Строительство и эксплуатация насыпной автодороги, пересекающей тундровые ландшафты южной части криолитозоны европейского Северо-Востока России, способствуют значительной дифференциации температурных условий антропогенно-трансформированных почвогрунтов. Почвогрунты бугристого болота характеризуются

неглубоким сезонным протаиванием и быстрым затуханием температурных колебаний с глубиной, суровым температурным режимом в течение всего года. Почвогрунты придорожных понижений отличаются мягким температурным режимом в течение года: неглубоким и слабым зимним охлаждением, глубоким и значительным летним прогреванием, медленным затуханием температурных колебаний с глубиной. Почвогрунты насыпной площадки, используемой в качестве модели дорожной насыпи, выделяются контрастным годовым температурным режимом, сильно охлаждаются зимой и хорошогреваются летом.

Частичное разрушение цементно-бетонного покрытия исследуемого участка насыпной автодороги, построенной в Большеземельской тундре, обусловлено совместным действием антропогенных, ландшафтных и климатических факторов, приведших к неравномерному прогреванию почвогрунтов и опусканию кровли ММП. Неполное удаление нижних слоев торфяной залежи на участке пересечения автодорогой бугристого болота привело к просадкам поверхности почв в основании дороги. Интенсивное снегонакопление в результате закустаривания и чистки снега на насыпи способствовало значительному повышению зимних температур почвогрунтов в придорожных понижениях. Глубокому летнему прогреванию почв благоприятствуют легкий гранулометрический состав и повышенная влажность насыпных отложений.

Продолжающееся климатическое потепление в субарктическом секторе региона увеличивает чувствительность многолетнемерзлых пород к околонулевым температурами, которые при антропогенных нарушениях быстро протаивают.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-55-11003; 20-34-70005) в рамках государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН (№ АААА-А17-117122290011-5 “Выявление общих закономерностей формирования и функционирования торфяных почв на территории Арктического и Субарктического секторов европейского Северо-Востока России”).

Литература

- Алексютина Д.М., Мотенко Р.Г. Состав, строение и свойства мерзлых и талых отложений побережья Байдаракской губы Карского моря // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 1, с. 13–25.
- Ананьева (Малкова) Г.В. Экзодинамические процессы на строящейся трассе железной дороги “Обская–Бованенково” // Изв. РГО, 1997, т. 129, вып. 5, с. 55–59.
- ВСН 84-89. Инструкция по изысканию, проектированию и строительству автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты. М., Союздор, 1990, 272 с.

Геокриологическая карта СССР. М-б 1:2 500 000 / Под ред. Э.Д. Ершова. Винница, Гос. картогр. ф-ка, 1996, 16 л.

Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1988, 358 с.

Герасимова М.И., Строганова М.Н., Можарова Н.В., Прокофьева Т.В. Антропогенные почвы: учеб. пособие для бакалавриата и магистратуры. 2-е изд., испр. и доп. М., Юрайт, 2019, 237 с.

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

Давыдов В.А. Особенности изысканий и проектирования автомобильных дорог в районах вечной мерзлоты. Омск, Омский политехн. ин-т, 1979, 79 с.

Дроздов В.В., Шабуров С.С. Причины возникновения деформаций автомобильных дорог и мероприятия по снижению их интенсивности с высокотемпературным типом вечной мерзлоты в основаниях земляного полотна на примере строительства автомобильной дороги Амур “Чита–Хабаровск” // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость, 2015, № 2 (13), с. 33–45.

Исаков В.А. Прогноз температурного режима грунтов насыпи и естественного основания земляного полотна в различных регионах криолитозоны // Инж. геология, 2014, № 4, с. 56–63.

Каверин Д.А., Пастухов А.В. Температурное состояние почвогрунтов бугристо-мочажинных болот в зоне редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород (европейский Северо-Восток России) // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 5, с. 47–56.

Каверин Д.А., Хилько А.В., Пастухов А.В. Высокочастотное георадиолокационное зондирование почвогрунтов многолетнемерзлых бугристых болот (европейский Северо-Восток России) // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 4, с. 86–95.

Классификация и диагностика почв России / Авт. и сост.: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск, Ойкумена, 2004, 342 с.

Кондратьев В.Г., Соболева С.В. Инженерно-геокриологические проблемы федеральной автодороги “Амур” Чита–Хабаровск // Записки Горн. ин-та, 2009, т. 183, с. 205–209.

Мажитова Г.Г. Температурные режимы почв в зоне сплошной многолетней мерзлоты европейского Северо-Востока России // Почвоведение, 2008, № 1, с. 54–67.

Оберман Н.Г., Шеслер И.Г. Современные и прогнозируемые изменения мерзлотных условий европейского Северо-Востока Российской Федерации // Проблемы Севера и Арктики Российской Федерации. Науч.-информ. бюл., 2009, вып. 9, с. 96–106.

Павлов А.В., Малкова Г.В. Динамика криолитозоны в условиях меняющегося климата XX–XXI веков // Изв. РАН. Сер. геогр., 2010, № 5, с. 44–51.

Пармурзин Ю.П. Словарь по физической географии / Ю.П. Пармурзин, Г.В. Карпов. М., Просвещение, 1994, 367 с.

Полевой определитель почв России. М., Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2008, 282 с.

Полякова Л.С. Метеорология и климатология / Л.С. Полякова, Д.В. Кашарин. Новочеркасск, НГМА, 2004, 107 с.

Ривкин Ф.М., Власова Ю.В., Пармурзин И.С. Закономерности изменения геокриологических условий в результате осадки мерзлых пород при оттаивании // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 26–34.

Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов: учебное пособие. М., Высш. шк., 1973, 446 с.

Bertoldi G., Notarnicola C., Leitinger G. et al. Topographical and ecohydrological controls on land surface temperature in an alpine catchment // Ecohydrology, 2010, No. 3, p. 189–204, <https://doi.org/10.1002/eco.129>.

Brown R.J.E. Permafrost in Canada. Ottawa, Geological Survey of Canada, National Research Council of Canada, 1967, map 1246, scale 1:7,603,200.

Burn C.R. The Thermal Regime of Cryosols / J. Kimble (Ed.). Cryosols (Permafrost-Affected Soils). Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag, 2004, p. 391–414.

Fortier R., LeBlanc A.-M., Yu W. Impacts of permafrost degradation on a road embankment at Umiujaq in Nunavik (Quebec), Canada // Can. Geotechn. J., 2011, No. 48 (5), p. 720–740, DOI: 10.1139/t10-101.

Hinkel K.M., Nelson F.E., Park W. et al. Climate change, permafrost, and impacts on civil infrastructure // Permafrost Task Force Report, Spec. Rept. 01-03, Arlington, Virginia, U.S. Arctic Research Commission, 2003, 72 p.

M-Lepage J., Doré G., Fortier F., Murchison P. Thermal performance of the permafrost protection techniques at beaver creek experimental road site, Yukon, Canada // Proc. of Tenth Intern. Conf. on Permafrost (Salekhard, Russia, June 25–29, 2012). Salekhard, The Northern Publisher, 2012, vol. 1, p. 261–266.

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, p. 7–19, DOI: 10.1002/ppp.582.

Smith S.L., Burgess M.M., Riseborough D., Nixon F.M. Recent trends from Canadian permafrost thermal monitoring network sites // Permafrost and Periglacial Processes, 2005, vol. 16, p. 19–30, DOI: 10.1002/ppp.511.

Stendel M., Christensen J.H., Marchenko S. et al. Size matters – very high resolution permafrost simulations on the 4 km scale in Northeast European Russia // Geophys. Research Abstr., 2011, vol. 13, EGU 2011-6493, EGU General Assembly 2011.

URL: <https://regnum.ru/news/2423624.html> (дата публикации: 30.05.2015; дата обращения: 09.08.2019).

URL: <http://transportrussia.ru/avtomobilnye-dorogi/dorogana-merzlote.html> (дата публикации: 10.10.2013; дата обращения: 09.08.2019).

References

Aleksyutina D.M., Motenko R.G. The composition, structure and properties of frozen and thawed deposits on the Baydaratskaya Bay coast, Kara Sea. Earth’s Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 1, p. 11–22.

Ananyeva (Malkova) G.V. Exodynamic processes on construction of the Obskaya-Bovanenkovo railway. Izv. RGO, 1997, vol. 129, No. 5, p. 55–59.

VSN 84-89. Instructions for the geotechnical investigations, road design and construction in permafrost-underlain areas. Moscow, Soyuzdor, 1990, 272 p. (in Russian).

Ershov E.D. (Ed.). Geocryological Map of the USSR (Scale: 1: 2 500 000). Vinnitsa, State cartographic factory, 1996, sheet 16.

Ershov E.D. (Ed.). Geocryology of the USSR. European territory of the USSR. Moscow, Nedra, 1988, 358 p. (in Russian).

Gerasimova M.I., Stroganova M.N., Mozharova N.V., Prokofieva T.V. Antropogennye pochvy [Anthropogenic soils: textbook for undergraduate and graduate programs]. 2nd ed. Moscow, Yurait, 2019, 237 p. (in Russian).

- Grebenets V.I., Isakov V.A. Deformation and stabilization of motor and rail roads within the Norilsk–Talnakh transportation corridor. *Earth's Cryosphere*, 2016, vol. XX, No. 2, p. 62–68.
- Davydov V.A. Osobennosti izyskaniy i proektirovaniya avtomobilnykh dorog v raione vechnoi merzloty [Specifics of geotechnical investigations and design solutions for roads in permafrost regions]. Omsk, Omsk Polytechnic Institute, 1979, 79 p. (in Russian).
- Drozov V.V., Shaburov S.S. Reasons for automobile roads deformations and measures taken to decrease their intensity with the high-temperature type of ever-frozen ground in the foundation of the Earth surface by the example of building the Amur “Chita–Khabarovsk” automobile road. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*, 2015, No. 2 (13), p. 33–45.
- Isakov V.A. Thermal modeling for road embankments and the underlying grounds in various regions of the permafrost zone. *Inzhenernaya Geologiya [Engineering Geology]*, 2014, No. 4, p. 56–63.
- Kaverin D.A., Pastukhov A.V. Temperature state of soils of peat plateaus in the sporadic permafrost area (European Northeast of Russia). *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. XXII, No. 5, p. 42–51.
- Kaverin D.A., Khilko A.V., Pastukhov A.V. Application of high-frequency ground penetrating radar to investigations of permafrost-affected soils of peat plateaus (European Northeast of Russia). *Earth's Cryosphere*, 2018, vol. XXII, No. 4, p. 75–83.
- Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva L.L., Gerasimova M.I. (Eds.). *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Russian Soils Classification and Diagnostics]*. Smolensk, Oykumena, 2004, 342 p. (in Russian).
- Kondratiev V.G., Soboleva S.V. Engineering-geocryological problems of the “Amur” federal highway Chita–Khabarovsk. *J. Mining Institute*, 2009, vol. 183, p. 205–209.
- Mazhitova G.G. Soil temperature regimes in the discontinuous permafrost zone in the east European Russian arctic. *Eurasian Soil Science*, 2008, vol. 41, No. 1, p. 48–62.
- Oberman N.G., Shesler I.G. Observed and projected changes in permafrost conditions within the European North-East of the Russian Federation. *Problems of the North and the Arctic of the Russian Federation. Scientific-inform. Bull.* 9, 2009, p. 96–106.
- Pavlov A.V., Malkova G.V. Permafrost dynamics in the changing climate through the 20th–21st centuries. *Izv. RAN. Ser. Geogr. [Regional Research of Russia]*, 2010, No. 5, p. 44–51.
- Parmurzin Yu.P., Karpov G.V. *Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Dictionary of Physical Geography. Teaching Aid]*. Moscow, Education, 1994, 367 p. (in Russian).
- Field Indexing of Soils in Russia. Moscow, Pochvennyi Institute RAN, 2008, 282 p. (in Russian).
- Polyakova L.S., Kasharin D.V. *Meteorologiya i klimatologiya [Meteorology and Climatology]*. Novocherkassk, NGMA, 2004, 107 p. (in Russian).
- Rivkin F.M., Vlasova Yu.V., Parmuzin I.S. Study of changes in permafrost conditions caused by frozen ground thaw subsidence. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, No. 6, p. 21–29.
- Tsytovich N.A. *Mechanika merzlykh gruntov [Mechanics of Frozen soils: Training Manual]*. Moscow, Vysshaya Shkola, 1978, 446 p. (in Russian).
- Bertoldi G., Notarnicola C., Leitinger G. et al. Topographical and ecohydrological controls on land surface temperature in an alpine catchment. *Ecohydrology*, 2010, No. 3, p. 189–204, <https://doi.org/10.1002/ecc.129>.
- Brown R.J.E. *Permafrost in Canada*. Ottawa, Geological Survey of Canada, National Research Council of Canada, 1967, map 1246, scale 1:7,603,200.
- Burn C.R. The Thermal Regime of Cryosols. In: J. Kimble (Ed.). *Cryosols (Permafrost-Affected Soils)*. Berlin-Heidelberg-New York, Springer-Verlag, 2004, p. 391–414.
- Fortier R., LeBlanc A.-M., Yu W. Impacts of permafrost degradation on a road embankment at Umiujaq in Nunavik (Quebec), Canada. *Can. Geotechn. J.*, 2011, No. 48 (5), p. 720–740, DOI: 10.1139/t10-101.
- Hinkel K.M., Nelson F.E., Park W. et al. Climate change, permafrost, and impacts on civil infrastructure. In: *Permafrost Task Force Report, Special Report 01-03*, Arlington, Virginia, U.S. Arctic Research Commission, 2003, 72 p.
- M-Lepage J., Doré G., Fortier F., Murchison P. Thermal performance of the permafrost protection techniques at beaver creek experimental road site, Yukon, Canada. In: *Proc. of Tenth Intern. Conf. on Permafrost (Salekhard, Russia, June 25–29, 2012)*. Salekhard, The Northern Publisher, 2012, vol. 1, p. 261–266.
- 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, p. 7–19, DOI: 10.1002/ppp.582.
- Smith S.L., Burgess M.M., Riseborough D., Nixon F.M. Recent trends from Canadian permafrost thermal monitoring network sites. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2005, vol. 16, p. 19–30, DOI: 10.1002/ppp.511.
- Stendel M., Christensen J.H., Marchenko S. et al. Size matters – very high resolution permafrost simulations on the 4 km scale in Northeast European Russia. *Geophys. Research Abstr.*, 2011, vol. 13, EGU 2011-6493, EGU General Assembly 2011.
- URL: <https://regnum.ru/news/2423624.html> (last visited: 09.08.2019).
- URL: <http://transportrussia.ru/avtomobilnye-dorogi/dorogana-merzlotte.html> (last visited: 09.08.2019).

*Поступила в редакцию 4 сентября 2019 г.,
после доработки – 20 сентября 2019 г.,
принята к публикации 30 сентября 2019 г.*