

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ТУНДРОВЫХ ПОЧВ И ПОДСТИЛАЮЩИХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД (ЕВРОПЕЙСКИЙ СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)

Д.А. Каверин, А.В. Пастухов, Г.Г. Мажитова

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия; dkav@mail.ru*

Изучен температурный режим семи мерзлотных почв, формирующихся на минеральных и торфяных почвообразующих породах, в различных ландшафтных условиях южной тундры европейского Северо-Востока России. Сезонная и многолетняя динамика температуры охарактеризована в пределах сезоннотальных и подстилающих многолетнемерзлых горизонтов. Температурный режим почв классифицирован по российской и американской системам. Показана дифференциация мерзлотных почв по основным температурным показателям.

Температурный режим, мерзлотные почвы, многолетнемерзлые породы, сезоннотальный слой

TEMPERATURE REGIME OF TUNDRA SOILS AND UNDERLYING PERMAFROST (NORTHEASTERN EUROPEAN RUSSIA)

D.A. Kaverin, A.V. Pastukhov, G.G. Mazhitova

*Institute of Biology, Komi Scientific Center, UB RAS,
167982, Syktyvkar, Kommunisticheskaya str., 28, Russia; dkav@mail.ru*

Temperature regime has been studied in seven permafrost soils formed in mineral and peat soil-forming deposits in various landscapes of the southern tundra in Northeastern European Russia. Seasonal and long-term temperature dynamics has been revealed in both active layer and underlying permafrost. Soil temperature regime has been classified according to the Russian and American systems. The differentiation of permafrost soils has been shown according to the main temperature parameters.

Temperature regime, permafrost-affected soils, permafrost, active layer

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата является одной из важнейших глобальных проблем XXI в. Ожидается, что деградация многолетнемерзлых толщ в регионе и последующее продвижение границы леса на север могут привести к кардинальным изменениям в почвах и растительности. Почвы являются основным хранилищем углерода, значительные запасы которого законсервированы в многолетнемерзлых горизонтах [Hugelius et al., 2011]. Из-за глобальных изменений климата почвы, ранее служившие резервуаром для стока углерода, могут стать его источником и обеспечить дополнительное поступление углеродсодержащих парниковых газов в атмосферу, что, в свою очередь, ускорит потепление [Davidson, Janssens, 2006]. Субарктика европейского Северо-Востока является одним из особо чувствительных к климатическим изменениям регионов нашей страны [Оберман, Шеслер, 2009; Mazhitova et al., 2004]. При этом наибольшие темпы деградации мерзлоты отмечаются в восточной части Тимано-Печорского региона [Оберман, Шеслер, 2009]. В пределах южной тундры и лесотундры распространены острова и массивы вы-

сокотемпературных многолетнемерзлых пород (ММП), относительно нестабильных в условиях потепления климата.

Исследования температурного режима тундровых почв в регионе проведены А.В. Кононенко [1986] и Г.Г. Мажитовой [2008]. В работе [Кононенко, 1986] охарактеризован летний гидро-термический режим двух целинных почв, но не содержится зимних и годовых характеристик, нет связи разнообразия режимов на ландшафтном уровне. В работе [Мажитова, 2008] детально рассмотрен температурный режим 11 почв, формирующихся в разнообразных ландшафтах равнинной и горной тундры, приуроченных к мерзлым и талым участкам. В ней показано резкое различие зимних и годовых температурных показателей мерзлотных и немерзлотных почв при сходстве летних показателей в корнеобитаемом слое. Исследования температурного режима мерзлотных почв ограничивались мощностью сезонноталого слоя (СТС).

С 2007 г. в юго-восточной части Большеземельской тундры сотрудниками Института биоло-

гии Коми НЦ начато проведение долгосрочного температурного мониторинга основных типов профилей мерзлотных почв. Мониторинг температурного режима проводили в пределах СТС и верхнем горизонте ММП (до глубины 120 см). Это позволяет оценить современное экологическое состояние почв в составе почвенно-геокриологического комплекса, выявить отклик на межгодовую динамику температуры воздуха, а в перспективе при наличии более длительного ряда наблюдений и на изменение климата.

Цель статьи – охарактеризовать основные параметры температурного режима тундровых мерзлотных почв и подстилающих многолетнемерзлых пород, классифицировать эти режимы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Природные условия территории. Исследования температурного режима почв проводили на двух участках в подзоне южной (кустарниковой) тундры: в бассейнах рек Большая Роговая и Воркута и на участке в северной лесотундре (бассейн р. Сейда). Район исследований относится к бассейну р. Уса – притока Печоры (европейский Северо-Восток России). Выбор данных участков отражает разнообразие мерзлотных почв юго-восточного сектора Большеземельской тундры. Этот район относится к зоне распространения прерывистой многолетней мерзлоты [*Геокриологическая карта..., 1998*] со среднегодовыми температурами ММП от 0 до -2°C . Преобладают комплексы поверхностно-глеевых (мерзлотных и немерзлотных), торфяно-глеевых и болотных мерзлотных почв [*Государственная... карта..., 2000*].

Климатические параметры. По данным метеостанции Воркута, ближайшей к району работ, равнинная тундра характеризуется среднегодовой температурой воздуха $-5,7^{\circ}\text{C}$ (1947–2011 гг.). Температурные показатели 2007–2011 гг. не вышли за пределы многолетних значений (табл. 1). Среднегодовое количество осадков за период наблюдений было выше среднемноголетних (645 мм/год). При расчете годовых значений тем-

пературы воздуха и осадков брались данные за гидрологический год (1 октября–30 сентября).

Характеристика изученных почв. Объектами исследования выбраны мерзлотные почвы, формирующиеся на суглинистых и торфяных отложениях в различных ландшафтных условиях южной тундры европейского Северо-Востока России. Для изучаемых почв характерна так называемая “сливающаяся” мерзлота, когда сезонное промерзание в почве достигает кровли ММП [*Геокриология..., 1988*]. Наименования почв и индексы горизонтов даны по классификации почв России [*Классификация..., 2004*]. В табл. 2 приведены используемые далее по тексту краткие названия почв.

В условиях южной тундры минеральные мерзлотные почвы формируются преимущественно на суглинистых массивах (наветренные вершины и склоны увалов, террасы, бугры и др.) под кустарничковой и мохово-лишайниковой растительностью. В группу этих почв входят преимущественно торфяно-глееземы с глубиной СТС от 50 до 200 см. Торфяные мерзлотные почвы (сухоторфяные, торфяные олиготрофные) широко распространены в пределах плоскобугристых болот, формируются на торфяных отложениях мощностью от 40 см до нескольких метров. Глубина сезонного протаивания в торфяных почвах обычно не превышает 40–60 см.

Исследовался температурный режим на трех профилях суглинистых и четырех профилях торфяных мерзлотных почв (см. табл. 2). Измерения почвенных температур выполняли с помощью цифровых логгеров НОВО, установленных на глубинах 0, 20, 50, 100 (120) см и запрограммированных на восемь измерений в сутки. Датчики логгеров закреплены на деревянной палке, которая погружена в скважину (отверстие) диаметром 3 см и глубиной 100–120 см. Глубину сезонного протаивания измеряли градуированным металлическим зондом в конце вегетационного периода, мощность снежного покрова – в марте. Температуру воздуха для расчетов брали по метеостанции Воркута. Температурные исследования почв проводили в период 2007–2011 гг.

Таблица 1. Климатические показатели (метеостанция Воркута)

Гидрологический год (01.10–31.09)	Среднегодовая температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	Сумма среднесуточных температур воздуха, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут}$		Годовая сумма осадков, мм	Сумма осадков, мм	
		$>0^{\circ}\text{C}$	$>10^{\circ}\text{C}$		июнь–сентябрь	декабрь–февраль
2007/08	-3,6	1126	802	525	195	132
2008/09	-4,5	1046	701	613	252	124
2009/10	-7,0	995	602	776	376	129
2010/11	-4,1	1002	558	668	215	88
Среднее за 2007–2011	-4,8	1042	666	645	259	118
Среднее многолетнее (1947–2011)	-5,7	1015	536	523	225	106
Диапазон (1947–2011)	-2,8...-9,9	647–1310	0–1059	294–762	86–393	16–303

Таблица 2. Характеристика объектов исследования

Номер и индекс почвенного профиля	Координаты	Ландшафт	Глубина СТС, см	Средняя макс. мощность снега, см	Строение профиля почвы	Наименование почвы	
						[Классификация..., 2004]	Настоящая статья
1. Профиль САЛМ R2	67°35' с.ш., 64°10' в.д.	Площадка R2 международной мониторинговой программы САЛМ. Бассейн р. Воркута. Пологий склон прирусейного увала, кустарничково-моховая тундра с пятнами-медальонами	110	42	ТО (0-12) – ВG (12-70) – СG (70-110) – СG (110-120+)	Торфяно-глеезем криотурбированный на средних пылеватых суглинках	Торфяно-глеезем криотурбированный
2. Профиль U58	67°19' с.ш., 62°24' в.д.	Бассейн р. Бол. Роговая. Минеральный бугор (пальза), кустарничково-мохово-лишайниковая тундра	100	≤30	Т (0-20) – В (20-37) – Вf (37-53) – ВС (53-70) – Сg (70-85+)	Торфяно-глеезем криогенно-ожелезненный на слоистых тяжелых суглинках	Торфяно-глеезем криогенно-ожелезненный
3. Профиль U71	67°20' с.ш., 62°20' в.д.	Бассейн р. Бол. Роговая. Плоская вершина минерального бугра (пальзы), кустарничково-мохово-лишайниковая тундра	110	≤20	Т (0-6) – I (6-12) – II (12-17) – III (17-20) – IV (20-32) – V (32-50) – VI (50-71) – VII (71-80) – VIII (80-89) – IX (90-110) – X (110+)	Слоистая аллювиальная на слоистых суглинках-песчаных озерно-аллювиальных отложениях	Слоистая аллювиальная
4. Профиль S3	67°03' с.ш., 62°56' в.д.	Бассейн р. Сейда. Плоская вершина торфяного бугра, кустарничково-мохово-лишайниковая растительность, оголенные торфяные пятна	52	≤10	О (0-7) – ТJ (7-40) – Т2 (40-52) – Т3 (52-100+)	Сухоторфяная	Сухоторфяная (участок р. Сейда)
5. Профиль U92	67°19' с.ш., 62°23' в.д.	Бассейн р. Бол. Роговая. Выпуклая вершина торфяного бугра, кустарничково-моховая растительность	45	≤10	О (0-5) – ТJ (5-26) – Т2 (26-41) – Т3 (41-57) – Т4 (57-100+)	Сухоторфяная	Сухоторфяная (участок р. Бол. Роговая)
6. Профиль S7	67°03' с.ш., 62°57' в.д.	Бассейн р. Сейда. Низкая приозерная терраса плоскобугристого торфяника, кустарничково-моховая растительность	40	45	ТО (0-21) – Т2 (21-41) – Т3 (41-70) – Т4 (70-100+)	Торфяная олиготрофная (переходная)	Торфяная переходная
7. Профиль U71/1	67°20' с.ш., 62°20' в.д.	Бассейн р. Бол. Роговая. Мочажина, осоково-сфагновое болото	55	40	ТО (0-12) – ТО2 (12-19) – ТО3 (19-30) – Т (30-55) – Т (55-60) – G (60-100+)	Торфяная олиготрофная	Торфяная олиготрофная

ЗИМНИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПОЧВ

Сезонное промерзание верхней части тундровых мерзлотных почв начинается в октябре с приходом устойчивых отрицательных температур воздуха, средняя многолетняя дата установления которых по метеостанции Воркута 16 октября (2007–2011 гг.). Промерзание почв происходит преимущественно с поверхности. В ноябре среднемесячные температуры верхних горизонтов СТС уже становятся отрицательными (рис. 1). С глубиной темпы промерзания замедляются, в горизонтах средней (20–50 см) и нижней (50–120 см) частей почвы могут фиксироваться нулевые завесы продолжительностью от 2 до 6 месяцев. Нулевые завесы – длительно сохраняющиеся на определенной глубине, постоянные (близкие к 0 °С) температуры [Геокриология..., 1988]. Наибольшая продолжительность периода субнулевых температур отмечается на контакте СТС–ММП.

Диапазон сумм отрицательных температур рассматриваемых почв на поверхности составил –171...–2508 °С·сут (табл. 3). Суммарный диапа-

зон значений этого показателя в минеральных почвах перекрывается с диапазоном в торфяных. Тем не менее различия по поступлению холода выявляются при сравнении почв бугров и относительно пологих участков. Почвы профилей 1, 6, 7 сформировались на относительно пологих либо пониженных участках с мощностью снега 30–45 см. Профили 2 и 5 приурочены к торфяным и суглинистым буграм (пальзам) высотой 2–5 м. Мало-мощный снежный покров (0–30 см) на буграх способствует сильному охлаждению почв. В связи с тем, что ландшафтное положение почв определяет значительные различия в температурном режиме, введем условные названия для этих двух групп почв: почвы пологих участков и почвы бугров. При сравнении этих двух групп видно, что диапазоны сумм поверхностных температур ниже 0 °С перекрываются в меньшей степени.

В почвах пологих участков и бугров на глубине 20 см диапазоны сумм отрицательных температур также слабо перекрываются (см. табл. 3, рис. 2). Наибольшее охлаждение ММП происхо-

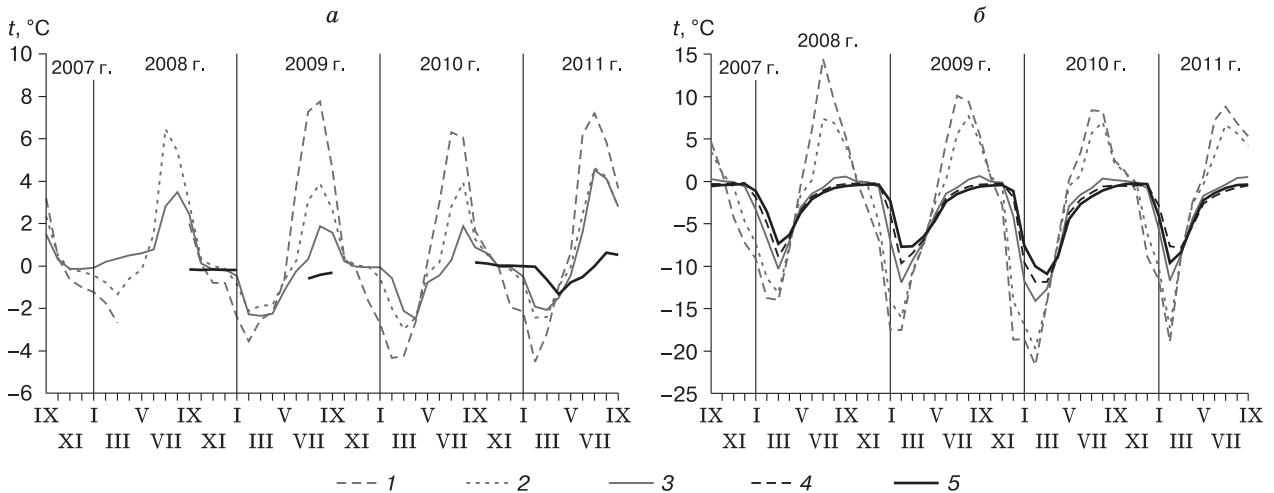


Рис. 1. Среднемесячные температуры в торфяно-глеаземе криотурбированном (а) и в сухоторфяной почве участка р. Сейда (б).

Глубина: 1 – 0 см; 2 – 20 см; 3 – 50 см; 4 – 80 см; 5 – 120 см.

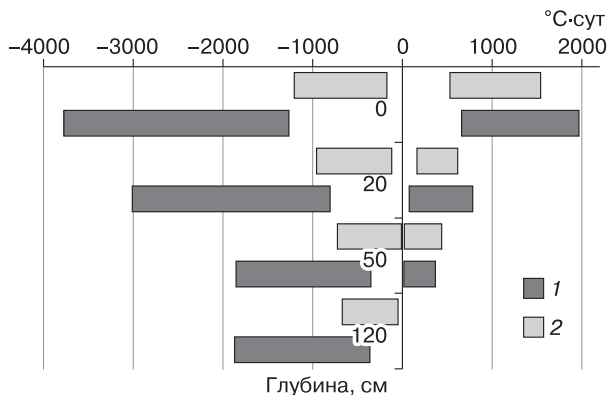


Рис. 2. Диапазоны сумм отрицательных и положительных температур почв бугров (1) и пологих участков (2).

Таблица 3. Параметры термического режима почв и многолетнемерзлых пород

Глубина, см	Сумма отрицательных среднесуточных температур, °С·сут				Сумма положительных среднесуточных температур, °С·сут						Среднегодовая температура, °С			
	2007/08	2008/09	2009/10	2010/11	>0 °С			>10 °С			2007/08	2008/09	2009/10	2010/11
					2008/09	2009/10	2010/11	2008/09	2009/10	2010/11				
<i>Торфяно-глезем криотурбированный</i>														
0	-171	-394	-474	-385	721	529	743	207	88	123	-0,9	0,9	0,2	1,0
20	-118	-226	-253	-206	311	255	452	0	0	0	1,1	0,2	0,0	0,7
50	-13	-278	-202	-197	122	93	419	0	0	0	0,9	-0,4	-0,3	0,6
120	-	-49	-	-106	0	0	43	0	0	0	-0,2	-0,3	-	-0,2
<i>Торфяно-глезем криогенно-ожелезненный</i>														
0	-1289	-1843	-1720	-1409	906	755	970	554	317	388	-0,4	-2,8	-2,6	-1,2
20	-943	-	-1405	-	118	175	76	0	0	0	-2,5	-2,6	-3,7	-
50	-803	-802	-1149	-	85	90	43	0	0	0	-1,7	-2,2	-3,2	-
120	-647	-	-970	-	4	1	3	0	0	0	-2,2	-	-2,9	-
<i>Слоистая аллювиальная почва</i>														
0	-1036	-1324	-1628	-1246	1272	1138	1312	898	720	814	0,8	-0,2	-1,7	-0,1
20	-805	-858	-1260	-1030	708	594	612	230	108	9	-0,4	-0,4	-2,2	-1,3
50	-606	-644	-1049	-847	325	276	316	0	0	0	-0,7	-0,9	-2,5	-1,6
80	-457	-484	-865	-	191	105	-	0	0	0	-0,7	-0,8	-2,3	-
120	-362	-	-	-	0	0	0	0	0	0	-1,3	-	-	-
<i>Сухоторфяная почва (участок р. Сейда)</i>														
0	-1753	-1974	-2508	-1559	911	719	917	415	211	213	-1,8	-2,9	-4,6	-2,0
20	-1418	-1684	-2204	-1364	568	497	628	49	49	12	-2,3	-3,1	-4,4	-2,2
50	-1017	-1273	-1709	-1032	29	18	29	0	0	0	-2,7	-3,4	-4,6	-2,8
80	-922	-1145	-1599	-981	0	0	0	0	0	0	-2,5	-3,1	-4,4	-2,6
120	-858	-1068	-1507	-1020	0	0	0	0	0	0	-2,3	-2,9	-4,1	-2,7
<i>Сухоторфяная почва (участок р. Бол. Роговая)</i>														
0	-1304	-	-2183	-1731	-	658	740	90	126	265	-2,5	-	-4,8	-
20	-1127	-1411	-	-	189	-	-	0	0	0	-2,1	-3,8	-4,2	-3,1
50	-897	-1081	-1505	-1223	0	0	0	0	0	0	-2,5	-3,0	-4,1	-3,3
100	-730	-	-	-1207	0	0	0	0	0	0	-3,0	-	-	-3,3
<i>Торфяная переходная почва</i>														
0	-804	-838	-1186	-1264	532	541	902	25	82	275	0,5	-0,7	-1,6	-1,2
20	-440	-662	-841	-816	193	164	237	0	0	8	-0,7	-1,3	-1,8	-1,7
50	-350	-533	-713	-684	0	0	0	0	0	0	-1,0	-1,5	-2,0	-1,9
80	-357	-515	-	-	0	0	0	0	0	0	-1,0	-1,4	-	-1,7
120	-349	-477	-	-	0	0	0	0	0	0	-1,0	-1,3	-	-1,5
<i>Торфяная олиготрофная почва</i>														
0	-	-	-999	-938	-	901	101	-	378	313	-	-	-0,6	-0,1
50	-	-	-642	-615	-	21	38	-	0	0	-	-	-1,9	-1,6
100	-	-	-609	-620	-	0	0	-	0	0	-	-	-1,8	-1,7

Примечание. Прочерк – температура не определялась.

дит в торфяных буграх на глубине 100–120 см. Подстилающие торфяную переходную и торфяную олиготрофную почвы ММП значительно теплее, чем в торфяных буграх. Наименьшими суммами отрицательных температур по всему профилю характеризуется торфяно-глезем криотурбированный (см. табл. 3).

Самым холодным месяцем на глубинах 0 и 20 см может быть любой от января до марта (см. рис. 1). Для почв наветренных бугров, сильнее

реагирующих на изменения температуры воздуха зимой, этот период в большей степени приходится на январь и февраль (см. рис. 1, б). Максимальное охлаждение ММП отмечается в период с февраля по апрель. Среднемесячные температуры ММП для самого холодного месяца варьируют в пределах от -0,1 до -12 °С. Наибольшему охлаждению подвергаются ММП, слагающие основания минеральных и торфяных бугров (см. рис. 1, б).

ЛЕТНИЙ ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ

Сезонное протаивание поверхностных горизонтов начинается в мае, средняя многолетняя дата установления устойчивых положительных среднесуточных температур воздуха и разрушения устойчивого снежного покрова – 27 мая. Самый теплый месяц в поверхностных горизонтах почвы – июль или август (см. рис. 1). Максимальные температуры нижних горизонтов СТС наблюдаются в период с августа по октябрь, в ММП – с сентября по декабрь.

Диапазон сумм положительных температур ($>0\text{ }^{\circ}\text{C}$) на поверхности (глубина 0 см) за все годы наблюдений во всех почвах составил 529...1312 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$ (см. табл. 3, рис. 2). Приход тепла на поверхность минеральных и торфяных почв примерно одинаков, их диапазоны перекрываются. Сравнивая группы почв пологих участков и бугров, необходимо отметить, что первые получают меньше тепла, что, очевидно, связано с большей затененностью их поверхности кустарничковой растительностью.

На глубине 20 см суммы положительных температур в 1,5–3 раза ниже по сравнению с поверхностью (см. табл. 3, рис. 2). Максимальные суммы положительных температур на глубине 20 см зафиксированы в слоистой аллювиальной и сухоторфяной (участок р. Сейда) почвах. В слоистой аллювиальной почве маломощная торфянистая подстилка (6 см) и относительно легкий гранулометрический состав способствуют глубокому проникновению положительных температур, что отражается и в большей мощности СТС (110 см). Значительный прогрев верхних горизонтов сухоторфяной почвы объясняется разреженной мохово-лишайниковой растительностью бугра. Черный цвет оголенного торфа способствует повышенному поглощению солнечной радиации.

По суммам положительных температур ($>10\text{ }^{\circ}\text{C}$) на поверхности ситуация аналогичная, поверхность бугров по сравнению с пологими участками получает больше тепла (см. табл. 3). На глубине 20 см эти температуры отмечаются только в слоистой аллювиальной и сухоторфяной почве (участок р. Сейда).

Таким образом, для мерзлотных почв региона характерно проникновение температур более $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до глубины 10–15 см (основной корнеобитаемый слой), что подтверждает аналогичные выводы, сделанные при анализе температурных рядов почв региона за 1997–2004 гг. Проникновению таких температур препятствует наличие мощного органического горизонта, близость охлаждающего экрана мерзлоты, большие затраты тепла при оттаивании деятельного слоя.

ГОДОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПОЧВ

Общий диапазон среднегодовых температур СТС на глубинах 0, 20, 50 см в исследуемых почвах составил $1,1...-4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, в ММП $-0,2...-4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. табл. 3). В шести из семи профилей среднегодовые температуры СТС были отрицательными, постепенно снижаясь вниз по профилю. Отрицательные среднегодовые температуры в мерзлотных почвах и положительные в немерзлотных – наиболее нормальная ситуация [Кудрявцев, 1981; Burn, 2004]. Самыми холодными по среднегодовой температуре являются почвы торфяных бугров (см. табл. 3). Относительно теплые – почвы пологих участков, по температурному режиму они наиболее близки к немерзлотным почвам тундры. В СТС торфяно-глеезема криотурбированного на глубинах 0, 20 и 50 см в период наблюдений фиксировались положительные среднегодовые температуры. На мониторинговой площадке, где расположен торфяно-глеезем криотурбированный, непрерывно увеличивалась глубина сезонного протаивания, средние из 400 замеров по сетке с ячейкой $10 \times 10\text{ м}$ составили 62 см в 1997 г. и 88 см в 2011 г. Постепенное повышение среднегодовой температуры СТС, сопровождаемое оттаиванием мерзлоты, происходило за счет повышения и летних, и особенно зимних температур. Положительная среднегодовая температура в верхних горизонтах почвы при отрицательной на остальных глубинах (temperature offset) является одним из признаков деградации мерзлоты [Burn, 2004].

Диапазон сезонных колебаний температуры постепенно снижается от поверхности почвы вниз по профилю, охватывая верхнюю толщу ММП до глубины нулевых колебаний температур. Сезонные колебания температуры еще четко выражены в исследуемых мерзлых горизонтах на глубине 50–120 см, что часто соответствует зоне формирования переходного слоя.

СООТНОШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА И ПОЧВЫ

Мерзлотные почвы в регионе формируются на относительно наветренных участках, где максимальная мощность снега обычно не превышает 50 см [Мажитова, 2008]. Для исследуемых мерзлотных почв существенно больше различаются величины зимних температур, чем летних. Диапазон сумм положительных температур ($>0\text{ }^{\circ}\text{C}$) на глубине 20 см составил 708 $^{\circ}\text{C}$, тогда как диапазон сумм отрицательных температур составил 2204 $^{\circ}\text{C}$, т. е. в 3,1 раза больше (см. рис. 2). Среди тундровых почв региона данный коэффициент является максимально высоким для мерзлотных профилей с их суровым зимним режимом. При этом почвы, для которых зимние условия резко различаются,

формируются в непосредственном соседстве при одинаковых температурах воздуха. Причина различий – неодинаковая высота снежного покрова. Роль снега в формировании температурного режима почв хорошо известна [Шаманова, 1970; Димо, 1972; Оберман, 1998; Павлов, Москаленко, 2001; Yli-Halla, Mokka, 1998], при этом есть принципиальные региональные различия.

Дифференцированная мощность снежного покрова оказывает прямое влияние на зимние температуры деятельного слоя и подстилающих ММП. При норме 60 см максимальной за год декадной высоты снежного покрова на метеостанции Воркута диапазон этой величины на наших участках составил 10–45 см. При относительно маломощном снежном покрове (0–30 см) создаются благоприятные условия для зимнего охлаждения почв, что в определенной мере способствует сохранению ММП, залегающих близко к поверхности. Кустарники и деревья, поселяясь только на многоснежных участках, задерживают еще больше снега, что способствует формированию относительно теплых, в том числе немерзлых, почв.

Степень проникновения в почвы тепла или холода из воздуха можно выразить через отношение сумм положительных и отрицательных температур на поверхности почвы к аналогичным суммам температур воздуха за тот же период. В англоязычной литературе этот показатель называется N-фактором [Lunardini, 1978]. Зимний N-фактор, т. е. отношение сумм отрицательных температур на поверхности почвы и воздуха, сильно зависит от высоты снежного покрова. Значения зимнего N-фактора для шести из семи рассматриваемых профилей изменялись в диапазоне 0,28–0,76, что в целом характерно для мерзлых почв [Мажитова, 2008]. Исключением является торфяно-глезем криотурбированный со значением 0,07–0,15. В данной случае крайне низкий зимний N-фактор объясняет, почему на территории со среднегодовой температурой воздуха $-5,7^{\circ}\text{C}$ существуют мерзлые почвы со среднегодовой температурой деятельного слоя выше 0°C .

КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ

Классификация температурных режимов почв В.Н. Димо [1972] наиболее детально проработана для территории бывшего СССР. Температурные показатели берутся для глубины 20 см. В отличие от американской классификации [Soil Taxonomy, 1999], где принята глубина 50 см, российская классификация акцентирует внимание на температурных характеристиках корнеобитаемого слоя. Критерии при выделении типов режимов: наличие/отсутствие многолетней мерзлоты, ее сливающийся или несливающийся характер и

среднегодовая температура; критерии при выделении подтипов: сумма среднесуточных температур выше 10°C , сумма среднесуточных температур ниже 0°C , среднемесячная температура самого холодного и самого теплого месяца на глубине 20 см. Выделяются также подтипы годового цикла, летнего и зимнего сезонов и континентальности. Внутри подтипов составлены комбинации значений параметров с шагом 4°C по температуре самого холодного месяца.

По годовым параметрам температурные режимы шести из семи исследуемых почв относятся к очень холодному подтипу в рамках мерзлотного типа. Только торфяно-глезем криотурбированный по среднегодовым температурам попадает в холодный подтип, предусмотренный для длительно сезоннопромерзающих почв (табл. 4).

Классификация четко отражает сравнительную однородность летних температурных условий в верхнем слое почв. По летним показателям все рассматриваемые почвы оказываются в очень холодном подтипе мерзлотного типа (см. табл. 4).

По зимним показателям почвы различаются существенно и относятся к разным температурным типам (см. табл. 4). Исследуемые почвы не всегда классифицируются как профили мерзлотного типа. По сумме отрицательных температур и температуре самого холодного месяца торфяно-глезем криотурбированный относится к холодному подтипу в длительно сезоннопромерзающем типе. По зимнему режиму данный профиль близок к почвам, функционирующим далеко за пределами криолитозоны. Подобная неопределенность (противоречие между невысокими суммами отрицательных температур и наличием сливающейся мерзлоты) в значительной мере связана с тем, что в классификации нет конкретной ниши для “теплых” мерзлых почв восточноевропейской тундры. Такие “сдвиги” в таксономическом положении почв можно объяснить климатическими изменениями, сопровождающимися деградацией мерзлоты вдоль южной границы криолитозоны [Оберман, Шеслер, 2009].

В связи с этим при выделении подтипов мерзлых почв, формирующихся на южном пределе криолитозоны европейского Севера России, в отечественной системе классификации температурных режимов [Димо, 1972] необходимо расширить диапазоны температурных показателей на глубине 20 см. В параметры очень холодного подтипа в годовом цикле следует включить диапазоны среднегодовых температур $0...-4$ и $-4...-8^{\circ}\text{C}$. Для классификации мерзлых почв с мягким зимним режимом необходимо дополнительно выделить умеренно холодный подтип с диапазонами сумм отрицательных температур $-500...-1000$ и $-1000...-1500^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$, температурой самого холодного месяца $-4...-8$ и $-8...-12^{\circ}\text{C}$.

Таблица 4. Соответствие параметров термического режима почв (на глубине 20 см) термическим типам и подтипам Димо [1972]

Почва	Год	Лето		Зима		Континентальность
		Сумма средних точных положительных температур (>10 °С)	Температура самого теплого месяца	Сумма средних отрицательных температур	Температура самого холодного месяца	
Торфяно-глеязем криотурбированный	Холодный Длительно сезоннопромерзающий	Очень холодный Мерзлотный	Холодный Сезоннопромерзающий		Мягкий	
			Торфяно-глеязем криогенно-ожезлененный	Очень холодный Мерзлотный		Холодный Длительно сезоннопромерзающий
Слоистая аллювиальная	Холодный Мерзлотный	Умеренно холодный Длительно сезоннопромерзающий			Холодный Мерзлотный	Континентальный
Сухоторфяная (участок р. Бол. Роговая)			Торфяная переходная			
Сухоторфяная (участок р. Сейда)						

Примечание. В числителе – подтип термического режима почв; в знаменателе – тип термического режима.

Для выделения группы почв с деградирующими ММП целесообразно дополнительно ввести комбинацию: среднегодовая температура на глубине 20 см от 2 до 0 °С, суммы отрицательных температур 0...–500 °С, температура самого холодного месяца 0...–4 °С, сливающаяся или несливающаяся мерзлота в пределах 2 м от поверхности.

В работе [Soil Taxonomy, 1999] используется меньше критериев при классификации температурных режимов: наличие/отсутствие многолетней мерзлоты в пределах 2 м от поверхности; среднегодовая и среднелетняя температуры почвы на глубине 50 см. Классификация режимов по [Soil Taxonomy, 1999] приведена в табл. 5. Исследуемые почвы характеризуются режимом Subgelic (среднегодовая температура более –4 °С, многолетняя мерзлота), сухоторфяная почва (участок р. Сейда) в 2009–2010 гг. характеризовалась режимом Pergelic (среднегодовая температура почвы менее –4 °С, многолетняя мерзлота).

Градации среднегодовых температур ниже и выше –4 °С соответствуют разной степени устойчивости ММП. Рассматриваемые почвы со среднегодовыми температурами более –4 °С на глубине 50 см являются относительно неустойчивыми.

Годовая амплитуда температур исследуемых почв приведена в виде двух показателей: разница среднемесячных температур самого холодного и самого теплого месяца (континентальность) на глубине 20 см [Димо, 1972]; разница среднелетней и среднезимней температур на глубине 50 см [Soil Taxonomy, 1999].

По отечественной классификации континентальности почвенных климатов торфяно-глеязем криотурбированный и торфяная переходная почва относятся к мягкому (океаническому) подтипу (амплитуда <16 °С), сухоторфяная почва бугра (участок р. Сейда) – к континентальному (24–28 °С), остальные почвы – к умеренно континентальному (16–20 °С) (см. табл. 4).

По разнице среднелетней и среднезимней температур на глубине 50 см наибольшие амплитуды демонстрируют также почвы наветренных участков. Почвы пологих участков характеризуются меньшими диапазонами температуры (см. табл. 5).

Разрешение российской классификации температурных режимов применительно к зоне сплошной мерзлоты европейского Северо-Востока несколько выше, чем американской классификации. На низшем таксономическом уровне в первой выделяется восемь комбинаций подтипов по показателям года, лета, зимы и континентальности, во второй – два температурных класса. Значения и российского и американского показателей отражают различия ландшафтных условий рассматриваемых мерзлотных почв независимо от их состава.

Таблица 5. Классификация термических режимов почв (на глубине 50 см) по [Soil Taxonomy, 1999]

Наименование почвы		Глубина залегания многолетней мерзлоты, м	Среднегодовая температура, °С	Средне-летняя температура, °С	Разница среднезимней и среднелетней температур, °С	Температурный класс
Настоящая статья	[Soil Taxonomy, 1999]					
Торфяно-глеезем криотурбированный	Ruptic-Histic Aquiturbel	<1	-1...1	<6	<6	Subgelic
Торфяно-глеезем криогенно-ожелезненный	Ruptic-Histic Aquiturbel		-4...-2			
Слоистая аллювиальная	Lithic Psammorthels	1-2	-3...0		4-8	
Сухоторфяная (участок р. Сейда)	Typic Folistel	<1	-5...-2		>>6	Pergelic, Subgelic
Сухоторфяная (участок р. Бол. Роговая)	Typic Folistel		-4...-2		2-7	Subgelic
Торфяная переходная	Typic Hemistel		-2...-1		<6	
Торфяная олиготрофная	Lithic Fibristel					

Значения российского показателя отражают влияние поверхностных условий в течение года: мощности снежного покрова, характера напочвенного покрова и др. Значения американского показателя в большей степени отражают влияние условий ниже по профилю (в том числе мерзлотных).

ВЫВОДЫ

В зоне прерывистого и островного распространения ММП европейского Северо-Востока России в непосредственном соседстве формируются мерзлотные почвы, различающиеся по зимним и годовым температурным показателям. Различия зимних температурных показателей вызваны дифференцированной по территории мощностью снежного покрова, определяемой ландшафтным положением. Летние температурные показатели в верхних горизонтах (0–20 см) исследуемых почв относительно выровнены, дифференциация в нижних горизонтах обусловлена разной глубиной залегания ММП.

На торфяных и минеральных буграх формируются холодные мерзлотные почвы с суровым зимним температурным режимом. Относительно низкие среднегодовые температуры верхних горизонтов ММП при их неглубоком залегании свидетельствуют об относительной стабильности мерзлоты в почвах торфяных бугров.

Почвы пологих, пониженных и слабонаклонных участков составляют группу теплых профилей, характеризующихся относительно мягкими зимним и годовым термическими режимами. Суглинистые почвы этой группы подстилаются сравнительно теплыми ММП, особо чувствительными к климатическим изменениям. Устойчивые положительные среднегодовые температуры СТС в торфяно-глееземе криотурбированном подтверждают и диагностируют протаивание мерзлоты в минеральных почвогрунтах, наблюдаемое в регионе в последние два десятилетия.

Отечественная и американская классификации температурных режимов отражают различия ландшафтных условий мерзлотных почв независимо от их состава. Российская классификация температурных режимов отличается более высоким разрешением, однако ее необходимо дополнить параметрами для выделения блока “теплых” мерзлотных почв восточноевропейской тундры.

Работа выполнена при поддержке проекта Thermal State of Permafrost (TSP) Университета Аляски (Фэрбенкс, США), проекта Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM), РФФИ (проект 14-05-31111).

Литература

- Геокриологическая** карта СССР, масштаб 1:2,5 млн / Отв. ред. Э.Д. Ершов, К.А. Кондратьев. М., Мин-во геологии СССР; МГУ, 1998.
- Геокриология** СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1988, 358 с.
- Государственная** почвенная карта России, масштаб 1:1 млн. Лист Q-41 “Воркута” / Отв. ред. Л.Л. Шишов. М., ФСКР, 2000.
- Димо В.Н.** Тепловой режим почв СССР / В.Н. Димо. М., Колос, 1972, 360 с.
- Классификация** и диагностика почв России / Авторы, сост. Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск, Ойкумена, 2004, 342 с.
- Кононенко А.В.** Гидротермический режим таяющих и тундровых почв европейского Северо-Востока / А.В. Кононенко. Л., Наука, 1986, 145 с.
- Кудрявцев В.А.** Мерзлотоведение / В.А. Кудрявцев, Н.Ф. Полтев, Н.Н. Романовский и др. М., Изд-во Моск. ун-та, 1981, 240 с.
- Мажитова Г.Г.** Температурные режимы почв в зоне несплошной многолетней мерзлоты европейского Северо-Востока России // Почвоведение, 2008, № 1, с. 54–67.
- Оберман Н.Г.** Мерзлые породы и криогенные процессы в Восточно-Европейской Субарктике // Почвоведение, 1998, № 5, с. 540–550.

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. URL: <http://www.council.gov.ru/media/fiels/41d44f243cef107baf4f.pdf> (дата обращения: 10.01.2014).

Павлов А.В., Москаленко Н.Г. Термический режим почвы на севере Западной Сибири // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 2, с. 11–19.

Шаманова И.И. Влияние снега, растительного покрова и распахки на тепловое состояние грунтов в районе Воркуты // Биологические основы использования природы Севера. Сыктывкар, Коми кн. изд-во, 1970, с. 186–195.

Burn C.R. The Thermal Regime of Cryosols / C.R. Burn. Berlin; Heidelberg; N.Y., Springer-Verlag, 2004, p. 391–414.

Davidson E.A., Janssens I.A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change // Nature, 2006, No. 440, p. 165–173.

Hugelius G., Virtanen T., Kaverin D., Pastukhov A., Rivkin E., Marchenko S., Romanovsky V., Kuhry P. High-resolu-

tion mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic // J. Geophys. Res., 2011, No. 116, G03024, doi:10.1029/2010JG001606.

Lunardini V. Theory of n-factors and correlation of data // Proc. of the 3rd Intern. Conf. on Permafrost (Edmonton, Alberta, July 10–13, 1978). Ottawa, Ontario, Natl. Res. Council of Canada, 1978, vol. 1, p. 40–46.

Mazhitova G., Malkova G., Chestnykh O., Zamolodchikov D. Active-layer spatial and temporal variability at European Russian Circumpolar-Active-Layer-Monitoring (CALM) sites // Permafrost and Periglacial Processes, 2004, vol. 15(2), p. 123–139.

Soil Taxonomy. By Soil Survey Staff. 2nd ed. New York, U.S. Department of Agriculture, Nat. Resour. Conserv. Service. Agricult. Handbook, 1999, No. 436, 869 p.

Yli-Halla M., Mokma D.L. Soil temperature regimes in Finland // Agriculture and Food Sci. Finland, 1998, vol. 7, p. 507–512.

*Поступила в редакцию
14 мая 2013 г.*