

УДК 551.525.5 (551.345)

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ХОЛОДНЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ НА ЮЖНОМ ПРЕДЕЛЕ КРИОЛИТОЗОНЫ (ЕВРОПЕЙСКИЙ СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)*

© 2014 г. **Д. А. Каверин, А. В. Пастухов,**
Г. Г. Мажитова

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28
e-mail: dkav@mail.ru*

Исследован температурный режим мерзлотных почв, характеризующихся наиболее холодным температурным режимом на южном пределе криолитозоны европейского Северо-Востока России. В условиях южной тундры мерзлотные почвы с холодным температурным режимом приурочены к торфяным и минеральным почвообразующим породам. Охарактеризована сезонная и многолетняя динамика температуры их сезонно-талых и подстилающих многолетнемерзлых слоев. Мерзлотные почвы охарактеризованы по основным температурным показателям.

Ключевые слова: температурный режим, холодные мерзлотные почвы, многолетнемерзлые породы, сезонно-талый слой.

ВВЕДЕНИЕ

И.В. Забоева всегда уделяла особое внимание стационарным исследованиям режимов функционирования таежных и тундровых почв, в том числе термического режима. Непосредственно ею исследован температурный режим глееподзолистых почв северной

* Работа выполнена при поддержке проекта Thermal State of Permafrost (TSP) Университета Аляски (Фербенкс, США), проекта Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM), гранта РФФИ № 14-05-31111 “Многолетнемерзлые торфяники Большеземельской тундры: экологическое состояние почвенно-мерзлотного комплекса при климатическом потеплении в XXI веке”.

тайги (Забоева, 1975). В тундровой зоне изучением температурного режима тундровых почв занимались А.В. Кононенко (1986) и Г.Г. Мажитова (2008). А.В. Кононенко (1986) охарактеризован летний гидротермический режим двух целинных тундровых почв, без характеристики их зимних и годовых параметров и связи разнообразия режимов на ландшафтном уровне. Г.Г. Мажитовой (2008) детально рассмотрен температурный режим 11-и почв, формирующихся в разнообразных ландшафтах равнинной и горной тундры, приуроченных к мерзлым и талым участкам. В работе показано резкое различие зимних и годовых температурных показателей мерзлотных и немерзлотных почв при сходе летних показателей в корнеобитаемом слое. При этом исследования температурного режима мерзлотных почв ограничивались мощностью сезонно-талого слоя (СТС).

С 2007 г. в юго-восточной части Большеземельской тундры нами начаты наблюдения за температурой основных типов мерзлотных почв. Мониторинг осуществляется в пределах СТС и в верхнем слое многолетнемерзлых пород (ММП) (до глубины 120 см). Это позволяет оценить отклик почв с различными температурными режимами на межгодовую динамику температуры воздуха, а в перспективе при наличии более длительного ряда наблюдений и на изменение климата. 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, может ускорить процесс потепления (Davidson & Janssens, 2006). Субарктика европейского Северо-Востока является одним из особенно 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 преимущественно высокотемпературных ММП, относительно нестабильных при потеплении климата. Однако на южном пределе криолитозоны существуют условия для функционирования почв с относительно суровым температурным режимом. Наиболее холодные по температурному режиму почвы (далее – холодные мерзлотные почвы) формируют-

ся локально на торфяных, а также минеральных буграх, характеризующихся наименьшей мощностью снежного покрова в тундре.

Цель статьи – охарактеризовать основные параметры температурного режима холодных мерзлотных почв и подстилающих ММП южной тундры.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование температурного режима почв проводили на двух участках с тундровой растительностью: в подзоне южной (кустарниковой) тундры – в бассейне р. Большая Роговая и в северной лесотундре (бассейн р. Сейда). Район исследований относится к бассейну р. Усы – притока р. Печоры (европейский Северо-Восток России), к зоне распространения прерывистой многолетней мерзлоты (Геокриологическая карта, 1998) со среднегодовыми температурами ММП 0... –2°C. На территории преобладают комплексы поверхностно-глеевых (мерзлотных и немерзлотных), торфяно-глеевых и болотных мерзлотных почв (Государственная почвенная карта..., 2000).

По данным метеостанции Воркута, среднегодовая температура воздуха в районе проведения работ –5.7°C (1947–2011 гг.). Температурные показатели воздуха за годы наблюдений (2007–2011 гг.) не выходили за пределы среднемноголетних значений (табл. 1). Среднегодовое количество осадков за период исследований было выше среднемноголетних – 645 мм/год. При расчете годовых значений температуры воздуха и осадков использовали данные за гидрологический год (1 октября–30 сентября).

Объектами исследования послужили 4 профиля наиболее холодных по температурному режиму мерзлотных почв, формирующихся на минеральных и торфяных отложениях в условиях южной тундры европейского Северо-Востока России (табл. 2). В соответствии с классификацией температурных режимов (Димо, 1972) все профили относятся к мерзлотному типу температурного режима по большинству параметров. Для них характерна “сливающаяся” мерзлота (Геокриология СССР, 1988).

На минеральных массивах (наветренные вершины и склоны увалов, бугры и т.д.) южной тундры холодные мерзлотные почвы формируются преимущественно под мохово-лишайниковой растительностью.

Таблица 1. Климатические показатели (по данным метеостанции Воркута)

Гидрологический год (01.10–31.09)	Среднегодовая температура воздуха, °С	Сумма средне-суточных температур воздуха, °С · дней		Годовая сумма осадков, мм	Сумма осадков за июнь–сентябрь, мм	Сумма осадков за декабрь–февраль, мм
		> 0°С	>10°С			
2007/2008	–3.6	1126	802	525	195	132
2008/2009	–4.5	1046	701	613	252	124
2009/2010	–7.0	995	602	776	376	129
2010/2011	–4.1	1002	558	668	215	88
Среднее за 2007–2011	–4.8	1042	666	645	259	118
Среднее много-летнее (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

Глубина СТС в минеральных почвах варьирует от 50 до 120 см. Торфяные мерзлотные почвы широко распространены в пределах плоскобугристых болот, они приурочены к вершинам торфяных бугров с мощностью торфа более 40 см. Глубина сезонного протаивания в торфяных почвах не превышает 40–60 см.

Параметры температурного режима приведены для двух профилей минеральных (профили 1, 2) и двух – торфяных мерзлотных почв (профили 3, 4) (табл. 2). Измерения температуры проводили с помощью цифровых логгеров НОВО, установленных на глубине 0, 20, 50, 100 (120) см и запрограммированных на 8 измерений в сутки. Датчики логгеров в каждом профиле закрепляли на деревянной рейке, погруженной в скважину (отверстие) диаметром 3 см и глубиной 100–120 см. Глубину сезонного протаивания измеряли с помощью градуированного металлического зонда в конце вегетационного периода. Измерение мощности снежного покрова проводили в марте. Температуру воздуха для расчетов брали по метеостанции Воркута. Температурные исследования почв проводили в период с 2007 по 2011 гг.

Таблица 2. Характеристика объектов исследования

Номер и индекс почвенного профиля	Координата	Ландшафт	Глубина СТС, см	Средняя максимальная мощность снега, см	Строение профиля почвы	Название почвы (Классификация почв России, 2004)	Название почвы по тексту статьи
1. Профиль U58	67°19' с.ш., 62°24' в.д.	Бассейн р. Б. Роговая. Минеральный бугор (пальза), кустарничково-мохово-лишайниковая тундра	100	≤30	T (0-20)– B (20-37)– Bf (37-53)– BС (53-70)– Cg (70-85+)	Торфяно-глезем криогенно-ожеженный	Торфяно-глезем криогенно-ожеженный
2. Профиль U71	67°20' с.ш., 62°20' в.д.	Бассейн р. Б. Роговая. Плоская вершина минерального бугра (пальзы), кустарничково-мохово-лишайниковая тундра	110	≤20	T (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+)	Торфяно-глезем аллювиальная на слоистых суглинках Слойчатая аллювиальная на слоистых суглинках Слойчатая аллювиальная на слоистых суглинках Слойчатая аллювиальная на слоистых суглинках	Слойчатая аллювиальная

Номер и индекс почвенного профиля	Координата	Ландшафт	Глубина СТС, см	Средняя максимальная мощность снега, см	Строение профиля почвы	Название почвы (Классификация почв России, 2004)	Название почвы по тексту статьи
3. 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)- Т1 (7-40)- Т2 (40-52)- Т3 (52-100+)	Сухогорфяная	Сухогорфяная (участок Сейда)
4. Профиль U92	67°19' с.ш., 62°23' в.д.	Бассейн р. Б. Роговая. Выпуклая вершина торфяной бугра, кустарничково-моховая	45	≤10	О (0-5)- Т1 (5-26)- Т2 (26-41)- Т3 (41-57)- Т4 (57-100+)	Сухогорфяная	Сухогорфяная (участок Б.Роговая)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зимний температурный режим почв. Мерзлотные почвы в регионе формируются на относительно наветренных участках, где максимальная мощность снега обычно не превышает 50 см (Мажитова, 2008). Сезонное промерзание их верхней части начинается в октябре с приходом устойчивых отрицательных температур воздуха. В ноябре среднемесячные температуры верхних слоев СТС уже становятся отрицательными (рис. 1, 2). С глубиной температуры промерзания замедляются, в горизонтах средней (20–50 см) и нижней частей (50–120 см) профиля могут фиксироваться нулевые завесы продолжительностью до 2 месяцев. Нулевые завесы – длительно сохраняющиеся на определенной глубине постоянные близкие к 0°C температуры (Геокриология СССР, 1988). Наибольшая продолжительность периода субнулевых температур отмечается на контакте СТС–ММП.

Диапазон сумм отрицательных температур исследуемых почв на поверхности составил $-362 \dots -2508^\circ\text{C} \cdot \text{дней}$ (табл. 3). Маломощный снежный покров (0–30 см) способствует сильному охлаждению почв. Наибольшее охлаждение ММП происходит в торфяных буграх на глубине 100–120 см.

Таким образом, создаются наиболее благоприятные условия для зимнего охлаждения почв и подстилающих многолетнемерзлых пород. Это в определенной степени способствует сохранению ММП в современных условиях меняющегося климата.

Холодные мерзлотные почвы сильно реагируют на изменения температуры воздуха зимой, наиболее холодным месяцем является январь или февраль (рис. 2). Максимальное охлаждение ММП отмечается в период с февраля по апрель. Среднемесячные температуры ММП для самого холодного месяца варьируют в пределах от -4 до -12°C .

Зимний N-фактор, т.е. отношение сумм температур $<0^\circ\text{C}$ на поверхности почвы к таковым в воздухе, сильно зависит от высоты снежного покрова. Значения зимнего N-фактора, отражающего поступление холода в почвы, для рассматриваемых профилей варьирует в диапазоне 0.44–0.76, что в целом характерно для верхней части диапазона мерзлотных почв (Мажитова, 2008).

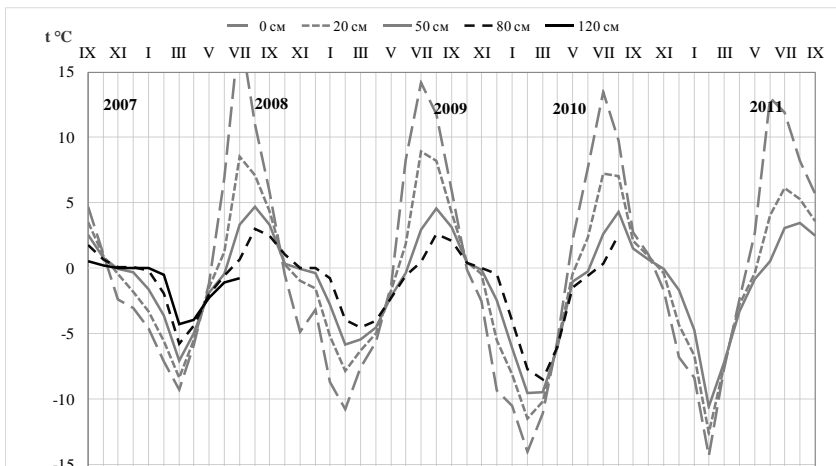


Рис. 1. Динамика среднемесячных температур (°С) в профиле слоистой аллювиальной почвы.

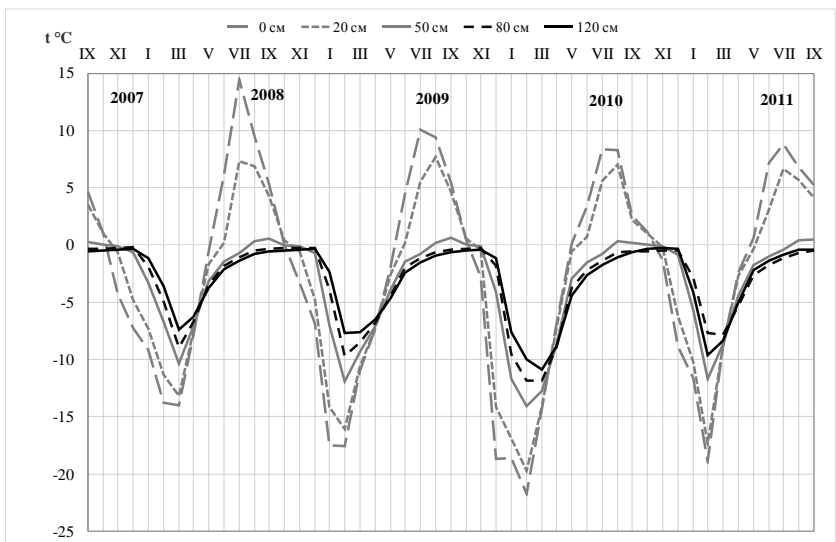


Рис. 2. Динамика среднемесячных температур (°С) в профиле сухоторфяной почвы (участок Сейда).

Таблица 3. Суммы отрицательных среднесуточных температур почв и многолетнемерзлых пород, °С · дней

Глубина, см	Гидрологический год			
	2007–2008	2008–2009	2009–2010	2010–2011
1. Торфяно-глеезем криогенно-ожелезненный				
0	-1289	-1843	-1720	-1409
20	-943	Не опр.	-1405	Не опр.
50	-803	-802	-1149	»
100	-647	Не опр.	-970	»
2. Слоистая аллювиальная почва				
0	-1036	-1324	-1628	-1246
20	-805	-858	-1260	-1030
50	-606	-644	-1049	-847
80	-457	-484	-865	Не опр.
120	-362		Не опр.	
3. Сухоторфяная почва (участок Сейда)				
0	-1753	-1974	-2508	-1559
20	-1418	-1684	-2204	-1364
50	-1017	-1273	-1709	-1032
80	-922	-1145	-1599	-981
120	-858	-1068	-1507	-1020
4. Сухоторфяная почва (участок Б. Роговая)				
0	-1304	Не опр.	-2183	-1731
20	-1127	-1411		Не опр.
50	-897	-1081	-1505	-1223
100	-730		Не опр.	-1207

Летний температурный режим почв. Разрушение устойчивого снежного покрова на вершинах торфяных и минеральных бугров происходит относительно рано: в конце апреля–начале мая. Сезонное протаивание поверхностных горизонтов начинается во второй половине мая с установлением устойчивых положительных среднесуточных температур воздуха. Самый теплый месяц в поверхностных горизонтах почвы – июль или август (рис. 1, 2). Максимальные температуры нижних горизонтов СТС наблюдаются в период с августа по октябрь, в ММП – с сентября по декабрь.

Диапазон сумм температур >0 °С на глубине 0 см за все годы наблюдений во всех почвах составил 658...1312 °С · дней (табл. 4). На глубине 20 см суммы положительных температур в

Таблица 4. Суммы положительных среднесуточных температур почв и многолетнемерзлых пород, °С · дней

Глубина, см	Сумма среднесуточных температур >0°C			Сумма среднесуточных температур >10°C		
	гидрологический годы					
	2008– 2009	2009– 2010	2010– 2011	2008– 2009	2009– 2010	2010– 2011
1. Торфяно-глезем криогенно-ожелезненный						
0	906	755	970	554	317	388
20	118	175	76	0	0	0
50	85	90	43	0	0	0
100	4	1	3	0	0	0
2. Слоистая аллювиальная почва						
0	1272	1138	1312	898	720	814
20	708	594	612	230	108	9
50	325	276	316	0	0	0
80	191	105	Не опр.	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0
3. Сухоторфяная почва (участок Сейда)						
0	911	719	917	415	211	213
20	568	497	628	49	49	12
50	29	18	29	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0
120	0	0	0	0	0	0
4. Сухоторфяная почва (участок Б. Роговая)						
0	Не опр.	658	740	90	126	265
20	189	Не опр.		0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	0	0	0

1.5–3 раза ниже по сравнению с поверхностью (табл. 4). Максимальные суммы положительных температур на глубине 20 см зафиксированы в слоистой аллювиальной и сухоторфяной (участок Сейда) почвах. В слоистой аллювиальной почве маломощная торфянистая подстилка (6 см) и относительно легкий гранулометрический состав способствуют глубокому более проникновению положительных температур, что отражается и в большей мощности СТС (110 см). Лучший прогрев верхних горизонтов сухоторфяной почвы (участок Сейда) объясняется разреженной мохово-лишайниковой растительностью бугра. Черный цвет оголенного

торфа способствует повышенному поглощению солнечной радиации. В целом, для холодных мерзлотных почв региона характерно проникновение температур $>10^{\circ}\text{C}$ до глубины 10–15 см (основной корнеобитаемый слой). Проникновению температур $>10^{\circ}\text{C}$ препятствует наличие мощного органогенного 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 0.8...–4.8 $^{\circ}\text{C}$, ММП – –1.3...–4.4 $^{\circ}\text{C}$ (табл. 5). Во всех четырех исследуемых профилях среднегодовые температуры СТС были отрицательными, постепенно снижаясь вниз по профилю. Отрицательные среднегодовые температуры в

Таблица 5. Среднегодовая температура почв и многолетнемерзлых пород, $^{\circ}\text{C}$

Глубина, см	Гидрологические годы			
	2007–2008	2008–2009	2009–2010	2010–2011
	1. Торфяно-глеезем криогенно-ожезлененный			
0	–0.4	–2.8	–2.6	–1.2
20	–2.5	–2.6	–3.7	Не опр.
50	–1.7	–2.2	–3.2	»
100	–2.2	Не опр.	–2.9	»
	2. Слоистая аллювиальная почва			
0	0.8	–0.2	–1.7	–0.1
20	–0.4	–0.4	–2.2	–1.3
50	–0.7	–0.9	–2.5	–1.6
80	–0.7	–0.8	–2.3	Не опр.
120	–1.3		Не опр.	
	3. Сухоторфяная почва (участок Сейда)			
0	–1.8	–2.9	–4.6	–2.0
20	–2.3	–3.1	–4.4	–2.2
50	–2.7	–3.4	–4.6	–2.8
80	–2.5	–3.1	–4.4	–2.6
120	–2.3	–2.9	–4.1	–2.7
	4. Сухоторфяная почва (участок Б. Роговая)			
0	–2.5	Не опр.	–4.8	Не опр.
20	–2.1	–3.8	–4.2	–3.1
50	–2.5	–3.0	–4.1	–3.3
100	–3.0		Не опр.	–3.3

мерзлотных почвах и положительные в немерзлотных – наиболее нормальная ситуация (Кудрявцев и др., 1981; Burn, 2004). Диапазон сезонных колебаний температуры постепенно снижается от поверхности почвы вниз по профилю, охватывая верхнюю толщу ММП до глубины нулевых колебаний температур (рис. 1, 2). Сезонные колебания температуры еще четко выражены в исследуемых мерзлых горизонтах на глубине 50–120 см, что часто соответствует зоне формирования переходного слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В зоне прерывистого и островного распространения ММП европейского Северо-Востока России на торфяных и минеральных наветренных участках под маломощным снежным покровом формируются мерзлотные почвы с низкими зимними и годовыми температурными показателями. Эти почвы образуют группу холодных мерзлотных профилей с суровым температурным режимом. Сравнительно низкие среднегодовые температуры верхних горизонтов ММП при их неглубоком залегании свидетельствуют об относительной стабильности мерзлоты в почвах торфяных и минеральных бугров. Летние температурные показатели в верхних горизонтах (0–20 см) исследуемых почв являются типичными для почв мохово-лишайниковых тундр, в нижних горизонтах дифференциация обусловлена разной глубиной залегания ММП. Повышенный прогрев верхних горизонтов в почвах торфяных бугров связывается с наличием несплошного растительного покрова, в минеральных почвах – малой мощностью грубогумусового горизонта и легким гранулометрическим составом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геокриологическая карта СССР. М-б 1 : 2.5 млн. / Отв. ред. Ершова Е.Д., Кондратьева К.А. М.: Мин. геологии СССР и Изд-во Моск. ун-та, 1998.
2. Геокриология СССР. Европейская территория СССР / Под ред. Ершова Э.Д. М.: Недра, 1988. 358 с.
3. Государственная почвенная карта России. М-б 1 : 1 млн. Лист Q-41 “Воркута” / Отв. ред. Шишов Л.Л. М.: ФСГКР, 2000.
4. Димо В.Н. Тепловой режим почв СССР. М.: Колос, 1972. 360 с.
5. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена,

2004. 342 с.

6. *Кононенко А.В.* Гидротермический режим таящих и тундровых почв Европейского Северо-Востока. Л.: Наука, 1986. 145 с.

7. *Кудрявцев В.А., Полтев Н.Ф., Романовский Н.Н. и др.* Мерзлотоведение. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 240 с.

8. *Мажитова Г.Г.* Температурные режимы почв в зоне несплошной многолетней мерзлоты европейского Северо-Востока России // Почвоведение. 2008. №1. С. 54–67.

9. *Оберман Н.Г., Шеслер И.Г.* Современные и прогнозируемые изменения мерзлотных условий Европейского северо-востока Российской Федерации // Проблемы Севера и Арктики Российской Федерации. 2009. Вып. 9. С. 96–106.
<http://council.gov.ru/files/journalsf/number/20090922141450.pdf>

10. Cryosols (Permafrost-Affected Soils) / Eds. Burn C.R. The Thermal Regime of Cryosols. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 2004. P. 391–414.

11. *Davidson E.A., Janssens I.A.* Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change // Nature. 2006. № 44. P. 165–173.

12. *Hugelius G., Virtanen T., Kaverin D., Pastukhov A., Rivkin F., Marchenko S., Romanovsky V., Kuhry P.* High-resolution mapping of ecosystem carbon storage and potential effects of permafrost thaw in periglacial terrain, European Russian Arctic // J. Geophys. Res. 2011. № 116. G03024. doi:10.1029/2010JG001606.

13. *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. V. 15 (2). P. 123–139.

PECULIAR TEMPERATURE REGIME IN COLD FROZEN SOILS ALONG THE SOUTHERN BOUNDARY OF THE CRYOLITHOZONE IN THE NORTH-EAST OF EUROPEAN RUSSIA

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

*Institute of Biology, Komi Scientific Center, Ural Branch of
the Russian Academy of Sciences, 167982, Syktyvkar,
ul. Kommunisticheskaya, 28*

Under study was the temperature regime of frozen soils situated along the southern boundary of cryolithozone in the North-East of European

Russia. In southern tundra the frozen soils with the cold temperature regime are confined to peat and mineral parent materials. The seasonal and long-term temperature dynamics in seasonal-thawing and underlying permafrost-affected layer is shown. The frozen soils are characterized by the main temperature indices.

Keywords: temperature regime, cold frozen soils, permafrost-affected rocks, seasonal-thawing layer.