

ПАЛЕОКРИОГЕНЕЗ И ПОЧВООБРАЗОВАНИЕ

УДК 551.525.5 (551.345)

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-5(47-56)

**ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЧВОГРУНТОВ
БУГРИСТО-МОЧАЖИННЫХ БОЛОТ В ЗОНЕ РЕДКООСТРОВНОГО
РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД
(ЕВРОПЕЙСКИЙ СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)****Д.А. Каверин, А.В. Пастухов***Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия; dkav@mail.ru*

Для периода 2013–2016 гг. охарактеризован температурный режим почвогрунтов бугристо-мочажинных болот на северо-восточной окраине Русской равнины (65–66° с.ш.) в зоне редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород. Выявлены значительные различия зимних, летних и годовых значений параметров температурного режима между почвогрунтами многолетнемерзлых торфяных бугров и талых мочажин. С целью оценки сезонных колебаний температуры в почвогрунтах бугристо-мочажинных болот рассчитаны коэффициенты нагревания и охлаждения. Сравнительный анализ индексов морозности воздуха и почвы показал отепляющее влияние современных климатических изменений на почвогрунты болот в условиях редкоостровного распространения многолетнемерзлых пород на северо-востоке Европейской России.

Температурный режим почвогрунтов, бугристо-мочажинные болота, редкоостровное распространение многолетнемерзлых пород

**TEMPERATURE STATE OF SOILS OF PEAT PLATEAUS
IN THE SPORADIC PERMAFROST AREA (EUROPEAN NORTHEAST OF RUSSIA)****D.A. Kaverin, A.V. Pastukhov***Institute of Biology, Komi Science Center UB RAS,
28, Kommunisticheskaya str., Syktyvkar, 167982, Russia; dkav@mail.ru*

The temperature regime of soils and underlying sediments in peat plateaus located in the northeastern margin of the Russian Plain (65–66° N) in the area of sporadic permafrost distribution has been characterized for the period of 2013–2016. Winter, summer and mean annual temperature regimes are found to differentiate significantly between soils in permafrost peat mounds and thawed fens. The warming and cooling coefficients have been evaluated in order to assess the seasonal variations of temperature in peat plateau soils. A comparative analysis of the calculated warming/cooling climatic coefficients and indices revealed the warming effect of the contemporary climatic variations on peat soils within the sporadic permafrost area in the north-east of European Russia.

Soil temperature regime, peat plateaus, sporadic permafrost distribution

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата является одной из глобальных проблем XXI в. Ожидается, что протаивание многолетнемерзлых пород (ММП) и последующее продвижение границы леса на север могут привести к кардинальным изменениям в почвогрунтах и растительности [Куликов и др., 1997; Hugelius et al., 2011]. Для оценки влияния современного климата на температурное состояние почвогрунтов криолитозоны широко используются данные геокриологических стационаров и метеорологических станций [Павлов, 2008; Romanovsky et al., 2002], проводится анализ почвенно-климатических коэффициентов [Klene et al., 2001; Throop et al., 2012].

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 оттаивания ММП отмечаются вдоль южной границы криолитозоны в Приуральской части региона [Оберман, Шеслер, 2009]. На европейской территории России южный предел распространения ММП преимущественно совпадает с южной границей тундровых ландшафтов. На крайнем южном пределе криолитозоны европейского Северо-Востока, в подзоне крайнесеверной тайги, встречаются изолированные острова высокотемпературных ММП, приурочен-

ных к массивам бугристо-мочажинных болот [Гео-криологическая карта..., 1998; Осадчая, Тумель, 2012].

Исследования температурного режима торфяных мерзлотных почвогрунтов юга криолитозоны европейского Севера проводились преимущественно в пределах зоны массивно-островной многолетней мерзлоты [Мажитова, 2008; Малкова, 2010]. Почвогрунты мерзлотных торфяников в тундре и лесотундре характеризуются наиболее суровым температурным режимом, благоприятным для сохранения многолетней мерзлоты [Каверин и др., 2014].

Температурному режиму почв на крайнем южном пределе криолитозоны в целом уделялось не много внимания. Исследования торфяных мерзлотных почв в зоне островного распространения ММП проведены в Западной Сибири. Установлено, что они относятся к очень холодному подтипу, мерзлотному типу температурного режим, несмотря на их географическое положение [Гончарова и др., 2015]. На европейском Севере температурный режим почв изучался в середине XX в. в освоенных и целинных торфяных болотах крайнесеверной тайги [Кочеткова, 1966]. Показано, что мелиорация торфяных почв часто приводит к ухудшению их тепловых свойств, а освоение низинных торфяных болот – к формированию в них многолетнемерзлых перелетков.

С целью определения температурного состояния и устойчивости мерзлотных почвогрунтов в зоне редкоостровного распространения ММП (подзона крайнесеверной тайги), с 2013 г. сотрудниками Института биологии Коми НЦ начат долгосрочный температурный мониторинг почв торфяных многолетнемерзлых бугров и талых мочажин и подстилающих их пород. Мониторинговые исследования позволяют оценить отклик самых южных многолетнемерзлых почвогрунтов Восточно-Европейской равнины на межгодовые и сезонные изменения температуры воздуха, а в перспективе, при наличии более длительного ряда наблюдений, и на изменение климата. Целью настоящей статьи является оценка современного температурного состояния почвогрунтов бугристо-мочажинных болот во взаимосвязи с климатическими па-

раметрами на крайнем южном пределе криолитозоны европейского Северо-Востока.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований расположен в подзоне крайнесеверной тайги, северная часть которой характеризуется редкоостровным распространением ММП. Данная территория отличается умеренно континентальным умеренно холодным климатом, основные климатические параметры представлены в табл. 1. Исследования температурного режима почвогрунтов бугристо-мочажинных болот проводились в 2013–2016 гг. на трех ключевых участках в бассейне р. Косью (Интинский административный район Республики Коми) (рис. 1). Подробная характеристика ключевых участков исследований приведена в табл. 2. Условные названия ключевых участков даны в соответствии с их географическим положением относительно Уральской горной страны. Выбор местоположения участков исследований обоснован постепенным, с запада на восток, изменением геологического строения и геоморфологии восточной части Печорской равнины, грани-

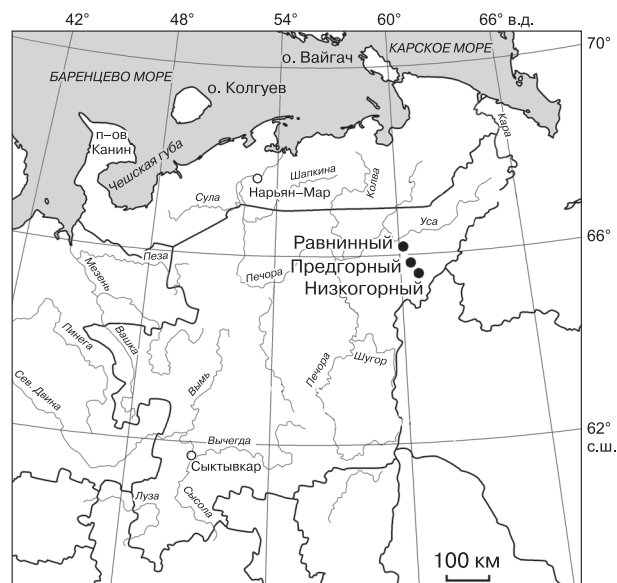


Рис. 1. Географическое положение ключевых участков исследований.

Таблица 1. Климатические показатели (метеостанция Петрунь)

Гидрологический год (01.10–31.09)	Среднегодовая температура воздуха, °С	Сумма среднесуточных температур воздуха		Годовая сумма осадков, мм	Сумма осадков, мм	
		>0 °С	<0 °С		июнь–сентябрь	декабрь–февраль
2013/14	-3.8	1215	-2648.1	734.8	330	112
2014/15	-2.4	1410	-2313.0	616.0	242	127
2015/16	0.1	1962	-1894.1	508.8	259	58
Среднее за 2013–2016	-2.0	1529	-2285	620	277	99
Норма (1961–2016)	-3.9	1299	-2687	532	238	93
Диапазон (1961–2016)	0.1...-8.5	897...1962	-1170...-3809	341...735	122...402	24...141

Таблица 2. Характеристика объектов исследования

Ключевой участок исследований (элемент рельефа)	Координаты	Ландшафт урочища	Характеристика ландшафта	Глубина СТС, см	Средняя макс. мощность снега, см	Строение профиля почвы	Наименование почвы*	Наименование почвогрунтов**
1. Равнинный (торфяной бугор)	66°05' с.ш., 59°58' в.д.	Заболоченный водораздел рек Бол. Инга и Мал. Инга. Крупнобугристо-мочажинный болотный комплекс	Вершина торфяного бугра. Кустарничково-мохово-лишайниковая растительность: багульник, брусника, голубика, ерник, морошка, зеленые мхи, лишайники. Оголенные пятна занимают до 10 % площади	35	21	О (0-5) – Т ₁ (5-15) – Т ₂ (15-25) – Т ₃ ¹ (25-87) – Т ₄ ¹ (87-94) – Т ₅ ¹ (94-106)	Торфяная олиготрофная мерзлотная почва	Почвогрунты бугра Равнинного участка
2. Равнинный (мочажина)	66°05' с.ш., 59°58' в.д.		Пушицево-сфагновая мочажина: клюква, пушица, сфагновые мхи	Талая	117	О (0-5) – Т ₁ (5-10) – Т ₂ (10-20) – Т ₃ (20-40)	Торфяная олиготрофная почва мочажин	Почвогрунты мочажины Равнинного участка
3. Предгорный (торфяной бугор)	65°54' с.ш., 60°26' в.д.	Урочище Ниче-Кулишанор, заболоченный водораздел рек Черная и Бол. Инга. Крупнобугристо-мочажинный болотный комплекс	Вершина торфяного бугра. Кустарничково-мохово-лишайниковая растительность	50	46	О (0-3) – Т ₁ (3-20) – Т ₂ (20-40) – Т ₃ (40-50) – Т ₄ ¹ (50-100)	Торфяная олиготрофная мерзлотная почва	Почвогрунты бугра Предгорного участка
4. Предгорный (мочажина)	65°54' с.ш., 60°26' в.д.		Пушицево-сфагновая мочажина: ерник, багульник, морошка, брусника, голубика, пушица, сфагновые мхи	Талая	109	О (0-6) – Т ₁ (6-23) – Т ₂ (23-33) – Т ₃ (33-48) – Т ₄ (48-55)	Торфяная олиготрофная почва мочажин	Почвогрунты мочажины Предгорного участка
5. Низкогорный (торфяной бугор)	65°25' с.ш., 60°49' в.д.	Водораздел рек Кожжим и Лемва, болотное урочище вокруг озера Вордэ-Ты. Предгорья Приполярного Урала. Бугристо-мочажинный болотный комплекс	Вершина торфяного бугра. Кустарничково-мохово-лишайниковая растительность	55	Не опр.	О (0-10) – Т ₁ (10-25) – Т ₂ (25-32) – Т ₃ (32-50) – Т ₄ ¹ (50-70) – Т ₅ ¹ (70-95)	Торфяная олиготрофная мерзлотная почва	Почвогрунты бугра Низкогорного участка
6. Низкогорный (мочажина)	65°25' с.ш., 60°49' в.д.		Ерничково-травянисто-моховая мочажина	Талая	Не опр.	О (0-5) – Т ₁ (5-20) – Т ₂ (20-40) – Т ₃ (40-50) – Т ₄ (50-60)	Торфяная олиготрофная почва мочажин	Почвогрунты мочажины Низкогорного участка

* По: [Классификация... почв России, 2004].

** Настоящая работа.

чащей с Уральской горной страной. Равнинный ключевой участок находится на низкой озерно-ледниковой равнине, Предгорный участок – на более высокой моренной равнине, Низкогорный участок характеризуется волнисто-увалистым рельефом [Атлас..., 1964].

Названия почв и индексы горизонтов даны по “Классификации почв России” [2004] и “Полевому определителю почв” [2008]. В табл. 1 приведены используемые далее по тексту названия почв. Под термином “почвогрунты” в работе понимается единая толща почв и подстилающих их пород общей мощностью от 2 до 10 м [Пармузин, Карпов, 1994]. Измерения почвенных температур проводились с помощью цифровых логгеров НОВО U-12-008, установленных в почве на глубинах 0, 0.2, 0.5, 1.0 м, в подстилающих породах на глубинах 2.0, 3.0, 5.0, 10.0 м и запрограммированных на 8 измерений в сутки. Точность измерения датчиков логгеров до 0.1 °С. В почве датчики логгеров закреплены на деревянной рейке, погруженной в скважину (отверстие) диаметром 3 см и глубиной 1 м. В подстилающих отложениях датчики логгеров помещены в скважину глубиной 10 м, выполненную в виде стальной трубы диаметром 7 см, в верхней части которой прикреплен оголовок для установки логгера. Таким образом, температурные исследования проводились как в профиле почв (включая сезоннотальный слой), так и в верхнем горизонте подстилающих (в том числе многолетнемерзлых) пород. На каждом из трех ключевых участков приборы устанавливались в двух точках – на вершине торфяного бугра и в мочажине.

Для расчетов климатических показателей (среднегодовая температура воздуха, суммы положительных и отрицательных температур воздуха, среднегодовая сумма осадков) использованы данные метеостанции Петрунь, расположенной на расстоянии 50 км к северу от Равнинного и Предгорного участков исследований (см. табл. 1). Значения температуры воздуха для этих участков по данным установленных логгеров сопоставимы с показателями метеостанции. Для климатической характеристики Низкогорного участка использованы данные температурного логгера, установленного на высоте 2 м в границах исследуемого бугристо-мочажинного болота. При расчете основных показателей температуры воздуха и почвогрунтов взяты данные за гидрологический год (1 октября–30 сентября). Для характеристики температурного режима почвогрунтов рассчитаны среднегодовые температуры, суммы положительных и отрицательных температур. Для оценки современного температурного состояния почвогрунтов вычислены индексы морозности воздуха и почвы (на глубине 0.2 м), коэффициенты нагревания и охлаждения исследуемой толщи почвогрунтов.

Значения коэффициента охлаждения почвогрунтов были приняты как отношение сумм отрицательных температур воздуха к таковым в почвогрунтах:

$$K_f = \frac{FDD}{FDDs},$$

где K_f – коэффициент охлаждения почвогрунтов; FDD – сумма отрицательных температур воздуха; $FDDs$ – сумма отрицательных температур почвогрунтов. Аналогично рассчитывался коэффициент нагревания почвогрунтов

$$K_w = \frac{DDT}{DDTs},$$

где K_w – коэффициент нагревания почвогрунтов; DDT – сумма положительных температур воздуха; $DDTs$ – сумма положительных температур почвогрунтов.

Индекс морозности воздуха принимает вид отношения

$$F = \frac{FDD_+^{1/2}}{FDD_+^{1/2} + DDT^{1/2}},$$

где F – индекс морозности воздуха; значение “+” подразумевает использование сумм отрицательных температур в виде положительных значений.

Аналогичным образом проведен расчет индекса морозности почв на глубине 0.2 м:

$$F_s = \frac{FDDs_+^{1/2}}{FDDs_+^{1/2} + DDTs^{1/2}}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зимний температурный режим почвогрунтов. Сезонное промерзание верхней части почв торфяных бугров начинается в октябре с приходом устойчивых отрицательных температур воздуха. Промерзание почв происходит с поверхности. В октябре–ноябре среднемесячные температуры верхних горизонтов (0–0.2 м) сезонноталого слоя (СТС) торфяных бугров уже становятся отрицательными (рис. 2). Вниз по профилю темпы промерзания замедляются, на глубине 0.2 м фиксируются нулевые завесы продолжительностью до 2 месяцев.

В почвогрунтах торфяных бугров с относительно небольшой мощностью снежного покрова (0.1–0.2 м) диапазон сумм отрицательных температур на поверхности почв составил –655...–1567 °С·сут, на глубине 20 см диапазон –303...–1092 °С·сут (табл. 3). Наиболее холодным профилем является почвогрунт торфяного бугра Низкогорного участка, что связано с суровыми климатическими условиями области Приполярного Урала и незначительной мощностью снега. Сумма отрицательных температур на глубине 1 м варьирует в пределах –138...–624 °С·сут, на глубине 10 м – в пределах –22...–425 °С·сут. Сезонные колебания температур, наиболее выраженные

в СТС, постепенно затухают в подстилающих ММП (см. рис. 2). На глубине 10 м они практически не выражены. В почвах бугров наиболее низкие температуры в пределах СТС зафиксированы в феврале (см. рис. 2). Максимальное охлаждение ММП на глубинах 1–3 м отмечается в период с марта по апрель, на глубине 5 м – с мая по июнь. Среднемесячные температуры для самого холодного месяца варьируют от -8 до -17 °С на поверхности почвы и в диапазоне $-2...-7$ °С в ММП на глубине 1 м. Суровость зимнего климата почв определяется исключительно мощностью снежного покрова. В 2015 г. средняя максимальная мощность снега на наиболее теплом Предгорном участке составила 0.44 м, тогда как на более холодном Равнинном – 0.21 м. Самым холодным профилем является почва бугра Низкогорного участка, что связано с минимальной мощностью снега (до 0.2 м).

По зимним температурным параметрам почвогрунты обводненных мочажин имеют принципиальные отличия от таковых торфяных бугров. В мочажинах зимнее промерзание охватывает лишь поверхность почв, где фиксируются околонулевые температуры в отрицательном диапазоне (рис. 3). Соответственно, почвогрунты мочажин на поверхности характеризуются незначительными суммами отрицательных среднесуточных температур (см. табл. 3). На глубине 0.2 м суммы отрицательных температур либо не определяются, либо их значения близки к нулю. В мочажинах минимальные среднемесячные температуры, как правило, фиксируются в феврале и составляют $-0.1...-2.3$ °С, снижаясь от почв Равнинного участка к Низкогорному. На глубине 0.2 м в почвогрун-

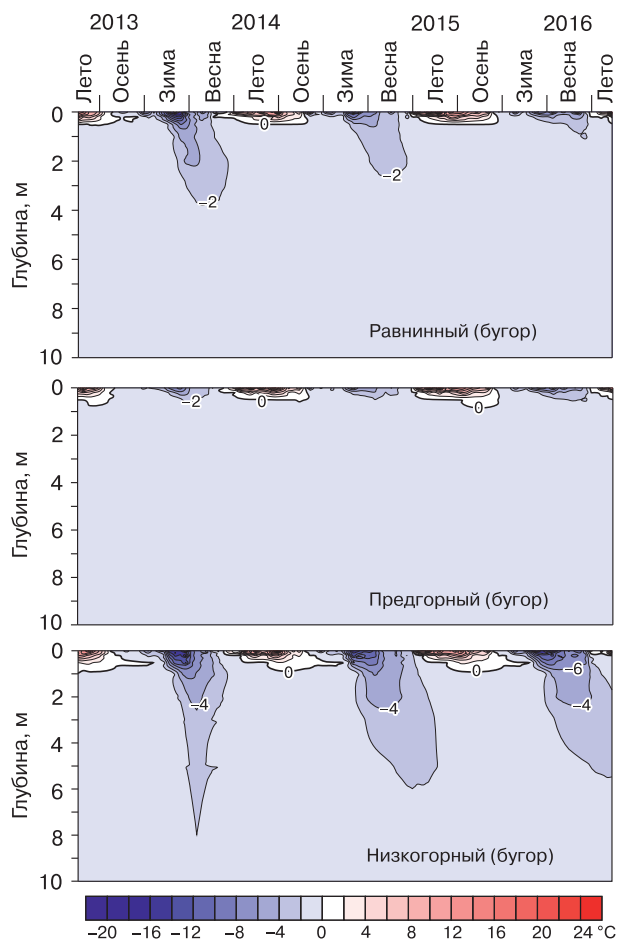


Рис. 2. Динамика температуры за 2013–2016 гг. в почвогрунтах торфяных многолетнемерзлых бугров.

Таблица 3. Суммы отрицательных температур почвогрунтов (°С·сут)

Почвогрунт	Гидрологический год	Глубина, м							
		0.0	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10.0
1. Почвогрунт бугра Равнинного участка	2013/14	-1390	-808	-462	-424	-455	-342	-216	-102
	2014/15	-1134	-615	-403	-369	-403	-352	-299	-166
	2015/16	-1027	-426	-226	-226	-231	-232	-241	-151
2. Почвогрунт мочажины Равнинного участка	2013/14	-11	-2	0	0	0	0	0	-23
	2014/15	-1	0	0	0	0	0	0	-35
	2015/16	0	0	0	0	0	0	0	-32
3. Почвогрунт бугра Предгорного участка	2013/14	-655	-317	-163	-173	-269	-198	-94	-28
	2014/15	-697	-303	-148	-158	-77	-64	-53	-22
	2015/16	-912	-382	-159	-138	-221	-203	-135	-42
4. Почвогрунт мочажины Предгорного участка	2013/14	-14	0	0	0	0	0	0	0
	2014/15	-9	0	0	0	0	0	0	0
	2015/16	-27	-9	0	0	0	0	0	0
5. Почвогрунт бугра Низкогорного участка	2013/14	-1346	-1073	-836	-616	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.
	2014/15	-1379	-1058	-815	-624	-714	-620	-542	-401
	2015/16	-1567	-1092	-838	-612	-717	-634	-573	-425
6. Почвогрунт мочажины Низкогорного участка	2013/14	-230	-85	0	0	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.

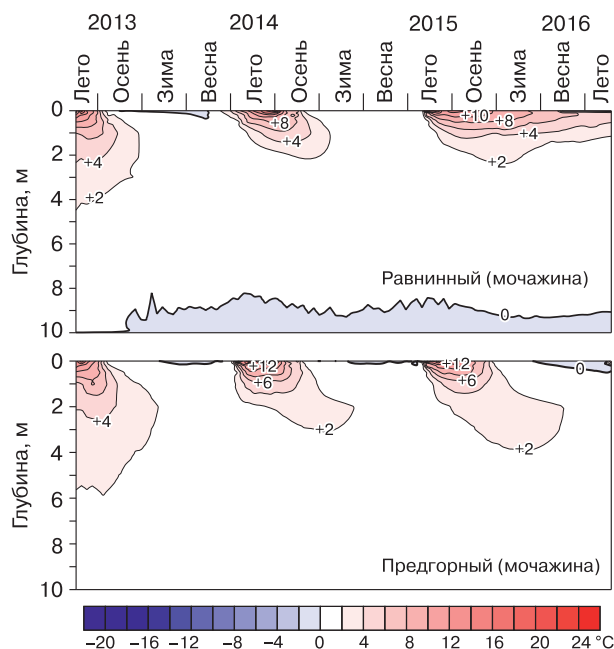


Рис. 3. Динамика температуры за 2013–2016 гг. в почвогрунтах мочажин.

тах мочажин Равнинного и Предгорного участков в зимний период отмечаются только положительные среднемесячные температуры +0.1 °С. В почве мочажины наиболее холодного Низкогорного участка среднемесячные зимние температуры на поверхности колеблются в диапазоне –0.1...–1.2 °С. Минимальные среднемесячные температуры на глубине 2–3 м смещаются к маю–июню, составляя +0.3...+1.4 °С.

Летний температурный режим почвогрунтов.

Сезонное протаивание верхних горизонтов исследуемых почв начинается в мае. Температуры почв бугров летом ниже, чем мочажин. Это связано с охлаждающим влиянием близко залегающего к поверхности экрана ММП в дренированных торфяных буграх. Суммы положительных температур в СТС торфяных бугров в целом сопоставимы с таковыми торфяных мерзлотных почв тундры и лесотундры [Каверин и др., 2014]. Среднемесячные температуры самого теплого месяца (июль или август) на поверхности торфяных бугров варьируют в узком диапазоне +10...+11 °С (см. рис. 2). В верхних горизонтах ММП торфяных бугров (глубина 1 м) максимальные среднемесячные температуры (–0.1...–1.2 °С) фиксируются в период с сентября по декабрь.

Почвогрунты мочажин прогреваются гораздо лучше по сравнению с торфяными буграми ввиду отсутствия или очень глубокого залегания ММП и очень слабой “аккумуляции” зимнего холода (см. рис. 3). В июне происходит существенное повышение температуры всего профиля почвогрунтов. Мочажины характеризуются очень высокими суммами положительных температур как в пределах почвы, так и в подстилающих породах (табл. 4). Максимальные среднемесячные температуры изменяются от +12 °С на поверхности почвы до +6...+7 °С на глубине 1 м (август). Период максимальных среднемесячных температур (+1...+2 °С) на глубине 2–5 м смещается к декабрю. В мочажинах сезонные флуктуации температур охватывают толщу до 5 м, что связано с высокой теплопроводностью сильнообводненных почвогрунтов. В условиях полного отсутствия ММП

Таблица 4. Суммы положительных температур почвогрунтов (°С-сут)

Почвогрунт	Гидрологический год	Глубина, м							
		0.0	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0	10.0
1. Почвогрунт бугра Равнинного участка	2013/14	950	389	1	0	0	0	0	0
	2014/15	1355	558	0	0	0	0	0	0
	2015/16	1602	760	0	0	0	0	0	0
2. Почвогрунт мочажины Равнинного участка	2013/14	535	618	1020	846	186	146	82	0
	2014/15	1406	1233	1075	820	457	301	140	0
	2015/16	1689	1498	1317	999	531	356	168	0
3. Почвогрунт бугра Предгорного участка	2013/14	977	340	11	0	0	0	0	0
	2014/15	1287	499	1	0	0	0	0	0
	2015/16	1646	720	48	0	0	0	0	0
4. Почвогрунт мочажины Предгорного участка	2013/14	1282	1246	1202	1099	377	359	314	262
	2014/15	1390	1286	1066	750	703	606	483	405
	2015/16	1646	1460	1171	775	802	696	548	433
5. Почвогрунт бугра Низкогорного участка	2013/14	1125	572	125	0	0	0	0	0
	2014/15	1379	700	106	0	0	0	0	0
	2015/16	1597	812	179	0	0	0	0	0
6. Почвогрунт мочажины Низкогорного участка	2013/14	1147	1035	937	783	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.

в мочажине относительно высокие суммы положительных температур сохраняются и в слое затухания годовых колебаний (почвогрунты мочажины Предгорного участка).

Годовые показатели температурного режима почвогрунтов. Общий диапазон среднегодовых температур СТС в почвах бугров на глубинах 0, 0,2, 0,5 м составил +2,0...–2,0 °С, в верхних горизонтах ММП (глубина 1,0–5,0 м) –0,3...–2,2 °С (рис. 4). Наиболее низкие среднегодовые температуры ММП торфяных бугров зафиксированы на глубине 1–3 м, что связано с сезонными охлаждениями верхнего горизонта многолетнемерзлых пород. На глубине нулевых амплитуд годовых колебаний температуры (10 м) среднегодовые параметры варьируют от –0,1 до –1,2 °С. По годовым параметрам наиболее теплыми являются почвогрунты торфяного бугра Предгорного участка. Сезонноталые горизонты здесь характеризуются постоянными положительными, а подстилающие ММП на глубине 10 м – суботрицательными среднегодовыми температурами. В почвогрунтах торфяных бугров других ключевых участков положительные среднегодовые температуры в верхней части почв фиксируются в двух из трех лет мониторинговых наблюдений. Температурный оффсет* в торфяных мерзлотных почвах обычно характерен для торфяных оголенных пятен лесотундры [Каверин и др., 2016]. Очевидно, что на крайнем южном пределе восточно-европейской криолитозоны положительные среднегодовые температуры становятся в целом типичными для СТС торфяных почвогрунтов, так как климатические условия здесь неблагоприятны для сохранения ММП, а процессы водной эрозии достаточно активны [Пастухов и др., 2017].

Почвогрунты мочажин характеризуются относительно высокими положительными среднегодовыми температурами (см. рис. 4). В подстилающих талых породах мочажин среднегодовая температура постепенно снижается в пределах положительных значений. Глубокое залегание ММП (9 м) в мочажине Равнинного участка оказывает влияние на температурный режим всего профиля. Среднегодовые температуры в этом профиле уменьшаются до суботрицательных значений на глубине 10 м.

Анализ коэффициентов охлаждения и нагрева позволяет сравнивать скорость затухания температурной волны в исследуемых мерзлотных и немерзлотных почвогрунтах. На основе анализа осредненных коэффициентов охлаждения мерзлотных почвогрунтов выявлены различия, обусловленные прежде всего глубиной снежного покрова. Относительно слабое затухание отрицательных температур характерно для торфяных бугров Низкогорного участка, на глубине 10 м

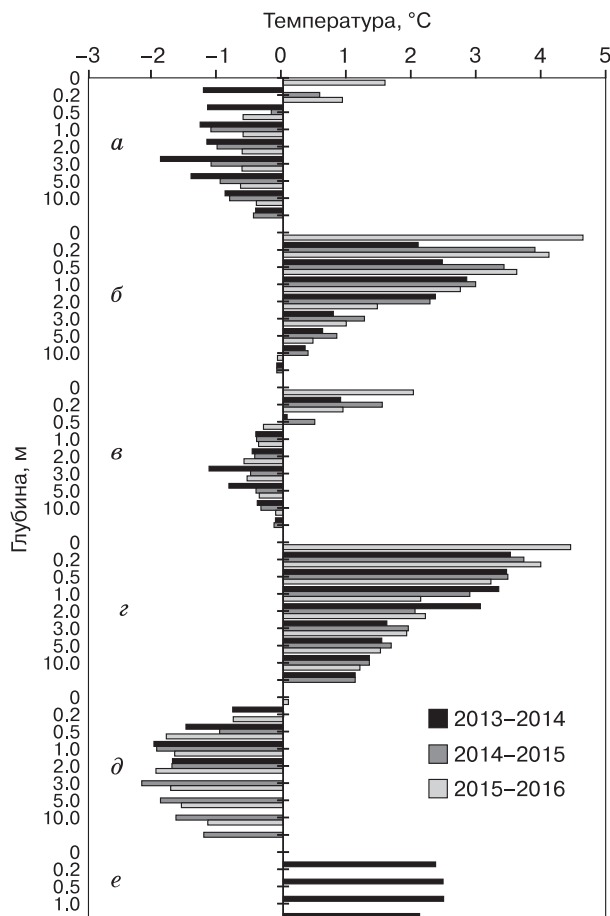


Рис. 4. Среднегодовая температура почвогрунтов бугров и мочажин.

а – бугор Равнинного участка; *б* – мочажина Равнинного участка; *в* – бугор Предгорного участка; *г* – мочажина Предгорного участка; *д* – бугор Низкогорного участка; *е* – мочажина Низкогорного участка.

коэффициент охлаждения составляет 0,2 (рис. 5). На Предгорном участке, напротив, значение коэффициента охлаждения на данной глубине близко к нулю, что может быть связано с незначительной мощностью (10–15 м) ММП под торфяным бугром. Мощность ММП на участках исследований варьирует от 0 до 30 м [Геокриологическая карта..., 1998]. Коэффициент нагрева более применим для сравнительной оценки проникновения положительных температур в почвогрунты талых мочажин. Мочажина Предгорного участка ввиду отсутствия глубокозалегающих ММП характеризуется высокими значениями данного коэффициента. При этом охлаждающее влияние глубокозалегающей подошвы ММП в мочажине Равнинного участка начинает сказываться на глубине 2 м и более (см. рис. 5).

* Положительные среднегодовые температуры в верхней, отрицательные – в нижней части почв [Burn, 2004].

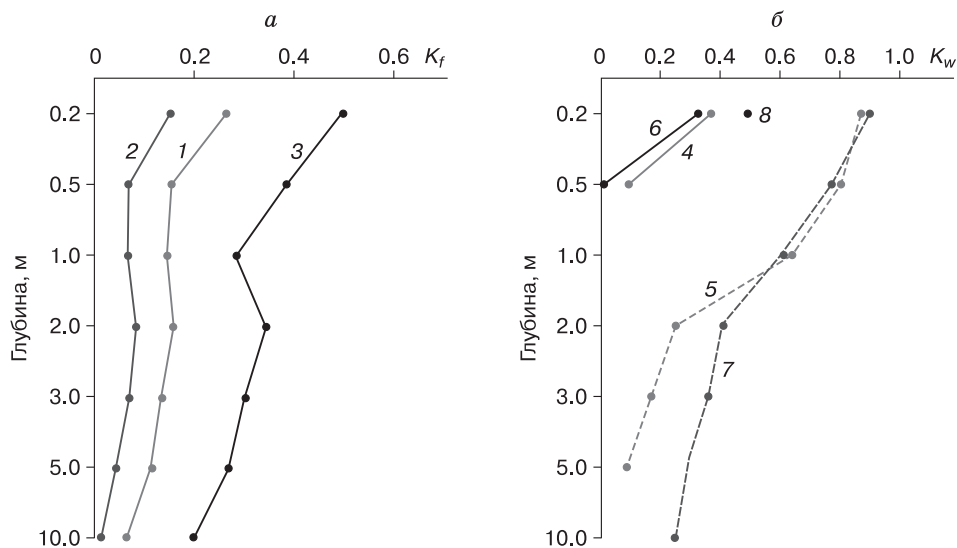


Рис. 5. Коэффициенты охлаждения K_f (а) и нагрева K_w (б) в почвогрунтах.

1 – бугор Равнинного участка; 2 – бугор Предгорного участка; 3 – бугор Низкогорного участка; 4 – бугор Равнинного участка; 5 – мочажина Равнинного участка; 6 – бугор Предгорного участка; 7 – мочажина Предгорного участка; 8 – бугор Низкогорного участка.

Оценка современного температурного состояния почвогрунтов. Для оценки современного температурного состояния исследуемых почвогрунтов проведен сравнительный анализ индексов морозности воздуха (F) и почвы (F_s) на глубине 0.2 м. По мнению авторов, совместное использование данных индексов облегчает поиск универсальных “точек соприкосновения” между областями климатического моделирования и криопедологии.

Расчеты индекса морозности воздуха применяются в области климатического моделирования для картирования “климатических” областей распространения ММП [Sazonova, Romanovsky, 2003]. В течение так называемого фонового периода с относительно стабильным существованием ММП (1960–1990 гг.) средний индекс морозности воздуха в регионе составил 0.60. Очевидно, что в данных климатических условиях редкоостровные

ММП сохранялись в бугристых торфяниках в качестве экосистемно-защищенных [Shur, Jorgenson, 2007]. За последние 50 лет наблюдается линейный тренд снижения F ($y = -0.0012x + 0.6209$; $R^2 = 0.2688$). Осредненный за период исследований (2013–2016 гг.) индекс морозности воздуха равен 0.55. В фоновый период такие значения индекса были характерны только для южной половины подзоны крайнесеверной тайги, где ММП отсутствуют. Динамика индекса морозности воздуха свидетельствует о постепенном “ухудшении” климатических условий, обеспечивающих сохранение ММП на крайнем южном пределе их распространения.

Индекс морозности почвы аналогичен почвенно-мерзлотному индексу (F_n) для поверхности почв, используемому при модельных расчетах температурных условий почвогрунтов [Анисимов и др., 2012]. Расчет индекса морозности почвы для глубины 0.2 м вместо поверхности почвы обусловлен большей стабильностью температурных условий и влиянием подстилающей толщи ММП. Кроме того, данный индекс может применяться для оценки континентальности почвенного климата мерзлотных почв [Димо, 1972]. Использование почвенного индекса морозности связано с поиском индикаторов температурной устойчивости, в том числе адаптированных для региона с распространением высокотемпературных ММП, мерзлотных почвогрунтов. Сравнительный анализ индексов морозности воздуха и почвы предлагается в дополнение к оценке современного температурного состояния почвогрунтов криолитозоны.

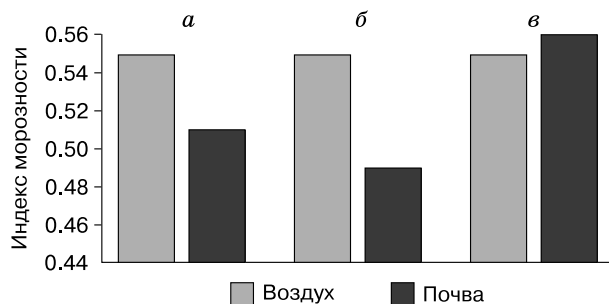


Рис. 6. Средние за период исследований коэффициенты морозности воздуха и почвы (глубина 0.2 м) на Равнинном (а), Предгорном (б) и Низкогорном (в) участках.

Сопоставление значений индексов морозности почвы и воздуха выявило относительную мягкость почвенного климата СТС торфяных бугров на Равнинном и Предгорном участках (рис. 6). Значительно более низкие показатели почвенного индекса морозности уже фиксируют “потепление” в верхних горизонтах торфяных мерзлотных почвогрунтов, где при прогнозируемом климатическом потеплении будет происходить дальнейшее увеличение глубины СТС [Rivkin et al., 2016]. Таким образом, в условиях изолированных болотных многолетнемерзлых экосистем дальнейший рост температуры почвогрунтов будет только способствовать активизации эрозионных процессов и дальнейшему протаиванию ММП [Пастухов и др., 2017].

ВЫВОДЫ

В зоне редкоостровного распространения ММП европейского Северо-Востока России почвогрунты бугров и мочажин кардинально различаются по летнему и особенно зимнему температурному режиму. Незначительная мощность снежного покрова (0.2–0.4 м) на торфяных буграх способствует сильному охлаждению почвогрунтов зимой (–22...–1567 °С·сут). В мочажинах с относительно мощным снежным покровом (1.0–1.5 м) зимнее промерзание охватывает только поверхность почвы, где фиксируются отрицательные околонулевые температуры (0...–0.2 °С). Резкое снижение летних температур (1600–0 °С·сут) в пределах маломощного СТС (0.4–0.6 м) торфяных бугров обусловлено высокой теплоизолирующей способностью торфа дренированных бугров и близким залеганием охлаждающей кровли ММП. Глубокое летнее прогревание (до 5–6 м) почвогрунтов талых мочажин объясняется высокой теплопроводностью их сильнообводненных горизонтов.

Почвы торфяных бугров в пределах СТС характеризуются преимущественно положительными либо высокими отрицательными среднегодовыми температурами (–1...+2 °С), образуя самое теплое “звено” среди мерзлотных почв Восточно-Европейской равнины. В почвах талых мочажин фиксируются только положительные среднегодовые температуры (+2...+3 °С), постепенно снижающиеся вниз по профилю в талых подстилающих отложениях в пределах положительных значений (0...+2 °С).

Анализ коэффициентов охлаждения и нагрева в толще годовых теплооборотов показал, что на исследуемых участках с редкоостровным распространением ММП степень летнего прогревания почвогрунтов мочажин ($K_w = 0.1–0.9$) превышает таковую зимнего охлаждения торфяных бугров ($K_f = 0–0.5$). Сравнительный анализ индек-

сов морозности воздуха и почвы предлагается использовать для оценки современного температурного состояния мерзлотных почвогрунтов на территории европейского Северо-Востока России. Относительно низкие значения индекса морозности воздуха ($F = 0.55$) и почв ($F_s = 0.49–0.56$) фиксируют влияние современного климатического потепления на торфяные мерзлотные почвогрунты региона.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ПРООН/ГЭФ 00059042, в рамках темы Государственного задания Института биологии Коми НЦ УрО РАН № АААА-А17-117122290011-5 и проекта РФФИ № 18-55-11003.

Литература

- Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А. и др.** Континентальная многолетняя мерзлота // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М., Ин-т глобального климата и экологии, 2012, с. 301–359.
- Anisimov, O.A., Anokhin, Yu.A., Lavrov, S.A., Malkova, G.V., Myach, L.T., Pavlov, A.V., Romanovsky, V.E., Streletsky, D.A., Kholodov, A.L., Shiklomanov, N.I., 2012. Continental permafrost, in: Methods for Estimating the Climate Change Effects on Biological and Physical Systems, Institut globalnogo klimata i ekologii, Moscow, pp. 301–359. (in Russian)
- Атлас Коми АССР** / Под ред. С.В. Калесника. М., ГУГК, 1964, 112 с.
- Kalesnik, S.V. (Ed.), 1964. Atlas of Komi ASSR. GUGK, Moscow, 112 pp. (in Russian)
- Геокриологическая карта СССР**, масштаб 1:2,5 млн / Отв. ред. Э.Д. Ершов, К.А. Кондратьева. М., Мин-во геологии СССР, МГУ, 1998, 16 л.
- Ershov, E.D., Kondratieva, K.A. (Eds.), 1998. Geocryological Map of the USSR (Scale: 1: 2 500 000). Ministerstvo geologii SSSR i MGU, Moscow, sheet 16.
- Гончарова О.Ю., Матьшак Г.В., Бобрик А.А. и др.** Температурные режимы северотаяжных почв Западной Сибири в условиях островного распространения многолетнемерзлых пород // Почвоведение, 2015, № 12, с. 1462–1473.
- Goncharova, O.Yu., Matyshak, G.V., Bobrik, A.A., et al., 2015. Temperature regimes of northern taiga soils in the isolated permafrost zone of Western Siberia. Pochvovedenie, No. 12, 1462–1473.
- Димо В.Н.** Тепловой режим почв СССР. М., Колос, 1972, 360 с.
- Dimo, V.N., 1972. Thermal Regime of Soils of the USSR. Kolos, Moscow, 360 pp. (in Russian)
- Каверин Д.А., Пастухов А.В., Лаптева Е.М. и др.** Строение и свойства почв многолетнемерзлых торфяников юго-востока Большеземельской тундры // Почвоведение, 2016, № 5, с. 542–556, DOI: 10.7868/S0032180X16050075.
- Kaverin, D.A., Pastukhov, A.V., Lapteva, E.M., et al., 2016. Structure and properties of permafrost peatlands in the south-east of the Bolshezemelskaya tundra. Pochvovedenie, No. 5, 542–556.
- Каверин Д.А., Пастухов А.В., Мажитова Г.Г.** Температурный режим тундровых почв и подстилающих многолетнемерзлых пород (европейский Северо-Восток России) // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 3, с. 23–32.

- Kaverin, D.A., Pastukhov, A.V., Mazhitova, G.G., 2014. Temperature regime of the tundra soils and underlying permafrost (Northeast European Russia). *Earth's Cryosphere XVIII* (3), 23–31.
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и сост.** Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск, Ойкумена, 2004, 342 с.
- Shishov, L.L., Tonkonogov, V.D., Lebedeva, I.I., 2004. *Russian Soils Classification and Diagnostics*. Oikumena, Smolensk, 342 pp. (in Russian)
- Кочеткова В.Л.** Торфяные почвы болот долины р. Большая Инта: Автореф. дис. ... канд. сел.-хоз. наук. Сыктывкар, 1966, 26 с.
- Kochetkova, V.L., 1966. Soils of peatbogs of the Bolshaya Inta river valley. Extended abstract of Cand. Sci. (Agr.) dissertation. Syktvykar, 26 pp. (in Russian)
- Куликов А.И.** Мерзлотные почвы: экология, теплоэнергетика и прогноз продуктивности / А.И. Куликов, В.И. Дугаров, В.М. Корсунов. Улан-Удэ, БНЦ СО РАН, 1997, 310 с.
- Kulikov, A.I., Dugarov, V.I., Korsunov, V.M., 1997. *Permafrost Soils: Thermal Properties and Prediction of Productivity*. BNТs SO RAN, Ulan-Ude, 310 pp. (in Russian)
- Мажитова Г.Г.** Температурные режимы почв в зоне несплошной многолетней мерзлоты европейского Северо-Востока России // Почвоведение, 2008, № 1, с. 54–67.
- Mazhitova, G.G., 2008. Soil temperature regimes in the discontinuous permafrost zone in the European North-East Russia. *Pochvovedenie*, No. 1, 54–67.
- Малкова Г.В.** Мониторинг среднегодовой температуры пород на стационаре Болванский // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 3, с. 22–35.
- Malkova, G.V., 2010. Mean annual ground temperature monitoring on the steady-state Bolvansky permafrost station. *Earth's Cryosphere XIV* (3), 22–35.
- 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.
- Oberman, N.G., Shesler, I.G., 2009. Modern and forecasted changes in cryological conditions in the northeast European Russian Federation. *Problemy Severa i Arktiki Rossiyskoy Federatsii*. Sci.-Information Bulletin, Iss. 9, 96–106.
- Осадчая Г.Г., Тумель Н.В.** Локальные ландшафты как индикаторы геокриологической зональности (на примере европейского Северо-Востока) // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 3, с. 62–71.
- Osadchaya, G.G., Tumel, N.V., 2012. Local landscapes as indicators of geocryologic zonation (by the example European North-East). *Earth's Cryosphere XVI* (3), 62–71.
- Павлов А.В.** Тренды современных изменений температуры почвы на севере России // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 3, с. 22–27.
- Pavlov, A.V., 2008. Trends of contemporary changes of soil temperature in northern Russia. *Earth's Cryosphere XII* (3), 22–27.
- Пармузин Ю.П.** Словарь по физической географии / Ю.П. Пармузин, Г.В. Карпов. М., Просвещение, 1994, 367 с.
- Parmuzin, Yu.P., Karpov, G.V., 1994. *Dictionary of Physical Geography*. Prosveshchenie, Moscow, 367 pp. (in Russian)
- Пастухов А.В., Марченко-Вагапова Т.И., Каверин Д.А. и др.** Динамика развития бугристых торфяников на южной границе Восточно-Европейской криолитозоны // Почвоведение, 2017, № 5, с. 1–14, DOI: 10.7868/S0032180X17030091.
- Pastukhov, A.V., Marchenko-Vagapova, T.I., Kaverin, D.A., et al., 2017. Dynamics of peat plateau near the southern boundary of the East European permafrost zone. *Pochvovedenie*, No. 5, 1–14.
- Полевой** определитель почв России. М., Почвенный ин-т РАН, 2008, 282 с.
- Field Indexing of Soils in Russia, 2008. *Pochvenniy In-t RAN*, Moscow, 282 pp. (in Russian)
- Burn, C.R.** The Thermal Regime of Cryosols // *Cryosols (Permafrost-Affected Soils)* / J. Kimble (Ed.). Berlin; Heidelberg; New York, Springer-Verlag, 2004, p. 391–414.
- Hugelius, G., Virtanen, T., Kaverin, D., et al.** High-resolution 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.
- Klene, A., Nelson, F., Shiklomanov, N., Hinkel, K.** The N-Factor in natural landscapes: variability of air and soil-surface temperatures, Kuparuk River Basin, Alaska, U.S.A. // *Arctic, Antarctic, and Alpine Res.*, 2001, No. 33 (2), p. 140–148, DOI: 10.2307/1552214.
- Mazhitova, G., Malkova, G., Chestnyk, 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, No. 2, p. 123–139.
- Rivkin, F., Vlasova, Y., Marchenko, S., Parmuzin, I.** Ground thaw subsidence and spatial analysis of landscape transformation // XI Intern. Conf. on Permafrost. Potsdam, Germany, 2016, p. 393–395, DOI: 10.13140/RG.2.1.4709.5282.
- Romanovsky, V., Burgess, M., Smith, S., et al.** Permafrost temperature records: Indicators of climate change // *EOS Trans. AGU*, 2002, No. 83 (50), p. 589–594, DOI: 10.1029/2002EO000402.
- Sazonova, T.S., Romanovsky, V.E.** A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active-layer thickness and mean annual ground temperatures // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, No. 2, p. 125–140.
- 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.
- Throop, J., Lewkowicz, A.G., Smith, S.L.** Climate and ground temperature relations at sites across the continuous and discontinuous permafrost zones, northern Canada // *Fundamental and applied research on permafrost in Canada*, Can. J. Earth Sci., 2012, vol. 49, p. 1–12, DOI: 10.1139/e11-075.

Поступила в редакцию
11 апреля 2017 г.