

КРИОПЕДОЛОГИЯ

УДК 551.34 (470.13)

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-2(62-71)

**ВЛИЯНИЕ ЛАНДШАФТНЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ГЛУБИНУ
СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ В ПОЧВАХ БУГРИСТЫХ ТОРФЯНИКОВ
(НА ПРИМЕРЕ ПЛОЩАДКИ CALM R52)****Д.А. Каверин¹, А.В. Пастухов¹, А.Б. Новаковский¹, К. Биаси², М. Марущак², В.В. Елсаков¹**¹*Институт биологии Коми научного центра УрО РАН,**167982, Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28, Россия; dkav@mail.ru*²*Университет Восточной Финляндии, 70211, Куопио, а/я 1627, Финляндия*

Рассмотрены данные пятилетних (2013–2017) наблюдений за глубиной сезонного протаивания почв бугристых торфяников на площадке Циркумпольного мониторинга деятельного слоя CALM R52 (Сейда) на европейском Северо-Востоке России (бассейн р. Уса). Для оценки пространственно-временной дифференциации мощности сезонного слоя бугристых торфяников проведен анализ влияния ландшафтных и климатических факторов. Значительная пространственная неоднородность глубины сезонного протаивания обусловлена особенностями рельефа исследуемой площадки, где преобладают дренированные торфяные бугры, покрытые кустарничково-моховой растительностью и (или) оголенными торфяными пятнами, а обводненные мочажины занимают незначительную площадь. На торфяных буграх с кустарничково-моховой растительностью основное влияние на мощность сезонного слоя оказывают относительная высота поверхности и влажность почв. В условиях оголенных торфяных пятен ландшафтными факторами, определяющими глубину сезонного протаивания, становятся мощность снежного покрова и микрорельеф. Изменение средней по площадке глубины сезонного протаивания за период исследований характеризовалось положительным трендом. Коэффициент морозности воздуха является наиболее эффективным климатическим параметром при оценке межгодовой динамики глубины сезонного протаивания в торфяных почвах.

Бугристые торфяники, торфяные почвы, сезонноталый слой, многолетнемерзлые породы, ландшафтные и климатические факторы

**LANDSCAPE AND CLIMATIC FACTORS IMPACTING THE THAW DEPTH
IN SOILS OF PERMAFROST PEAT PLATEAUS (ON THE EXAMPLE OF CALM R52 SITE)****D.A. Kaverin¹, A.V. Pastukhov¹, A.B. Novakovsky¹, K. Biasi², M. Maruschak², V.V. Elsakov¹**¹*Institute of Biology, Komi Science Center UB RAS, 28, Kommunisticheskaya str., Syktyvkar, 167982, Russia; dkav@mail.ru*²*University of Eastern Finland, P/O box 1627, FI-70211, Kuopio, Finland*

The data obtained during the five-year (2013–2017) active layer monitoring in soils of permafrost peat plateau at the Circumpolar Active Layer Monitoring site R52 (Seida) in the European Northeast of Russia (the Usa River basin) are presented. Analysis of the impact of landscape and climatic factors allowed to estimate the spatial-temporal differentiation of the active layer thickness. The spatial heterogeneity of seasonal thaw depth is governed by the topography of the peatland site dominated by drained peat mounds covered with shrubby moss vegetation and bare peat circles, with fens occupying a small area only. Relative elevation and surface soil moisture are found to be major factors affecting the active layer thickness within peat mounds covered with shrubby moss vegetation. In the bare peat circles, snow depth and microtopography exert a primary control on thaw depth. The active layer thickness dynamics during the research period was characterized by a positive trend. The airfrost number is interpreted as the most effective climatic parameter for estimation of inter-annual dynamics of the active layer depth in peat soils.

Peat plateaus, peat soils, active layer, permafrost, landscape and climatic factors

ВВЕДЕНИЕ

Бугристые торфяники широко распространены в тундровой зоне России [Максимова, Оспенников, 2012; Фотиев, 2017]. Несмотря на происходящее потепление климата и возрастающее антропогенное воздействие, бугристые торфяники

остаются относительно устойчивыми экологическими системами [Пастухов, Каверин, 2016; Wisser et al., 2011]. Европейский Север России является регионом, где зафиксировано значительное увеличение мощности сезонноталого слоя (СТС) и

широко распространены бугристые торфяники [Оберман, Шеслер, 2009; Каверин и др., 2014]. Анализ климатических моделей показал, что в конце XXI в. отрицательные среднегодовые температуры бугристых торфяников региональной лесотундры сохранятся. При этом редкоостровные многолетнемерзлые породы (ММП) останутся здесь только в условиях бугристых торфяников [Rivkin et al., 2016]. Тем не менее в мониторинговых исследованиях последних лет зафиксированы положительные среднегодовые температуры в верхних горизонтах СТС, что свидетельствует о развивающихся процессах протаивания ММП в бугристых торфяниках.

Мониторинг глубины сезонного протаивания торфяных почв активно проводится в криолитозоне в рамках национальных и международных исследовательских программ. Результаты многолетнего мониторинга мощности СТС на севере Швеции в условиях редкоостровного распространения ММП показали, что основными климатическими параметрами, влияющими на глубину сезонного протаивания, являются суммы положительных температур воздуха и количество зимних осадков [Sannel et al., 2016]. Пространственная вариабельность мощности снежного покрова (СП) является главным климатическим фактором, обуславливающим присутствие/отсутствие ММП в торфяниках севера Фенноскандии [Johansson et al., 2006].

Программа Циркумпольного мониторинга деятельного слоя (Circumpolar Active Layer Monitoring, CALM) проводится с целью выявления трендов изменения глубины сезонного протаивания мерзлотных почв и анализа связи этих трендов с климатическими показателями и ландшафтными параметрами [Brown et al., 2000; Klene et al., 2001]. Мониторинговые исследования на площадке CALM R5d, расположенной на полигональном торфянике в зоне сплошного распространения ММП, выявили низкую пространственную вариацию (9 %) относительно маломощного (0.4–0.5 м) СТС [Бабкина и др., 2017]. Исследования на площадке CALM R1, локализованной на бугристом торфянике в зоне островного распространения ММП, показали, что относительные высоты и зимний температурный режим поверхности почвы обуславливают значительную пространственную дифференциацию (27 %) относительно мощного (1.5–1.6 м) СТС [Бобрик и др., 2015]. На территории европейского Севера России действуют шесть площадок CALM, результаты исследований на которых опубликованы ранее [Малкова, 2010; Каверин и др., 2017]. Мониторинговая площадка CALM R52 (Сейда) на территории Европейской России является самой южной и единственной, залеженной на мощной (4–5 м) торфяной залежи, при этом она характеризуется неглубоким сезонным протаиванием.

Основной целью настоящей работы является оценка влияния ландшафтных факторов на пространственную дифференциацию мощности СТС в почвах бугристых торфяников южного предела криолитозоны на примере мониторинговой площадки CALM R52 (Сейда), расположенной на европейском Северо-Востоке России. Ландшафтными факторами здесь условно обозначены параметры рельефа, растительного покрова и свойства почв, изменения количественных критериев которых определяют пространственную неоднородность мощности СТС. Получены основные климатические характеристики, выделенные в качестве климатических факторов, определяющие межгодовую динамику мощности СТС.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Площадка CALM R52 расположена в 7 км к западу от железнодорожной станции Сейда (67°03' с.ш., 62°55' в.д., абсолютная высота 100 м над ур. моря) (рис. 1). Площадка находится в юго-восточной части Большеземельской тундры (Воркутинский административный район, Республика Коми), в подзоне северной лесотундры, зоне массивно-островного распространения ММП. В региональной лесотундре бугристые торфяники широко распространены на безлесных водораздельных пространствах, занимая до 10 % площади. Территория представляет собой низкую холмистую равнину, перекрытую мощным слоем четвертичных отложений [Mazhitova, Oberman, 2003]. Климат – холодный субарктический, умеренно континентальный. Среднегодовая температура приземного

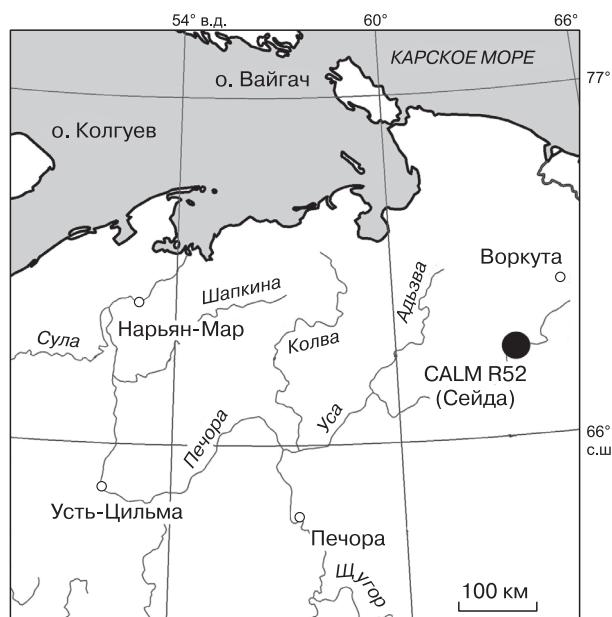


Рис. 1. Географическое положение мониторинговой площадки.

слоя воздуха на площадке, по данным установленных температурных логгеров, составила $-(3.1 \pm 2.2) ^\circ\text{C}$ за 2012–2017 гг., сумма положительных температур воздуха (*DDT*) $(1642 \pm 450) ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$, сумма отрицательных температур воздуха (*FDD*) равна $-(2654 \pm 334) ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$. Среднегодовое количество осадков (*Ri*), по данным метеостанции г. Воркута, (493 ± 82) мм за 2012–2017 гг. Зимой преобладают ветра юго-западного и южного направлений, летом – преимущественно северного [Атлас..., 1997].

Мониторинговая площадка находится в пределах бугристого торфяника общей площадью 0.6 км^2 . Бугристый торфяник локализован в древней озерной котловине площадью 6.7 км^2 , осложненной термокарстовыми образованиями и озерными террасами. Торфяные отложения мощностью до 4–5 м подстилаются плейстоценовыми озерными суглинками [Ривкин и др., 2017].

Мониторинговая площадка размером 100×100 м включает сетку постоянных пикетов наблюдений с размером ячеек 10×10 м. Площадка находится на участке абсолютного преобладания торфяных бугров (93 %) высотой от 1 до 3 м (рис. 2). Растительный покров бугристого торфяника представлен комплексом кустарничково-мохово-лишайниковых сообществ, занимающих преимущественно краевые части торфяных бугров и осоково-сфагновых сообществ мочажин. Оголенные торфяные пятна диаметром от 4 до 25 м развиты преимущественно на вершинах торфяных бугров, имеют круглую или овальную, реже неправильную форму. Для поверхности пятен характерно полигональное растрескивание, полигоны четырех- и пятиугольные, диаметром около 1 м. Растительность на пятнах практически отсутствует.

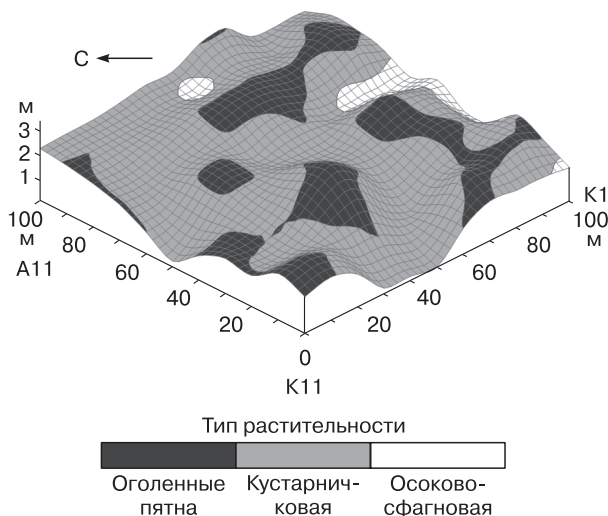


Рис. 2. Преобладающие типы растительности на площадке CALM R52 (Сейда).

A11, K1, K11 – номера угловых пикетов площадки.

В краевой (пониженной) зоне пятен, а также в контурах крупных морозобойных трещин присутствуют фрагментарные колонии *Cladonia* sp. и криптогамные корочки. Мочажины и оголенные торфяные пятна, как правило, оконтурены плотным поясом кустарничково-моховой растительности. Мочажины на площадке занимают наиболее низкие участки между буграми. На торфяных буграх под растительным покровом развиты торфяные олиготрофные мерзлотные почвы, на оголенных торфяных пятнах – торфяные олиготрофные деструктивные мерзлотные почвы, в мочажинах – торфяные олиготрофные сезоннопромерзающие почвы [Классификация..., 2004]. Для мерзлотных почв характерна сливающаяся мерзлота, когда зимнее промерзание СТС достигает кровли ММП [Геокриология СССР, 1988]. Почвы торфяных бугров характеризуются относительно суровым для региона температурным режимом [Каверин и др., 2014]. В пределах маломощного СТС (30–60 см) суммы отрицательных почвенных температур достигают $-2500 ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$, положительных температур $1000 ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$. Среднегодовая температура почв на глубине 0–1 м варьирует от 0 до $-5 ^\circ\text{C}$ [Каверин и др., 2016].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ежегодно с 2013 г. на каждом из 121 пикетов площадки измеряли мощности СТС (3-я декада сентября) и СП (3-я декада марта), замеры выполняли градуированным металлическим зондом. В сентябре 2015 и 2016 гг. на всех пикетах определяли влажность и температуру почв. Точечные измерения температуры почв проводили с помощью переносного термометра HANNA HI 935005 с проникающим термодатчиком HANNA HI 766TR2 (точность до $0.1 ^\circ\text{C}$) на глубинах 20 и 50 см. Для измерения влажности верхнего горизонта почв (0–10 см) использовали портативный влагомер HH2 Delta-T с сенсором ML3 Theta Probe (точность до 0.1 %). В 2013 г. для определения относительных высот пикетов площадки выполнена теодолитная съемка электронным теодолитом RGK T-05 с оптическим отвесом. В 2015–2017 гг. дополнительно измерены количественные параметры основных ландшафтных факторов, влияющих на мощность СТС: максимальная высота растительных ярусов с учетом типа растительного сообщества, экспозиция и угол наклона поверхности, средняя высота элементов микрорельефа. Температуру приземного слоя воздуха определяли с помощью цифрового логгера Hobo Water Pro, установленного на высоте 2 м над поверхностью почвы. Значения климатических параметров фонового периода (1960–1990 гг.) для исследуемого участка рассчитаны на основе атрибутивной базы данных климатической матрицы WorldClim 1.0 [Hijmans et al., 2005].

Анализ данных проводился при помощи ранговой корреляции Спирмена, линейного и мультирегрессионного анализа. В последнем в качестве зависимой переменной использовалась мощность СТС. Предикторами (независимыми переменными) многомерной регрессионной модели выступали ландшафтные факторы: 1) ОП – относительная высота поверхности над самой низкой точкой площадки (диапазон 0–3.64 м); 2) ОВО – отклонения высотных отметок поверхности площадки от аппроксимирующей плоскости (диапазон от –68 до 35 см); 3) наклон поверхности (диапазон от 0 до 27°); 4) микрорельеф – средняя высота элементов микрорельефа в радиусе 0.5 м от пикета (диапазон от 2 до 40 см); 5) максимальная высота ярусов растительности (диапазон от 0 до 65 см); 6) мощность снежного покрова (диапазон от 0 до 150 см); 7) объемная влажность верхнего горизонта почв (диапазон от 9 до 100 %). Для определения пространственного положения оголенных торфяных пятен использованы данные по экспозиции поверхности (диапазон от 0 до 360°).

Для оценки влияния климатических факторов на межгодовую вариабельность глубины сезонного протаивания использованы суммы положительных и отрицательных температур воздуха, коэффициент морозности воздуха (frost number), годовое количество осадков и количество осадков холодного периода (октябрь–апрель). Расчеты коэффициента морозности воздуха выполнены с целью оценки влияния климатических условий на температурное состояние СТС по формуле [Nelson, Outcalt, 1987]

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

где F – коэффициент морозности воздуха; DDT – сумма положительных среднесуточных температур воздуха; FDD – сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха; индекс “+” подразумевает использование сумм отрицательных температур воздуха в виде положительных значений.

Расчеты климатических параметров производили для гидрологического года (1 октября–30 сентября). Для оценки связи глубины сезонного протаивания с климатическими характеристиками (факторами) была использована линейная регрессия, где в качестве зависимой переменной (y) взято среднее значение глубины сезонного протаивания по всей площадке, в качестве независимой переменной (x) – год наблюдения либо климатические показатели.

Для определения неоднородности поверхности площадки, представляющей собой участок бугристого торфяника, рассчитаны значения отклонений поверхности от условной плоскости. Количественные значения данного параметра – это

отклонения высотных отметок пикетов от расчетной плоскости, наилучшим образом аппроксимирующей поверхность исследуемого участка бугристого торфяника. Подробная характеристика и обоснованность данных расчетов при исследовании мерзлотных почв суглинистых увалов представлена в [Каверин и др., 2017]. В настоящей работе использование значений ОВО в дополнение к относительной высоте поверхности обусловлено комплексностью почвенно-растительного покрова и расчлененностью рельефа на фоне общего наклона бугристого торфяника с юга на север.

Статистические расчеты проведены в программном пакете IBM SPSS Statistics 19. В качестве порогового значения использован уровень значимости $p = 0.05$. Картограммы мониторинговой площадки, отражающие пространственную дифференциацию исследуемых ландшафтных факторов, составлены в программном пакете Golden Software Surfer 8.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ландшафтные факторы, оказывающие влияние на пространственную дифференциацию мощности СТС. Средняя многолетняя мощность СТС (2013–2017 гг.) в пределах мониторинговой площадки значительно дифференцирована (рис. 3, а), что обусловлено пространственной неоднородностью элементов рельефа бугристого торфяника (см. рис. 3, б–з; табл. 1). Особенностью исследуемого бугристого торфяника является комплексное сочетание преобладающих по площади торфяных бугров (93 % от общего количества пикетов площадки) и локальных участков осоково-сфагновых мочажин (7 %). Поверхность торфяных бугров, в свою очередь, разделяется на участки с кустарничково-моховой растительностью (45 % пикетов площадки) и оголенными торфяными пятнами (48 %) (см. рис. 2). На торфяных буграх специфика оголенных торфяных пятен по сравнению с кустарничково-моховыми участками бугров выражена в относительно высоком положении в рельефе, меньшей высоте элементов микрорельефа, полном или частичном отсутствии растительного покрова, малой мощности снега, большей температуре и влажности почв и в результате в повышенной мощности СТС (см. рис. 3; табл. 1). Оголенные торфяные пятна развиты преимущественно на верхних частях бугров, что способствует их ветровой абразии [Каверин и др., 2016].

Локальные участки мочажин по сравнению с торфяными буграми характеризуются низким положением в рельефе, интенсивным снегонакоплением, слабой степенью дренированности, высокой влажностью и повышенной температурой почв (см. табл. 1). Сочетание данных факторов и условий определяет максимальные величины мощности СТС в мочажинах (см. рис. 3; табл. 1).

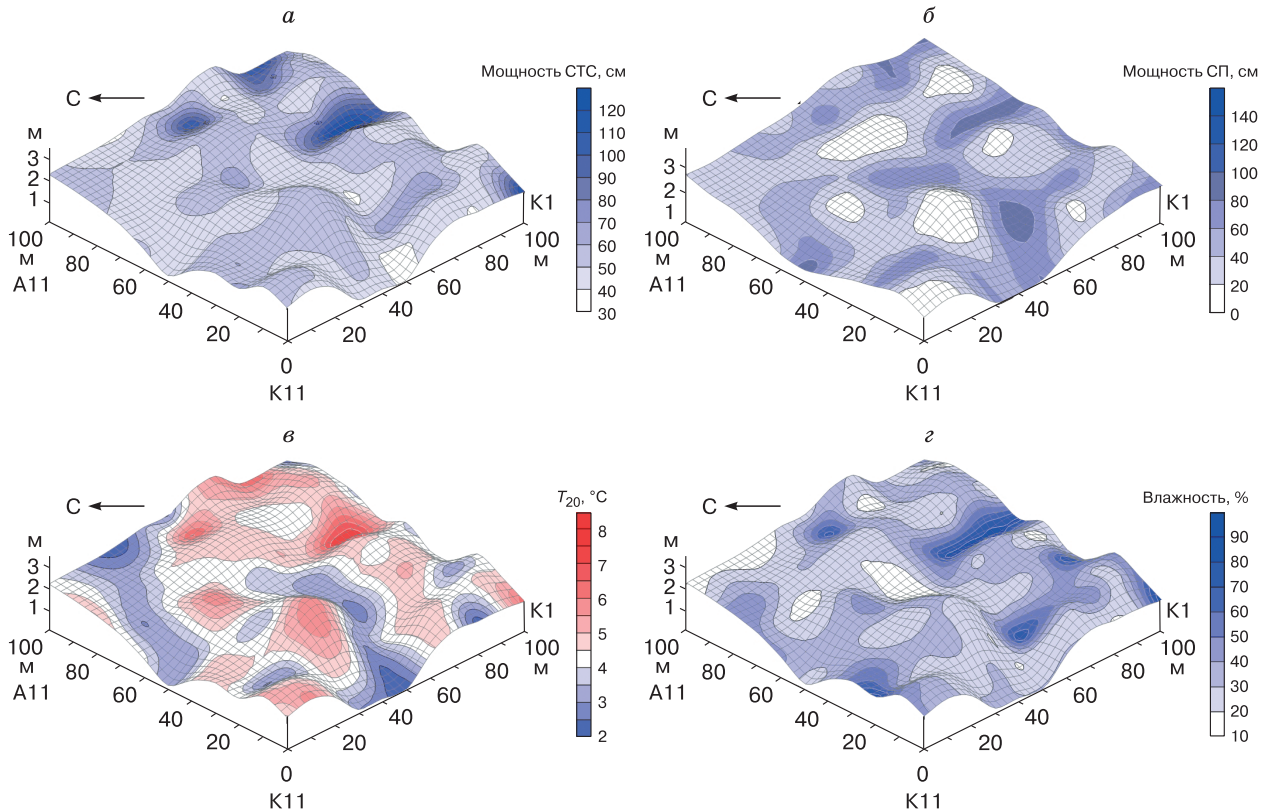


Рис. 3. Пространственная дифференциация глубины сезонного протаивания, показателей ландшафтных факторов и температуры почв на площадке CALM R52:

a – средняя (за 2013–2017 гг.) мощность СТС, см; *б* – средняя (за 2013–2017 гг.) мощность СП, см (на схеме показана поверхность снежного покрова); *в* – температура почвы на глубине 20 см (T_{20}), °С (сентябрь 2016 г.); *г* – объемная влажность верхних почвенных горизонтов, % (сентябрь 2016 г.). А11, К1, К11 – номера угловых пикетов площадки.

Таблица 1. Средние значения (со стандартными отклонениями) исследуемых показателей

Тип растительности	СТС, см (2013–2017 гг.)	Ландшафтные факторы								T_{20} , °С (2016 г.)	Относительная высота, см	
		ОП, см	ОВО, см	Уклон, град	Экспозиция, град	МИК, см	ВР, см	СП, см (2013–2017 гг.)	Влажность, % (2016 г.)		ПРП	ПСП
Оголенные пятна (бугры)	53 ± 6	236 ± 63	35 ± 45	6.4 ± 5.1	186 ± 78	9 ± 4	3 ± 7	22 ± 17	38 ± 16	4.8 ± 0.6	239 ± 61	258 ± 54
Кустарничковая (бугры)	49 ± 18	184 ± 71	-28 ± 45	7.5 ± 6.0	172 ± 79	18 ± 8	27 ± 12	61 ± 22	25 ± 19	3.5 ± 1.1	211 ± 68	245 ± 63
Осоково-сфагновая (мочажины)	139 ± 16	166 ± 23	-68 ± 20	0.2 ± 0.0	Не опр.	12 ± 4	16 ± 21	91 ± 14	100 ± 0	7.2 ± 1.3	182 ± 30	256 ± 28
Среднее значение по площадке	55 ± 22	163 ± 70	0 ± 56	6.6 ± 5.6	179 ± 79	13 ± 8	15 ± 16	44 ± 29	35 ± 23	4.3 ± 1.3	222 ± 65	252 ± 57

Примечание. СТС – мощность сезонноталого слоя; ОП – относительная высота поверхности почвы; ОВО – отклонения высотных отметок от аппроксимирующей плоскости; уклон – угол наклона поверхности; экспозиция – экспозиция поверхности; МИК – высота форм микрорельефа; ВР – максимальная высота растительности; СП – мощность снежного покрова; влажность – объемная влажность верхних почвенных горизонтов; T_{20} – температура почвы на глубине 20 см; ПРП – поверхность растительных ярусов; ПСП – поверхность снежного покрова.

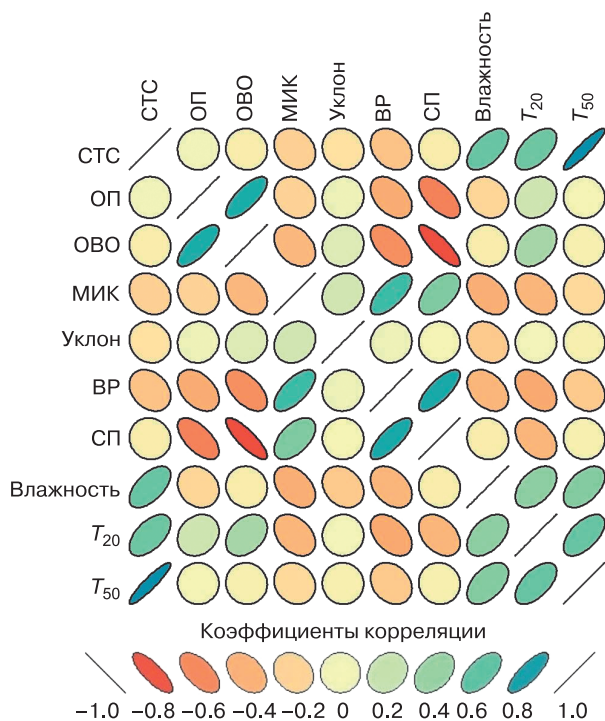


Рис. 4. Коэффициенты корреляции Спирмена между мощностью СТС, ландшафтными факторами и температурой почв на площадке CALM R52:

ОП – относительная высота поверхности; ОВО – отклонения высотных отметок; МИК – микрорельеф; уклон – угол наклона поверхности; ВР – максимальная высота растительности; СП – мощность снежного покрова; влажность – объемная влажность верхнего горизонта почв; T_{20} – температура почвы на глубине 20 см, °C; T_{50} – температура почвы на глубине 50 см, °C.

Дифференцированное снегонакопление на бугристом торфянике приводит к частичному сглаживанию поверхности снежного покрова по сравнению с поверхностью почв (см. табл. 1; рис. 3, б). Интенсивное снегонакопление на бортах и понижениях торфяных бугров защищает кустарничковые ярусы от вымерзания и снеговой корразии.

В пределах площадки мощность СТС значимо и положительно коррелирует с температурой почв на глубинах 20 см (коэффициент корреляции $r = 0.56$), 50 см ($r = 0.92$) и влажностью верхнего почвенного горизонта ($r = 0.59$) (рис. 4). Высота растительности положительно коррелирует с мощностью снежного покрова ($r = 0.77$) и высотой элементов микрорельефа ($r = 0.68$). Мощность СП, в свою очередь, зависит от ОВО ($r = -0.84$). Остальные факторы показали либо слабую корреляцию, либо ее отсутствие (см. рис. 4).

Влияние влажности на мощность СТС связано прежде всего с неоднородностью рельефа бугристого торфяника и типами растительности. По-

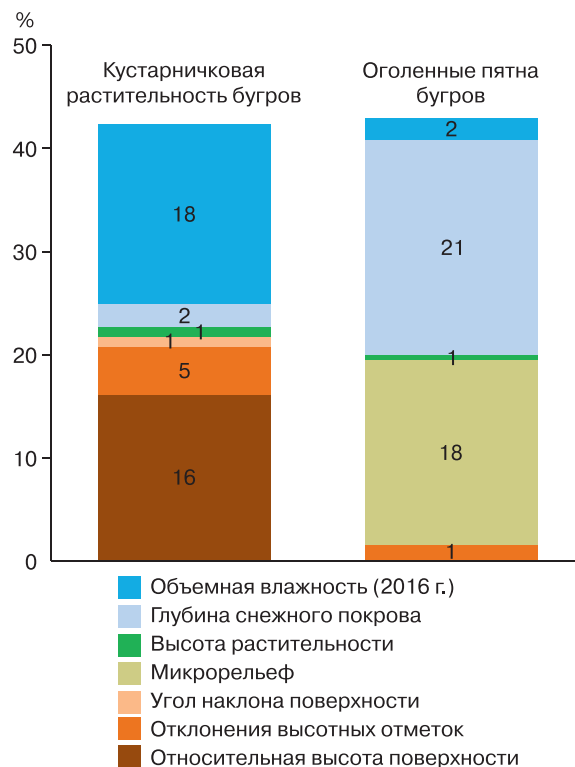


Рис. 5. Вклад ландшафтных факторов (%) в пространственную дифференциацию мощности СТС.

Цифры на диаграмме – значения для отдельных ландшафтных факторов.

этому отдельный мультидисперсионный анализ проведен для торфяных бугров и сопряженных с ними оголенных пятен. Результаты мультирегрессионного анализа показали, что на участках торфяных бугров, покрытых кустарничково-моховой растительностью, основной вклад (доля объясненной дисперсии) в пространственную дифференциацию мощности СТС вносят ОП и влажность почв (рис. 5). Это связано с высокой вариацией ОП (184 ± 71 см) в сравнении с другими типами участков бугристого торфяника. При анализе отдельно мощности СТС оголенных торфяных пятен определено, что основными влияющими ландшафтными факторами становятся мощность СП и микрорельеф (см. рис. 5). Данные факторы являются наиболее чувствительными ввиду малой мощности снежного покрова и активного формирования элементов микрорельефа в результате сезонного пучения [Каверин и др., 2016; Marushchak et al., 2011]. Осоково-сфагновые мочажины в мультирегрессионном анализе не рассматривались отдельно из-за недостаточного объема их выборки.

Климатические факторы, оказывающие влияние на межгодовую вариабельность мощности СТС. Динамика средней по площадке глубины се-

зонного протаивания в период исследований (2013–2017 гг.) характеризовалась положительным трендом ($R^2 = 0.31, y = 1.30x + 51.1$). При этом наиболее выраженные тренды увеличения мощности СТС наблюдаются в почвах осоково-сфагновых мочажин ($R^2 = 0.40, y = 1.64x + 133.68$) и оголенных пятен бугров ($R^2 = 0.33, y = 0.91x + 50.63$). В меньшей степени тренд увеличения глубины сезонного протаивания выражен в почвах кустарничково-моховых участков торфяных бугров ($R^2 = 0.26, y = 1.67x + 44.30$).

Для рассматриваемого периода по основным климатическим показателям и коэффициентам зафиксировано существенное потепление регионального климата по сравнению со второй половиной XX в. (табл. 2). Изменения мощности СТС хорошо согласуются с увеличением среднегодовой температуры воздуха, сумм положительных и отрицательных температур воздуха и особенно с

уменьшением коэффициента морозности воздуха (табл. 3). Влияние годовых и зимних сумм осадков, определенных по данным метеостанции г. Воркута, прослеживается слабо. Следует отметить, что статистические расчеты опираются на относительно короткий временной ряд (5 лет), поэтому полученные результаты могут рассматриваться только как предварительные. Тем не менее даже на примере пятилетнего периода наблюдений отмечена хорошая сходимость приведенных показателей (см. табл. 3).

Среднее значение F за период исследований составило 0.56, что значительно ниже среднего показателя фоновый (1960–1990 гг.) периода 0.63 (см. табл. 2). В фоновый период аналогичные значения F фиксировались вдоль южной границы региональной криолитозоны, где ММП встречались только в условиях изолированных массивов бугристых торфяников крайнесеверной тайги.

Таблица 2. Климатические характеристики и коэффициенты для площадки CALM R52 (Сейда)

Гидрологические годы	$T_{\text{год}}, ^\circ\text{C}$	$DDT, ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$	$FDD, ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$	F	$Ri, \text{мм}$	$Rw, \text{мм}$	СТС, см
1960–1990	–5.8	1112	–3213	0.63	432	70	49*
2012–2013	–4.9	1432	–3068	0.59	438	84	52
2013–2014	–5.3	1026	–2483	0.61	623	76	53
2014–2015	–2.1	1792	–2568	0.54	517	107	56
2015–2016	0.0	2243	–2239	0.50	419	92	61
2016–2017	–3.3	1717	–2913	0.57	468	86	54
2012–2017	–3.1	1642	–2654	0.56	493	89	55

Примечание. $T_{\text{год}}$ – среднегодовая температура воздуха; DDT – сумма положительных среднесуточных температур воздуха; FDD – сумма отрицательных среднесуточных температур воздуха; F – коэффициент морозности воздуха; Ri – годовое количество осадков; Rw – количество зимних осадков; СТС – мощность сезонного слоя.

*Средняя мощность СТС (1960–1990 гг.) рассчитана по отношению F между фоновым [Hijmans et al., 2005] и исследуемым периодами.

Таблица 3. Показатели линейной регрессии между мощностью СТС, климатическими характеристиками и коэффициентом морозности воздуха на площадке CALM R52 (Сейда)

Показатель	$T_{\text{год}}, ^\circ\text{C}$	$DDT, ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$	$FDD, ^\circ\text{C} \cdot \text{сут}$	F	$Ri, \text{мм}$	$Rw, \text{мм}$
<i>Общее описание модели</i>						
R^2	0.91	0.73	0.63	0.90	0.17	0.22
f	30.41	7.99	5.01	25.63	0.60	0.83
p	0.01	0.07	0.11	0.01	0.49	0.43
<i>Характеристики свободного члена уравнения (константа)</i>						
C	60.16	43.51	78.31	100.96	64.21	41.85
t	55.08	10.37	7.48	11.10	5.38	2.87
p	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.06
<i>Коэффициент при независимой переменной</i>						
B	1.64	0.01	0.01	–81.63	–0.02	0.15
t	5.51	2.83	2.24	–5.06	–0.78	0.91
p	0.01	0.07	0.11	0.01	0.49	0.43

Примечание. R^2 – коэффициент детерминации; f – значение критерия Фишера согласия линейной модели; p – уровень значимости; C – значение свободного члена уравнения; t – значение критерия Стьюдента для оценки отдельных коэффициентов модели; B – коэффициент при независимой переменной. Жирным шрифтом выделены наиболее значимые коэффициенты.

Уменьшение F указывает на значительную трансформацию климатических условий, влияющих на температурное состояние ММП на южном пределе региональной криолитозоны. Климатическое потепление в регионе обуславливает повсеместное протаивание ММП в зонах их несплошного распространения, что особенно выражено в минеральных почвах [Оберман, Шеслер, 2009].

Бугристые торфяники могут сохранять многолетнюю мерзлоту даже в условиях климата, не благоприятного для существования минеральных ММП [Rivkin et al., 2016]. По сравнению с минеральными торфяные почвы характеризуются низкой теплопроводностью талых горизонтов и высокой – мерзлых горизонтов [Бабаев и др., 1987], медленнее реагируя на климатическое потепление. Оценки и прогноз изменений мощности СТС, основанные только на анализе динамики сумм положительных температур воздуха, будут не совсем корректны. Использование отношений независимых климатических коэффициентов, рассчитанных на основе DDT , применимо преимущественно для минеральных почв [Stendel, Christensen, 2002]. Для оценки изменений маломощных СТС целесообразнее использовать расчеты отношений между F для сравниваемых периодов. Например, отношение данного климатического коэффициента между исследуемым (F_1) и фоновым (F_0) периодами составило 1.12. Таким образом, средняя мощность СТС на площадке должна была увеличиться на 12 % – с 49 см в 1960–1990 гг. до 55 см в 2012–2017 гг. (см. табл. 2). Это вполне вероятно, учитывая, что средняя мощность СТС в бугристых торфяниках региона варьировала в диапазоне 40–50 см [Шаманова, 1964]. В то же время величина прироста СТС в суглинистых почвах региона была существенно выше [Малкова, 2010; Каверин и др., 2017; Mazhitova et al., 2004].

Необходимо отметить, что использование отношения F_1/F_0 в данной работе имеет ряд недостатков: изучается относительно короткий ряд наблюдений и не учитывается влияние осадков и мощности снежного покрова. Возможны также ограничения в использовании F для оценки мощности СТС болотных ландшафтов с глубоким сезонным протаиванием. Влияние осадков может не учитываться из-за слабой корреляционной связи с глубиной сезонного протаивания в период исследований. Тем не менее применение отношений F для оценки изменений мощности СТС становится целесообразным на мониторинговых площадках с преобладанием торфяных бугров, характеризующихся малыми мощностями СТС и СП. Отношения F могут эффективно применяться при ГИС-анализе климатических условий, обуславливающих температурную устойчивость бугристых торфяников в регионе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенности рельефа бугристых торфяников обуславливают значительную степень пространственной дифференциации мощности СТС (55 ± 22 см). Исследуемый бугристый торфяник характеризуется ограниченной локализацией заболоченных мочажин (7 %) с глубоким сезонным протаиванием (139 ± 16 см) на фоне абсолютного преобладания торфяных бугров (93 %). В пределах торфяных бугров дифференциация мощности СТС определяется сочетанием участков кустарничково-моховых сообществ (49 ± 18 см) и оголенных торфяных пятен (53 ± 6 см), занимающих 45 и 48 % площади участка соответственно. Оголенные торфяные пятна по сравнению с кустарничково-моховыми сообществами отличаются частичным или полным отсутствием растительного покрова (высота 3 ± 7 см), большими значениями относительной высоты поверхности (236 ± 63 см), большими значениями температуры (4.8 ± 0.6 °C на глубине 20 см) и влажности почв (38 ± 17 % на глубине 0–10 см), меньшими значениями мощности снежного покрова (22 ± 17 см) и высоты элементов микрорельефа (9 ± 4 см). При этом значения коэффициентов вариации мощности СТС (6 %) и определяющих ее ландшафтных факторов (в среднем 26 %) в оголенных пятнах более низкие по сравнению со значениями в кустарничково-моховых сообществах.

Мощность СТС в целом по площадке хорошо коррелирует с влажностью верхнего (0–10 см) горизонта почв ($r = 0.68$) и температурой почв на глубинах 20 см ($r = 0.56$) и 50 см ($r = 0.92$, p -level < 0.05). На участках торфяных бугров, покрытых кустарничково-моховой растительностью, основными ландшафтными факторами, определяющими пространственную дифференциацию мощности СТС, являются относительная высота поверхности (16 %) и связанная с ней объемная влажность почв (18 %). На оголенных пятнах торфяных бугров ведущими ландшафтными факторами становятся мощность СП (21 %) и высота форм микрорельефа (18 %).

Динамика средней по площадке глубины сезонного протаивания в период исследований (2013–2017 гг.) характеризовалась положительным трендом ($R^2 = 0.31$, $y = 1.30x + 51.1$). В почвах бугристых торфяников мощность СТС в меньшей степени, чем в минеральных почвах, реагирует на многолетние колебания температуры воздуха. Анализ соотношений изменений климатических параметров и мощности СТС показал, что для бугристых торфяников наиболее эффективным климатическим фактором является коэффициент морозности воздуха F ($R^2 = 0.90$). Использование данного коэффициента перспективно для оценки

происходящих и прогнозируемых изменений мощности СТС в бугристых торфяниках.

Работа выполнена в рамках международной программы “Циркумполярный мониторинг деятельного слоя” (CALM), возглавляемой фондом фундаментальных исследований США (NSF), проекта “Изучение обратной связи: изменения климата – вечная мерзлота” (COUP), возглавляемого Университетом Восточной Финляндии (г. Куопио, Финляндия), при финансировании РФФИ (проекты № 18-55-11003, 18-05-60005).

Литература

- Атлас Республики Коми по климату и гидрологии / Под ред. А.И. Таскаева. М., Дрофа и Дик, 1997, 115 с.
- Taskaev, A.I., 1997. Atlas of the Republic of Komi on Climate and Hydrology. Drofa i Dik, Moscow, 115 pp. (in Russian)
- Бабаев В.В.** Теплофизические свойства горных пород / В.В. Бабаев, В.Ф. Будымка, М.А. Домбровский, Т.А. Сергеева. М., Недра, 1987, 156 с.
- Babaev, V.V., Budymka, V.F., Dombrovsky, M.A., Sergeeva, T.A., 1987. Thermal and Physical Properties of Rocks. Nedra, Moscow, 156 pp. (in Russian)
- Бабкина Е.А., Хомутов А.В., Бабкин Е.М. и др.** Динамика глубины сезонного протаивания в различных ландшафтах Центрального Ямала // Современные проблемы географии и геологии: к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете: Материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Томск, ТГУ, 2017, т. 1, с. 29–32.
- Babkina, E.A., Khomutov, A.V., Babkin, E.M., Mullanurov, D.R., Dvornikov, Yu., A., Leibman, M.O., 2017. Dynamics of depth of seasonal thawing in different landscapes in Central Yamal, in: Modern problems of geography and geology: to the century of the opening of the natural sciences branch in Tomsk State University. Proceedings of the 4th All-Russian scientific and practical conference with the international participation. TGU, Tomsk, vol. 1, pp. 29–32. (in Russian)
- Бобрин А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В. и др.** Взаимосвязь геоэкологических условий и гидротермических параметров почв плоскобугристых торфяников севера Западной Сибири (станция Надым) // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 31–38.
- Bobrik, A.A., Goncharova, O.Yu., Matyshak, G.V., Ryzhova, I.M., Moskalenko, N.G., Ponomareva, O.E., Ogneva, O.A., 2015. Correlation of active layer thickness and landscape parameters of peatland in northern West Siberia (Nadym Station). Earth's Cryosphere XIX (4), 29–35.
- Геоэкология СССР.** Европейская территория СССР / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Недра, 1988, 358 с.
- Ershov, E.D. (Ed.), 1988. Geocryology of the USSR. European Part of the USSR, Nedra, Moscow, 358 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., Biasi, C., Marushchak, M., Martikainen, 2016. Morphology and properties of soils of permafrost peatlands in the southeast 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.
- Каверин Д.А., Пастухов А.В., Новаковский А.Б.** Динамика глубины сезонного протаивания тундровых мерзлотных почв (на примере площадки циркумполярного мониторинга деятельного слоя в Европейской России) // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 35–44.
- Kaverin, D.A., Pastukhov, A.V., Novakovskiy, A.B., 2017. Active layer thickness dynamics in the tundra permafrost-affected soils: a CALM site study, the European North of Russia. Earth's Cryosphere XXI (6), 30–38.
- Классификация и диагностика почв России** / Авт. и сост.: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск, Ойкумена, 2004, 342 с.
- Shishov, L.L., Tonkonogov, V.D., Lebedeva, I.I., Gerasimova, M.I., 2004. Russian Soils Classification and Diagnostics. Oikumena, Smolensk, 342 pp. (in Russian)
- Максимова Л.Н., Оспенников Е.Н.** Эволюция болотных систем и мерзлотных условий Большеземельской тундры в голоцене // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 3, с. 53–61.
- Maksimova, L.N., Ospennikov, E.N., 2012. Evolution of bog systems and permafrost conditions of the Bolshaya Zemlya tundra in the Holocene. Earth's Cryosphere XVI (3), 53–61.
- Малкова Г.В.** Мониторинг среднегодовой температуры пород на стационаре Болванский // Криосфера Земли, 2010, т. XIV, № 3, с. 3–14.
- Malkova, G.V., 2010. Mean annual ground temperature monitoring at Bolvansky geocryological station. Earth's Cryosphere XIV (3), 3–14.
- 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, in: Problemy Severa i Arktiki RF, Sci-Inform. Bulletin, iss. 9, pp. 96–106. (in Russian)
- Пастухов А.В., Каверин Д.А.** Экологическое состояние мерзлотных бугристых торфяников на северо-востоке Европейской России // Экология, 2016, № 2, с. 94–102, DOI: 10.7868/S0367059716010108.
- Pastukhov, A.V., Kaverin, D.A., 2016. Ecological state of peat plateaus in northeastern European Russia. Ekologia, No. 2, 94–102.
- Ривкин Ф.М., Власова Ю.В., Пармузин И.С.** Закономерности изменения геоэкологических условий в результате осадки мерзлых пород при оттаивании // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 6, с. 26–34.
- Rivkin, F.M., Vlasova, Yu.V., Parmuzin, I.S., 2017. Study of changes in permafrost conditions caused by frozen ground thaw subsidence. Earth's Cryosphere XXI (6), 21–29.
- Фотиев С.М.** Арктические торфяники Ямало-Гыданской провинции Западной Сибири // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 5, с. 3–15.
- Fotiev, S.M., 2017. Arctic peatlands of the Yamal-Gydan province of Western Siberia. Earth's Cryosphere XXI (5), 3–13.
- Шаманова И.И.** Сезонное промерзание и протаивание грунтов центральной части Печорского Уральского бассейна: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 1964, 21 с.
- Shamanova, I.I., 1964. Seasonal freezing and thawing of soils in the central part of the Pechora Ural basin. Extended abstract of the Cand. Sci. (geogr.) Thesis. Moscow, 21 pp. (in Russian)

- Brown, J., Hinkel, K.M., Nelson, E.F.** The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: research designs and initial results // *Polar Geography*, 2000, vol. 24, No. 3, p. 165–258.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., et al.** Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // *Intern. J. Climatol.*, 2005, vol. 25, p. 1965–1978.
- Johansson, M., Christensen, T.R., Akerman, H.J., Callaghan, T.V.** What determines the current presence or absence of permafrost in the Tornetrask region, a subarctic landscape in northern Sweden? // *Ambio*, 2006, vol. 35 (4), p. 190–197.
- Klene, A.E., Nelson, F.E., Shiklomanov, N.I.** The N-factor in natural landscapes: variability of air and soil-surface temperatures, Kuparuk River basin, Alaska, USA // *Arctic, Antarctic and Alpine Res.*, 2001, No. 33, p. 140–148.
- Marushchak, M.E., Pitkamaki, A., Koponen, H., et al.** Hot spots for nitrous oxide emissions found in different types of permafrost peatlands // *Global Change Biol.*, 2011, vol. 17, p. 2601–2614, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02442.x.
- Mazhitova, G., Malkova (Ananjeva), 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, p. 123–139.
- Mazhitova, G., Oberman, N.** Permafrost mapping of Northeast European Russia based on the period of climatic warming 1970–1995 // *Norwegian J. Geography*, 2003, vol. 57, No. 2, p. 111–120(10), DOI: org/10.1080/00291950310001513.
- Nelson, F.E., Outcalt, S.I.** A computational method for prediction and regionalization of permafrost // *Arctic Alp. Res.*, 1987, vol. 19, No. 3, p. 279–288.
- Rivkin, F., Vlasova, Y., Marchenko, S., Parmuzin, I.** Ground thaw subsidence and spatial analysis of landscape transformation // *Abstr. of XI Intern. Conf. on Permafrost (20–24 June 2016)*, Potsdam, Germany, 2016, p. 393–395, DOI: 10.13140/RG.2.1.4709.5282.
- Sannel, A.B.K., Hugelius, G., Jansson, P., Kuhry, P.** Permafrost warming in a Subarctic Peatland – Which meteorological controls are most important? // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2016, vol. 27, p. 177–188, DOI: 10.1002/ppp.1862.
- Stendel, M., Christensen, J.H.** Impact of global warming on permafrost conditions in a coupled GCM // *Geophys. Res. Lett.*, 2002, vol. 29, No. 13, DOI: 10.1029/2001GL014345.
- Wisser, D., Marchenko, S., Talbot, J., et al.** Soil temperature response to 21st century global warming: the role of and some implications for peat carbon in thawing permafrost soils in North America // *Earth System Dynamics*, 2011, vol. 2, p. 121–138, <https://doi.org/10.5194/esd-2-121-2011>.

*Поступила в редакцию 5 февраля 2018 г.,
после доработки – 11 октября 2018 г.,
принята к публикации 16 ноября 2018 г.*