

## ДИНАМИКА ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ ТУНДРОВЫХ МЕРЗЛОТНЫХ ПОЧВ (НА ПРИМЕРЕ ПЛОЩАДКИ ЦИРКУМПОЛЯРНОГО МОНИТОРИНГА ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ В ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ)

Д.А. Каверин, А.В. Пастухов, А.Б. Новаковский

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

Приведены данные 17-летнего изучения глубины сезонного протаивания тундровых мерзлотных почв на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) на европейском Севере России (район г. Воркуты). Оценено влияние климатических параметров (температура воздуха, осадки) на межгодовую вариабельность средней глубины сезонного протаивания почв на мониторинговой площадке. Определена степень влияния ландшафтных факторов (рельеф, мощность торфяного горизонта почв, высота мохового и кустарничково-кустарникового ярусов, глубина снежного покрова, влажность почвы) на пространственную дифференциацию глубины сезонного протаивания на локальном уровне. Охарактеризована динамика температурного режима тундровых почв во взаимосвязи с многолетней динамикой глубины сезонного протаивания.

*Тундровые почвы, глубина сезонного протаивания, климатические параметры, ландшафтные факторы*

### ACTIVE LAYER THICKNESS DYNAMICS IN THE TUNDRA PERMAFROST-AFFECTED SOILS: A CALM SITE CASE STUDY, THE EUROPEAN NORTH OF RUSSIA

D.A. Kaverin, A.V. Pastukhov, A.B. Novakovskiy

*Institute of Biology, Komi Science Centre,  
28, Communisticheskaya str., Syktyvkar, 167982, Russia; dkav@mail.ru*

The paper presents the results of long-term active layer monitoring (over 17 years) of mineral permafrost-affected soils on the Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) site in the north of European Russia (the Vorkuta area). These allowed to study the influences of climatic parameters (air temperature, precipitation) on the interannual variability of active layer thickness, and to determine the degree of the landscape factors (topography, peat layer thickness, the height of moss and shrub layers, snow depth, soil moisture) effect on spatial differentiation of the active layer thickness, at the local level. The tundra soils temperature regime dynamics has been characterized in relation to the long-term variability in active layer thickness.

*Tundra soils, active layer thickness, climatic parameters, landscape factors*

### ВВЕДЕНИЕ

Для зоны тундры характерна наибольшая чувствительность мерзлотных почв к климатическим изменениям [Павлов, 1997]. В тундрах европейского Севера России динамика глубины сезонного протаивания и температуры почв зависит от изменений температуры воздуха и высоты снежного покрова [Анисимов и др., 2003; Шерстюков, 2008]. При этом наибольшие изменения температурного поля многолетнемерзлых пород (ММП) происходят при одновременном увеличении температуры воздуха и мощности снежного покрова. Отклик сезонноталого слоя (СТС) на климатические изменения определяется также типом растительного покрова, который сам изменяется в процессе потепления.

Циркумполярный мониторинг деятельного слоя (программа CALM) проводится с целью выявления трендов изменения глубины сезонного протаивания мерзлотных почв и анализа связи этих трендов с климатическими показателями и

ландшафтными параметрами [Klene et al., 2001]. На 110 мониторинговых площадках CALM применяется единый протокол измерений, обеспечивающий статистическую достоверность получаемых данных [Brown et al., 2000].

В последние два десятилетия наиболее выраженные тренды увеличения глубины сезонного протаивания наблюдаются на европейском Севере – регионе, особенно чувствительном к климатическим изменениям в пределах нашей страны [Оберман, Шеслер, 2009; Mazhitova et al., 2004b]. В настоящее время в регионе действуют три площадки CALM, промежуточные результаты мониторинга на которых были опубликованы в [Мажитова, Каверин, 2007; Малкова, 2010; Mazhitova et al., 2004a]. На площадках уже в 2000-е гг. фиксировались значительные темпы увеличения глубины протаивания многолетнемерзлых горизонтов. В настоящей работе рассматриваются результаты мониторинга глубины сезонного протаивания за

период 1998–2015 гг. на площадке CALM R2, расположенной в районе г. Воркуты [GTN-P, 2016]. Мониторинговая площадка CALM R2 представляет собой специфический объект исследований, где в условиях тундровых почв юга европейской криолитозоны ММП залегают близко к поверхности (на глубине около 1 м).

Цель работы – оценка влияния климатических параметров и ландшафтных факторов на глубину сезонного протаивания тундровых мерзлотных почв на примере мониторинговой площадки в зоне несплошной многолетней мерзлоты (европейский Северо-Восток России).

### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Участок исследований находится в восточной части Большеземельской тундры, где распространены массивно-островные ММП [Геокриология..., 1988; Геокриологическая карта..., 1998; Oberman, Mazhitova, 2001]. Территория представляет собой пологоувалистую равнину, покрытую чехлом покровных пылеватых суглинков мощностью менее 10 м [Карта..., 1959]. Согласно геоботаническому районированию, территория относится к подзоне южной тундры, где широко распространены высокие кустарники и плоскобугристые болота. Среднегодовая температура воздуха по метеостанции

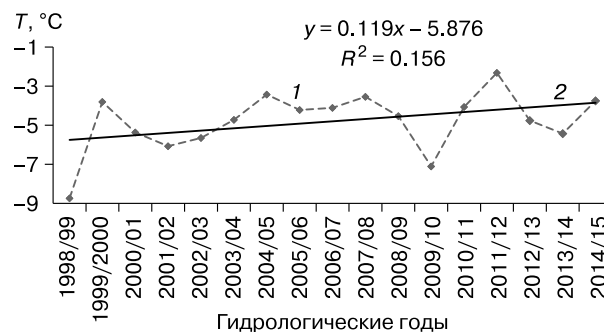


Рис. 1. Динамика среднегодовых температур воздуха (метеостанция Воркута).

1 – среднегодовая температура; 2 – линейный тренд.

г. Воркута (1947–2015 гг.) составила  $-5.6^{\circ}\text{C}$ , средняя сумма положительных среднесуточных температур воздуха  $1021^{\circ}\text{C}$ , среднегодовое количество осадков 517 мм. Климатические параметры за период исследований приведены в табл. 1. В период наблюдений (1998–2015 гг.) зафиксировано незначительное повышение среднегодовых температур (коэффициент линейной регрессии положителен, уровень значимости  $p = 0.116$ , коэффициент детерминации  $R^2 = 0.156$ ) (рис. 1). Отметим, что

Таблица 1. Динамика климатических параметров за период 1998–2015 гг. (данные по метеостанции Воркута)

Гидрологический год	Среднегодовая температура воздуха, °C	Суммы положительных температур, °C·сут	Суммы отрицательных температур, °C·сут	Годовое количество осадков, мм	Сумма осадков теплого периода (май–сентябрь), мм	Сумма осадков холодного периода (октябрь–апрель), мм	Средняя по площадке мощность снежного покрова*, см
1998/99	-8.4	881	-3930	541	314	227	39
1999/00	-3.9	1191	-2609	467	233	234	30
2000/01	-5.3	1235	-3156	433	186	247	31
2001/02	-6.1	882	-3099	552	337	215	40
2002/03	-5.7	1245	-3309	613	309	304	31
2003/04	-4.8	1193	-2871	483	231	252	41
2004/05	-4.0	1291	-2723	525	274	251	41
2005/06	-4.3	1107	-2630	597	328	270	33
2006/07	-3.7	1277	-2464	489	249	240	52
2007/08	-3.6	1126	-2322	525	219	306	43
2008/09	-4.5	1046	-2604	613	282	331	43
2009/10	-7.0	995	-3542	776	404	372	43
2010/11	-4.1	1098	-2562	668	247	421	39
2011/12	-2.3	1370	-2182	642	336	306	44
2012/13	-4.8	1200	-2951	438	218	220	50
2013/14	-5.5	873	-2862	623	322	301	88
2014/15	-3.8	1184	-2566	517	263	254	62
Среднее за 1998–2015 гг.	-4.8	1129	-2846	559	279	279	44
Коэффициент корреляции с глубиной СТС	0.4	0.2	0.5	0.3	0.1	0.4	0.4

\*Данные по результатам снегомерной съемки на площадке CALM R2.

повышение среднегодовых температур вызвано существенным изменением суммы отрицательных (зимних) температур (коэффициент линейной регрессии 41.422,  $p = 0.05$ ,  $R^2 = 0.233$ ). Суммы положительных (летних) температур практически не изменялись (коэффициент линейной регрессии 1.665,  $p = 0.851$ ,  $R^2 = 0.002$ ).

Площадка CALM R2 Аяч-Яха расположена в 13 км к северо-востоку от г. Воркуты (67°35' с.ш.; 64°10' в.д.). Площадка локализована в пределах ландшафта с тундровыми мерзлотными почвами, широко распространенными в Большеземельской тундре. Эти ландшафты занимают около 15–20 % площади рассматриваемой территории, представляя собой малоснежные (наветренные) пологие склоны и вершины увалов с мохово-кустарничковой тундрой, пятнами морозного пучения и глубиной сезонного протаивания в основном в пределах первого метра. Общая мощность почвенного профиля в пределах исследуемого ландшафта в целом совпадает с глубиной сезонного протаивания. Конкретная площадка, характеризующая ландшафт, занимает площадь около 0.1 км<sup>2</sup>, охватывая пологий юго-западный склон холма с максимальной абсолютной отметкой 184.8 м над ур. моря и превышением 45 м над урезом воды в руч. Старый [Мажитова, Каверин, 2007]. Сравнительная характеристика температурных режимов почв различных ландшафтов рассматриваемой территории приведена в нескольких работах [Кононенко, 1986; Мажитова, 2008; Каверин и др., 2014].

Мониторинговая площадка размером 100 × 80 м организована в виде сетки постоянных пикетов с размером ячеек 10 × 10 м. Площадка находится на слабонаклонной поверхности (уклон около 3°, юго-юго-западная экспозиция) с перепадом высот 5 м. Растительность – мохово-кустарничковая тундра с пятнами пучения, почвы представлены торфяно-глебеземами мерзлотными.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Инструментальные измерения.** Глубина сезонноталого слоя измеряется на площадке ежегодно с 1996 г. на каждом из 99 пикетов, замеры выполняются градуированным металлическим зондом. Необходимо отметить, что на момент создания площадка состояла из 121 пикета, однако в первые годы измерений два ряда, находящихся в нижней части склона, были исключены из состава площадки. На этих рядах сезонное протаивание достигло кровли залегания коренных пород (глубина 1.0–1.5 м) уже в начале 2000-х гг., что обусловило нецелесообразность дальнейших измерений. С 1999 г. на площадке ежегодно начал проводиться дополнительный комплекс измерений, позволяющий определить влияние ландшафтных факторов на глубину сезонного протаивания. До-

полнительный комплекс ежегодных наблюдений включает снегосъемку, измерение влажности почвы и определение изменений рельефа площадки. Измерение объемной влажности верхнего 10-сантиметрового слоя почвы проводится электронным влагомером Delta-T SM 150 с датчиком НН2. Для выявления изменений в рельефе площадки на всех 99 постоянных пикетах с 1999 г. ежегодно в начале (май) и конце (сентябрь) теплого сезона определяются абсолютные отметки поверхности почвы. Измерения проводятся оптическим нивелиром Geobox N8-32, дающим ошибку 1.5 мм на 1 км возвратного хода. Многолетние наблюдения за поверхностью площадки позволяют отслеживать динамику пучения/просадки поверхности мерзлотных почв.

Долговременные измерения (1998–2015 гг.) температур СТС почв проводятся с помощью цифровых логгеров НОВО U-12-008, установленных на глубине 0, 20 и 50 см и запрограммированных на 8 измерений в сутки. Датчики логгеров закреплены на деревянной рейке, установленной в скважину (отверстие) диаметром 3 см и глубиной 50 см. Точность измерения температурных датчиков составляет 0.21 °С. В сентябре 2015 г. на глубине 20 и 50 см у всех пикетов площадки были проведены разовые измерения температуры почв с помощью переносного термометра HANNA HI 935005 с прикрепленным проникающим термодатчиком HANNA HI 766TR2 (точность до 0.1 °С). При этом температурные данные логгера, установленного на пикете площадки С5, показали совпадение данных разовых и мониторинговых измерений. В сентябре 2011 г. проводились измерения мощности торфяного горизонта и высоты кустарничково-кустарничкового и мохового ярусов.

**Статистическая обработка данных.** Комплексное влияние климатических и ландшафтных параметров на временную и пространственную динамику глубины сезонного протаивания оценивалось: при помощи коэффициентов корреляции; методом мультирегрессионного анализа (GLM – General Linear Model) [Dobson, 2002].

Для оценки климатических показателей коэффициент корреляции рассчитывался для каждой конкретной точки (пикета) за весь период наблюдений. Влияние ландшафтных показателей оценивалось по корреляции между всеми пикетами и ландшафтными показателями за каждый отдельный год.

При проведении мультирегрессионного анализа глубина сезонного протаивания в модели выступала в качестве зависимой переменной. Предикторами (независимыми переменными) модели были семь ландшафтных факторов: 1) абсолютные высоты поверхности площадки (высота над

уровнем моря, диапазон 5 м); 2) микрорельеф (отклонения абсолютных отметок поверхности площадки от аппроксимирующего линейного склона (диапазон 0–1.2 м); 3) мощность торфяного горизонта почв (диапазон 4–20 см); 4) высота мохового яруса (диапазон 0.2–5.0 см); 5) высота кустарничково-кустарничкового яруса (диапазон 5–60 см); 6) глубина снежного покрова (диапазон 0–123 см); 7) объемная влажность верхнего слоя почв (диапазон 0–100 %), и четыре климатических фактора (суммы положительных, отрицательных температур, количество осадков за холодный и теплый периоды).

Все показатели являются непрерывными и использованы в качестве ковариатов линейной модели. Ландшафтные переменные, имеющие существенные пропуски (более 50 %), в ряде лет исключались из линейной модели для данного года. Оценка качества полученных моделей производилась на основе значения Фишера (F) и соответствующего ему уровня значимости (*p*).

Следует отметить, что не все анализируемые данные подчинялись нормальному закону распределения, что является необходимым условием для построения регрессионных моделей и корреляционного анализа. Поэтому авторы использовали бутстреп (bootstrap)-анализ [Шитиков, Розенберг, 2013]. Бутстреп-анализ относится к так называемым компьютерно-интенсивным (computer-intensive) технологиям и не требует априорной информации о распределении анализируемых показателей. Суть подхода состоит в том, что все вычисления повторяются большое количество раз (обычно 1000–10 000) с незначительными изменениями исходных данных. В результате для каждого регрессионного или корреляционного коэффициента формируется выборка, на основе которой и определяется соответствующий уровень значимости. Подобный анализ является менее требовательным к исходным данным, чем стандартные асимптотические подходы.

Вклад анализируемых признаков в общую вариацию зависимой переменной оценивали по формуле

$$D_i = \frac{SS_i}{\sum SS_i} R^2 \cdot 100 \%,$$

где  $D_i$  – доля объясненной дисперсии в изменчивости зависимого параметра  $i$ -м фактором;  $SS_i$  – сумма квадратов отклонений зависимой переменной от предсказанных по модели значений без учета  $i$ -го параметра (вклад  $i$ -го фактора в общую модель);  $R^2$  – коэффициент детерминации (доля объясненной дисперсии моделью).

Для определения неоднородности поверхности площадки, находящейся на склоне, были рассчитаны условные значения микрорельефа. Значения микрорельефа рассчитывались методом мультирегрессионного анализа (независимые переменные – координаты пикета по осям  $x$  и  $y$ , зависимая – высотная отметка пикета). Рассчитана плоскость, наилучшим образом аппроксимирующая склон, на котором расположена площадка. Отклонения высотных отметок пикетов от этого расчетного склона рассматривались как количественная характеристика мезорельефа. Данный метод не универсален, но применим при небольших перепадах высот. При этом положительные отклонения соответствуют выпуклым элементам рельефа, отрицательные – вогнутым. Необходимо отметить, что название ландшафтного фактора “микрорельеф” является условным, так как он в основном характеризует неоднородность поверхности склона.

Все расчеты производились в программе IBM SPSS Statistics 19. Значимыми считались коэффициенты с уровнем значимости  $p < 0.05$ . Для визуализации результатов исследований картограммы мониторинговой площадки, отражающие пространственную дифференциацию глубины сезонного протаивания и ландшафтных факторов, составлены в программном пакете GoldenSoftware-Surfer 8.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Динамика глубины сезонного протаивания.

С 1999 по 2007 г. средняя по площадке глубина сезонного протаивания непрерывно увеличивалась. В период 2008–2015 гг. тренд увеличения глубины сезонного протаивания стал слабовыраженным и статистически незначимым. В 2007–2009 и 2013–2015 гг. зафиксированы периоды снижения средней глубины сезонного протаивания. Глубина сезонного протаивания, осредненная по площадке за весь период наблюдений (1999–2015), составила  $(82 \pm 11)$  см. В 2015 г. средняя по площадке глубина сезонного протаивания составила 139 % (89 см) от значения 1999 г. (64 см) (рис. 2).

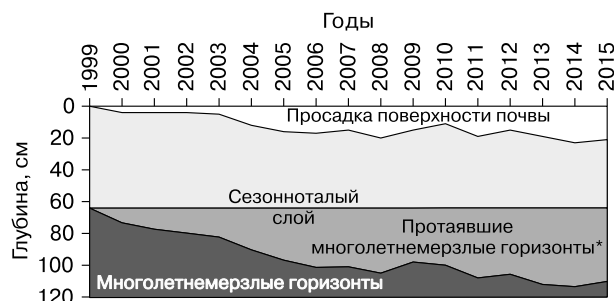


Рис. 2. Динамика глубины сезонного протаивания на площадке CALM R2 (1999–2015 гг.).

\*Мощность протаявших многолетнемерзлых горизонтов – с 1999 г.

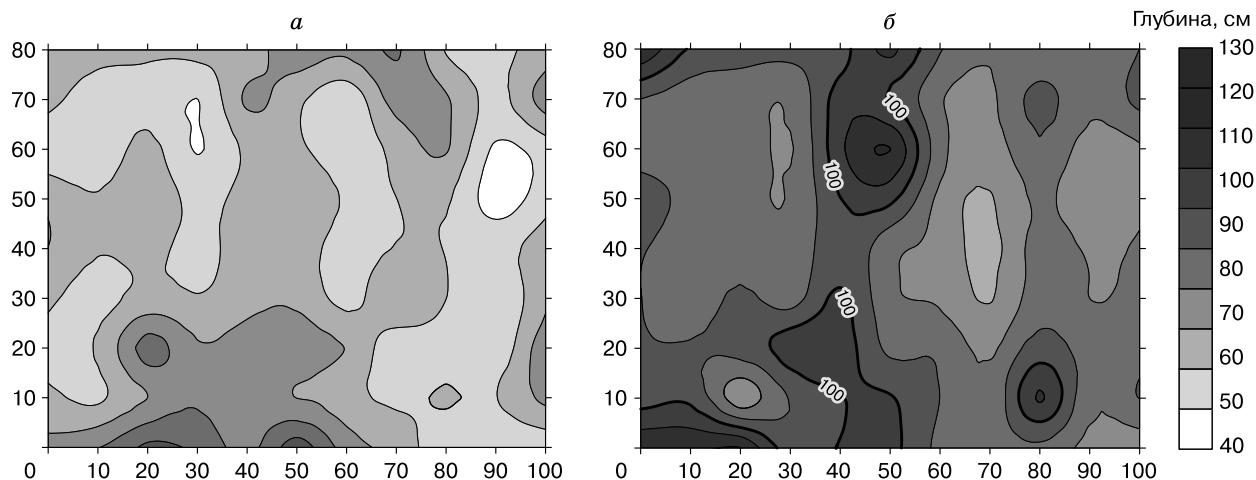


Рис. 3. Глубина сезонноталого слоя на площадке CALM R2.

*a* – 1999 г.; *б* – 2015 г.

В 1999 г. только 1 % пикетов характеризовался глубиной сезонного протаивания более 1 м, в 2015 г. этот показатель увеличился до 17 % (рис. 3). Глубина залегания ММП до 1 м является одним из основных классификационных критериев для отнесения почв к группе мерзлотных почв (Cryosols) [IUSS..., 2014]. Коэффициент вариации глубины сезонного протаивания в 1999 г. составил 19 %, в 2015 г. – 16 %.

**Влияние климатических параметров на глубину сезонного протаивания.** Осредненные по всем пикетам площадки коэффициенты корреляции глубины сезонного протаивания с климатическими факторами оказались статистически незначимыми на 5%-м уровне. Наиболее высокие, осредненные по всем пикетам площадки, коэффициенты корреляции ( $r = 0.4 \pm 0.2$ ) выявлены между глубиной сезонного протаивания и такими климатическими параметрами, как среднегодовая температура воздуха, сумма отрицательных температур воздуха, сумма осадков холодного периода, глубина снежного покрова. Годовая сумма осадков и сумма осадков теплого периода обнаруживают еще более слабую корреляционную связь с глубиной сезонного протаивания ( $0.3 \pm 0.2$  и  $0.1 \pm 0.1$  соответственно). Незначительные корреляционные связи ( $r = 0.2 \pm 0.2$ ) выявлены с индексом протаивания (суммы положительных температур воздуха). В предыдущих работах [Мажитова, Каверин, 2007] авторами отмечалась статистически значимая корреляция ( $r = 0.6$ ) глубины сезонного протаивания с суммами положительных температур воздуха. Наблюдаемые различия связаны с тем, что расчеты для предыдущих исследований охватывали период непрерывного увеличения сезонноталого слоя (1996–2007 гг.). Однако в последние годы (2007–2015 гг.) на глу-

бину сезонного протаивания стали заметнее влиять зимние температуры воздуха.

Анализ пространственного варьирования коэффициентов корреляции между глубиной сезонного протаивания и среднегодовой температурой воздуха показал, что статистически значимые коэффициенты характерны лишь для 25 % пикетов (рис. 4). Максимальное количество пикетов со статистически значимыми коэффициентами корреляции отмечено при существенном влиянии снежного покрова (44 %). При анализе пространственной вариации коэффициентов корреляции между климатическими факторами и глубиной сезонного протаивания на площадке четко выделяется участок с отрицательными коэффициентами (см. рис. 4). Данный участок приурочен к хоро-

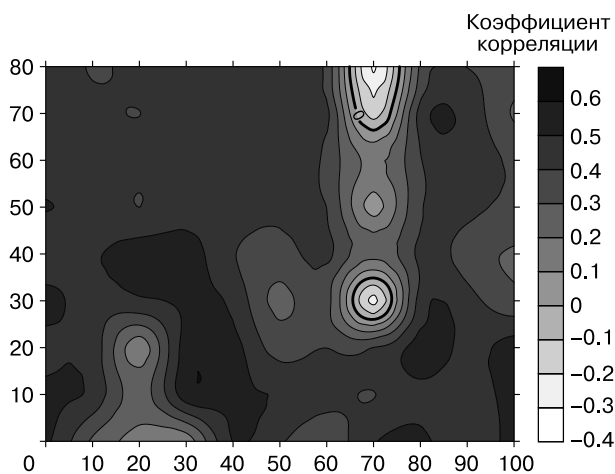


Рис. 4. Коэффициенты корреляции между среднегодовой температурой воздуха и глубиной СТС на пикетах мониторинговой площадки.

Таблица 2. Влияние климатических параметров на межгодовую вариабельность средней по площадке глубины сезонного протаивания

Климатический параметр	Доля объясненной дисперсии, %	<i>p</i> (бутстреп-анализ)
Суммы положительных температур воздуха	0	0.913
Суммы отрицательных температур воздуха	30	0.059
Сумма осадков теплого периода (май–сентябрь)	5	0.354
Сумма осадков холодного периода (октябрь–апрель)	12	0.211

шо дренированному борту ложбины стока, где в течение периода исследований практически не наблюдалось увеличения глубины сезонного протаивания и просадки поверхности почвы.

Мультирегрессионный анализ, проведенный по климатическим факторам в совокупности, объясняет 47 % межгодовой вариации средней глубины сезонного протаивания. При этом наибольшую долю дисперсии объясняет параметр “сумма отрицательных температур”, в меньшей степени влияет сумма осадков холодного периода (табл. 2). Повышение зимних температур воздуха и увеличение глубины снежного покрова способствуют неполному зимнему промерзанию СТС. Снижение “аккумуляции” зимнего холода в почвах, в свою очередь, способствует более быстрому протаиванию почв в летний период.

**Влияние ландшафтных факторов на глубину сезонного протаивания.** Среди ландшафтных факторов наибольшее влияние на глубину сезонного протаивания оказывает мощность торфяного горизонта почв. Средний по площадке коэффициент корреляции составил  $r = -0.40 \pm 0.04$ . Доля объясненной дисперсии для торфяного горизонта также оказалась наибольшей (табл. 3). Необходимо отметить, что средняя за все годы измерений глубина сезонного протаивания на пикетах с мощностью органогенного горизонта менее 10 см составила 85 см, тогда как при большей мощности торфа – 78 см. Торфяно-глеевые мерзлотные почвы в сравнении с автоморфными профилями характеризуются более холодным температурным режимом и, соответственно, меньшей глубиной сезонного протаивания в регионе [Мажитова, 2008; Каверин и др., 2014].

Меньшие осредненные коэффициенты корреляции ( $r = -0.2 \pm 0.2$ ) характерны для таких факторов, как абсолютная высота, микрорельеф и мощность мохового яруса. Влажность почвы имеет положительный средний коэффициент  $r = +0.2 \pm 0.2$ . Коэффициент корреляции, отражающий влияние снежного покрова, изменяется в широком интервале – от  $-0.3$  до  $+0.3$  со средним зна-

чением  $0.0 \pm 0.2$ . При этом отрицательные коэффициенты корреляции определяются в годы с меньшей средней по площадке мощностью снега (30–40 см). Взаимосвязи с высотой растительности также выявлено не было ( $r = 0.0 \pm 0.05$ ).

Для более корректной и точной оценки, учитывающей совместное влияние ландшафтных факторов на пространственную дифференциацию глубины сезонного протаивания, был использован мультирегрессионный анализ. Результаты анализа показали, что построенные линейные регрессионные модели по каждому году из рассмотренных являются адекватными (значения *F*-статистик лежат в диапазоне 2.56–7.04, все уровни значимости  $p < 0.05$ ) (см. табл. 3). Коэффициенты детерминации  $R^2$ , описывающие уровень объясненной изменчивости зависимого признака (глубина сезонного протаивания) от ландшафтных показателей, лежат в пределах от 37 до 59 %. Среднее значение  $R^2$  составило 50 %, что является хорошим показателем для данных, полученных в ходе полевых измерений.

Наиболее четкая зависимость проявляется между глубиной сезонного протаивания и мощностью торфяного горизонта почв (см. табл. 3). В 16 из 17 построенных GLM-моделей регрессионный коэффициент этого параметра оказался значимым ( $p < 0.05$ ). Доля объясненной вариации по данному индикатору варьирует в диапазоне 14–30 % и значительно превосходит все остальные факторы. Отсутствие значимой зависимости наблюдается только для 2014 г., когда GLM-модель показала наименьшие значения сходимости ( $F = 2.56$ ,  $p = 0.02$ ). Высокая доля значимых коэффициентов линейной регрессии в GLM-моделях отмечена для мезорельефа и влажности почвы (см. табл. 3). Для обоих факторов (предикторов) значимыми являются 5 из 17 коэффициентов. Однако доли объясненной вариации для этих признаков существенно ниже: 0–20 % для микрорельефа и 0–25 % для влажности почвы.

Следует отметить, что для таких факторов, как микрорельеф и мощность торфяного горизонта, зависимость обратная: чем больше мощность торфа и отклонение абсолютных отметок от аппроксимирующего линейного склона, тем меньше глубина сезонного протаивания почв. Влажность почвы показывает прямую зависимость от глубины СТС, что связано с повышением теплопроводности почвы при увеличении содержания в ней влаги [Ершов, 2002]. Остальные ландшафтные факторы не оказывают заметного влияния на глубину СТС, значимые величины их регрессионных коэффициентов отмечены в единичных случаях.

**Температурный режим почв и глубина сезонного протаивания.** Общий диапазон среднегодовых температур почв на глубинах 0, 20, 50 см в исследуемых почвах составил 2.2...–3.5 °С

Таблица 3. Влияние ландшафтных факторов на глубину сезонного протаивания по результатам мультирегрессионного анализа

Параметр	1999 г.	2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.
<i>Макрорельеф</i>																	
$D_i$	6.9	6.6	0.0	6.1	4.1	2.7	6.0	4.0	<b>16.2</b>	5.7	0.6	0.1	4.3	5.2	7.0	0.5	3.0
$p_i$	0.11	0.16	0.95	0.18	0.19	0.32	0.09	0.21	<b>0.01</b>	0.14	0.61	0.87	0.16	0.15	0.10	0.73	0.31
sgn	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-
<i>Мезорельеф</i>																	
$D_i$	3.6	1.8	<b>17.8</b>	0.0	5.1	0.2	4.2	2.4	1.0	2.6	<b>19.8</b>	<b>12.5</b>	5.0	<b>20.0</b>	<b>15.9</b>	12.4	6.8
$p_i$	0.24	0.47	<b>0.02</b>	0.99	0.14	0.80	0.16	0.33	0.51	0.32	<b>0.00</b>	<b>0.03</b>	0.13	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	0.10	0.13
sgn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Мощность торфяного горизонта</i>																	
$D_i$	<b>29.6</b>	<b>28.5</b>	<b>22.1</b>	<b>30.5</b>	<b>27.9</b>	<b>29.4</b>	<b>23.0</b>	<b>26.0</b>	<b>23.6</b>	<b>14.2</b>	<b>17.4</b>	<b>30.5</b>	<b>22.0</b>	<b>22.9</b>	<b>23.3</b>	<b>17.4</b>	<b>18.7</b>
$p_i$	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.01</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.05</b>	<b>0.01</b>
sgn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Мощность мохового яруса</i>																	
$D_i$	0.9	0.0	0.4	0.8	0.0	1.3	0.4	0.2	4.0	3.2	4.0	3.3	2.5	2.3	5.3	2.1	0.2
$p_i$	0.55	1.00	0.71	0.63	0.98	0.49	0.65	0.77	0.19	0.27	0.18	0.26	0.29	0.34	0.15	0.49	0.81
sgn	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Высота растительности</i>																	
$D_i$	3.8	0.0	1.6	1.2	1.9	3.2	2.5	0.5	2.1	0.0	0.3	0.0	0.7	0.0	0.0	0.1	0.5
$p_i$	0.23	0.91	0.47	0.56	0.37	0.27	0.27	0.66	0.34	0.90	0.73	0.89	0.58	0.98	0.89	0.89	0.67
sgn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-
<i>Глубина снега</i>																	
$D_i$	n.a.	5.7	0.1	0.7	6.2	0.0	1.0	0.5	0.1	8.5	5.4	n.a.	0.0	1.6	0.4	5.3	<b>17.6</b>
$p_i$	n.a.	0.20	0.84	0.65	0.11	0.99	0.49	0.66	0.81	0.07	0.12	n.a.	1.00	0.42	0.69	0.28	<b>0.02</b>
sgn	n.a.	-	-	+	-	+	-	-	-	+	-	n.a.	+	-	-	+	+
<i>Влажность почвы</i>																	
$D_i$	0.6	n.a.	3.1	0.6	8.2	<b>13.1</b>	<b>23.1</b>	<b>22.8</b>	6.8	<b>25.1</b>	n.a.	n.a.	<b>23.0</b>	n.a.	n.a.	n.a.	0.3
$p_i$	0.63	n.a.	0.32	0.68	0.06	<b>0.03</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	0.09	<b>0.00</b>	n.a.	n.a.	<b>0.00</b>	n.a.	n.a.	n.a.	0.76
sgn	+	n.a.	+	-	+	+	+	+	+	+	n.a.	n.a.	+	n.a.	n.a.	n.a.	+
$df$	87	92	98	97	98	95	97	97	98	98	98	98	98	98	98	98	98
$R^2$	44.7	42.6	45.2	39.8	53.4	49.9	60.2	56.5	53.9	59.5	47.4	46.5	57.4	52.1	51.8	37.8	47.2
F	3.74	3.39	3.33	2.43	5.18	4.16	7.32	6.02	5.31	7.04	4.43	5.12	6.39	5.7	5.7	2.56	3.72
$p$	0	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0

Примечание.  $D_i$  – доли объясненной вариации;  $p_i$  – уровни значимости; sgn – знак коэффициента вариации глубины СТС по отношению к ландшафтным факторам;  $df$  – число степеней свободы модели (объем выборки – 1);  $R^2$  – общая доля дисперсии, объясненная GLM-моделью; F – значение критерия Фишера;  $p$  – уровень значимости модели в целом; n.a. – данные отсутствуют или их количество незначительно, параметр не включен в анализ. Жирным шрифтом выделены значимые параметры.

(табл. 4). Отрицательные среднегодовые температуры характерны преимущественно для мерзлотных почв, а положительные – для немерзлотных [Кудрявцев и др., 1981; Burn, 2004]. Положительная среднегодовая температура в верхних горизонтах почвы при отрицательной на остальных глубинах (temperature offset) является одним из признаков деградации мерзлоты [Burn, 2004]. Установлено, что в последние два десятилетия в мерзлотной почве на мониторинговой площадке произошло значительное повышение температуры почвы [Мажитова, 2008; Каверин и др., 2014]. За

период исследований климат мерзлотных почв стал намного мягче, температурные параметры приближаются к таковым тундровых длительно сезоннопромерзающих (немерзлотных) почв [Каверин, Пастухов, 2017].

Диапазон сумм отрицательных температур торфяно-глеезема мерзлотного на поверхности составил –169...–1999 °С·сут. За период наблюдений в верхней части профиля почвы произошло значительное сокращение сумм отрицательных температур (см. табл. 4). Максимальное охлаждение почвы наблюдалось в течение 1998/99 гидроло-

Таблица 4. Основные показатели температурного режима торфяно-глебезема мерзлотного на площадке CALM R2 в 1998–2015 гг.

Гидрологический год	Среднегодовая температура (°С) на глубине			Сумма отрицательных температур (°С·сут) на глубине			Сумма положительных температур (°С·сут) на глубине		
	0 см	20 см	50 см	0 см	20 см	50 см	0 см	20 см	50 см
1998/99	-3.5	-	-3.4	-1999	-	-1315	789	-	149
1999/00	-0.2	-	-	-955	-705	-	493	313	-
2000/01	-1.0	-1.8	-1.8	-872	-691	-769	622	-	100
2001/02	-	-	-1.9	-1034	-	-781	-	-	124
2002/03	-0.8	-1.9	-1.8	-1122	-1001	-861	862	315	190
2003/04	-	-	-0.6	-591	-	-370	-	-	136
2004/05	-0.6	-	-0.9	-878	-654	-529	-	-	206
2005/06	-	-0.4	-0.5	-785	-577	-470	-	443	283
2006/07	1.7	2.3	-	-340	-	-	961	-	-
2007/08	-	1.1	0.9	-	-118	-13	-	510	333
2008/09	0.9	0.2	-0.4	-394	-226	-278	721	311	122
2009/10	0.2	0.0	-0.3	-474	-253	-202	541	266	101
2010/11	1.0	0.7	0.6	-385	-206	-197	743	452	419
2011/12	2.1	1.3	1.3	-169	-57	-57	935	518	525
2012/13	1.4	0.5	0.5	-402	-241	-224	900	429	414
2013/14	1.0	0.5	0.6	-211	-88	-90	582	290	315
2014/15	2.2	1.3	0.9	-252	-109	-32	1045	563	355
Коэффициент корреляции с глубиной СТС	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.9	0.3	0.4	0.7

Примечание. Прочерк – отсутствие значений.

гического года, когда сумма отрицательных температур составила  $-3930$  °С·сут (на 29 % холоднее средней многолетней нормы за 1947–2015 гг.). Диапазон сумм положительных температур на глубине 0 см за все годы наблюдений составил 493...1045 °С·сут (см. табл. 4). На поверхности не выявлено статистически значимого тренда повышения сумм положительных температур почвы,

наиболее выраженный тренд повышения температуры ( $R^2 = 0.5$ ) отмечен только на глубине 50 см.

Таким образом, в период исследований увеличение глубины сезонного протаивания сопровождалось постепенным повышением температур почв. При этом статистически значимые коэффициенты корреляции выявлены между глубиной сезонного протаивания и такими параметрами,

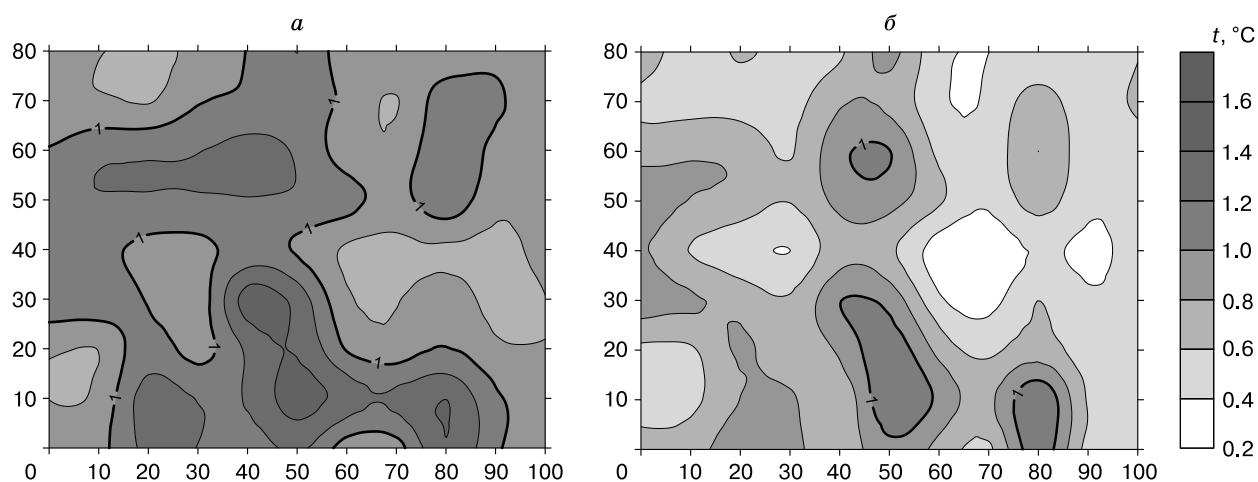


Рис. 5. Температура почвы ( $t$ ) на площадке CALM R2 (23.09.2015 г.).

$a$  – на глубине 20 см;  $b$  – на глубине 50 см.



как среднегодовая температура и суммы отрицательных температур почв (см. табл. 4). Суммы положительных температур почв оказывают значимое влияние только на глубине 50 см, что связано с близостью охлаждающего экрана ММП. В поверхностных горизонтах температурный режим почв отражает главным образом влияние температуры воздуха в течение вегетационного периода.

Разовые площадные измерения температуры почвы в сентябре 2015 г. показали пространственную дифференциацию температурного поля в пределах мониторинговой площадки (рис. 5).

Коэффициенты корреляции между пространственно неоднородными температурой почвы и глубиной протаивания составили 0.3 на глубине 20 см и 0.6 на 50 см. Более высокие температуры почв наблюдались в нижней части ложбины и вдоль центральной медианы площадки. Эти секторы площадки характеризовались меньшей мощностью торфяного горизонта почв. За период исследований здесь зафиксированы максимальные величины прироста сезонного протаивания и просадки поверхности почвы. Очевидно, что деградация близко залегающих минеральных ММП в условиях южных тундр начинается с участков, имеющих наименьшую мощность теплоизолирующего торфяного горизонта. Площадные измерения температуры тундровых мерзлотных почв в пределах первого метра позволяют выявить “высокотемпературные” зоны, характеризующиеся наибольшими многолетними величинами прироста глубины сезонного протаивания.

### ВЫВОДЫ

За период наблюдений (1999–2015) наибольшее влияние ( $p = 0.059$ ) на межгодовую вариабельность глубины сезонного протаивания оказали зимние климатические параметры, определяющие глубину и скорость промерзания почв: сумма отрицательных температур воздуха (30 % от объясненной дисперсии) и сумма осадков холодного периода (12 %).

Пространственная дифференциация глубины сезонного протаивания на локальном уровне в большей степени объясняется неоднородной мощностью торфяного горизонта почв ( $24 \pm 5$  % от объясненной дисперсии). В меньшей степени, но на статистически значимом уровне ( $p < 0.05$ ), на глубину СТС влияют микрорельеф ( $8 \pm 7$  %) и влажность почвы ( $10 \pm 7$  %). Остальные ландшафтные факторы (абсолютная высота поверхности ( $5 \pm 4$  %), мощность снега ( $4 \pm 5$  %), высота мохового ( $2 \pm 2$  %) и кустарничково-кустарникового яруса ( $1 \pm 1$  %)) оказывают незначительное влияние на пространственную дифференциацию глубины сезонного протаивания.

За период исследований климат мерзлотных почв стал значительно мягче, среднегодовая тем-

пература почвы повысилась с  $-1...-3$  °С в 1999–2000 гг. до  $+1...+2$  °С в 2014–2015 гг. Глубина сезонного протаивания значимо ( $p < 0.05$ ) коррелирует с изменением сумм отрицательных температур и среднегодовой температурой почв ( $r = 0.9 \pm 0.1$ ). Повышение зимних температур почв способствует неполному зимнему промерзанию сезонноталого слоя.

*Работа выполнена в рамках международной программы “Циркумпольный мониторинг деятельного слоя” (CALM), возглавляемой Фондом фундаментальных исследований США (NSF), грант PLR1304555 и Комплексной программы УрО РАН № 15-2-4-28 “Биогеохимические процессы как основа устойчивого функционирования почв Арктики в условиях меняющейся природной среды (на примере равнинных и горных экосистем)”.*

### Литература

- Анисимов О.А., Белолуцкая М.А., Лобанов В.А.** Современные изменения климата и природной среды в области высоких широт Северного полушария // *Метеорология и гидрология*, 2003, № 1, с. 18–30.
- Anisimov, O.A., Belolutskaia, M.A., Lobanov, V.A., 2003. Contemporary climate and environment changes in the Northern Hemisphere high latitudes. *Metereologia i gidrologia*, No. 1, 18–30.
- Геокриологическая карта СССР**, масштаб 1:2,5 млн / Отв. ред. Э.Д. Ершов, К.А. Кондратьева. М., Мин-во геологии СССР и МГУ, 1998, 16 с.
- Yershov, E.D., Kondratieva, A.K. (Eds.), 1998. Hydrological map of the USSR, scale 1:2.5 mln. Min. geologie SSSR and MGU, 16 pp. (in Russian)
- Геокриология СССР**. Европейская территория СССР / Ред. Э.Д. Ершов. М., Недра, 1988, 358 с.
- Yershov, E.D. (Ed.), 1988. Geocryology of the USSR. European part of the USSR. Nedra, Moscow, 358 pp. (in Russian)
- Ершов Э.Д.** Общая геокриология / Э.Д. Ершов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2002, 682 с.
- Yershov, E.D., 2002. General Geocryology. Moscow University Press, Moscow, 682 pp. (in Russian)
- Каверин Д.А., Пастухов А.В.** Особенности температурного режима сезоннопромерзающих почв тундровых ландшафтов европейского Северо-Востока России // *Бюл. Почвенного ин-та*, 2017, вып. 87, с. 3–21.
- Kaverin, D.A., Pastukhov, A.V., 2017. The specificities of the temperature regime of seasonally freezing soils of tundra landscapes of European North-East of Russia. *Byullyuten Pochvennogo Instituta*, Iss. 87, pp. 3–21.
- 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), 23–32. (in Russian)
- Карта четвертичных отложений**. Сер. Северо-Уральская. Лист Q-41-V. Масштаб 1:200 000 / Авт. В.С. Енокиан. М., Мин-во геологии и охраны недр СССР, 1959, 62 л.
- Enokyan, V.S., 1959. The Map of Quaternary deposits. North Ural series. Sheet Q-41-V. Scale 1:200 000. Min. geologii i okhrany neдр SSSR, Moscow, 62 sheets. (in Russian)

- Кононенко А.В.** Гидротермический режим таежных и тундровых почв Европейского Северо-Востока / А.В. Кононенко. Л., Наука, 1986, 145 с.  
Kononenko, A.V., 1986. Hydrothermal Regime of Taiga and Tundra Soils in the European Northeast. Nauka, Leningrad, 145 pp. (in Russian)
- Кудрявцев В.А.** Мерзлотоведение / В.А. Кудрявцев, Н.Ф. Полтев, Н.Н. Романовский и др. М., Изд-во Моск. ун-та, 1981, 240 с.  
Kudryavtsev, V.A., Poltev, N.F., Romanovsky, N.N., 1981. Permafrost Studies. Moscow University Press, 240 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 northeast European Russia. Pochvovedenie, No. 1, 54–67.
- Мажитова Г.Г., Каверин Д.А.** Динамика глубины сезонного протаивания и осадки поверхности почвы на площадке циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM) в европейской части России // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 4, с. 20–30.  
Mazhitova, G.G., Kaverin, D.A., 2007. Dynamics of seasonal thaw depth and soil surface subsidence at a circumpolar-active-layer-monitoring (CALM) site, the European North of Russia. Earth's Cryosphere, XI (4), 20–30. (in Russian)
- 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. (in Russian)
- 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.
- Павлов А.В.** Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз // Криосфера Земли, 1997, т. I, № 1, с. 47–58.  
Pavlov, A.V., 1997. Permafrost and climate monitoring in Russia: methodology, observation results, forecast. Earth's Cryosphere, I (1), 47–58. (in Russian)
- Шерстюков А.Б.** Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 1, с. 79–87.  
Sherstyukov, A.B., 2008. Correlation of soil temperature with air temperature and snow cover depth. Earth's Cryosphere, XII (1), 79–87. (in Russian)
- Шитиков В.К.** Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R / В.К. Шитиков, Г.С. Розенберг. Тольятти, Кассандра, 2013, 314 с.  
Shitikov, V.K., Rosenberg, G.S., 2013. Randomization and Bootstrap: Statistical Analysis in Biology and Ecology, Using R. Kassandra, Tolyatti, 314 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.
- 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.
- Dobson, A.J.** An Introduction to Generalized Linear Models. Chapman & Hall/CRC Texts in Statistical Science. 2 ed., CRC press, Boca Raton, USA, 2002, 125 p.
- GTN-P, 2016.** Global Terrestrial Network for Permafrost Database: Active Layer Thickness Data (CALM – Circumpolar Active Layer Monitoring). Akureyri, Iceland. – URL: <http://gtnpdatabase.org/activelayers/view/25/> (дата обращения: 10.09.2016).
- IUSS Working Group WRB.** World reference base for soil resources. 3 ed. World Soil Resources Rep. No. 106. FAO, Rome, 2014, 145 p.
- 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.
- Mazhitova, G., Malkova, G., Chestnykh, O., et al.** Active layer spatial and temporal variability at European Russian Circumpolar-Active-Layer-Monitoring (CALM) sites // Permafrost and Periglacial Processes, 2004a, No. 15, p. 123–139.
- Mazhitova, G., Karstkarel, N., Oberman, N., et al.** Permafrost and infrastructure in the Usa basin (Northeast European Russia): Possible impacts of Global Warming // Ambio, 2004b, vol. 33, No. 6, p. 289–294.
- Oberman, N.G., Mazhitova, G.G.** Permafrost dynamics in the north-east of European Russia at the end of the 20th century // Norsk Geografisk Tidsskrift–Norwegian J. Geography, 2001, vol. 55, No. 4, p. 241–244.

Поступила в редакцию  
6 октября 2016 г.