

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОСФЕРЕ

УДК 551.341

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-5(20-29)

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТРАСТОВ ТЕМПЕРАТУРЫ
НА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ТУНДРОВОГО НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

С.Г. Корниенко

Институт проблем нефти и газа РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 3, Россия; spaceakm2@ogri.ru

Приведены результаты моделирования контрастов температуры на поверхности одно- и многослойных колонок с образцами грунта, субстрата и тундрового напочвенного покрова с использованием установки открытого типа, имитирующей температурные проявления неоднородных геокриологических условий. Определены количественные показатели, характеризующие степень ослабления температурных контрастов в грунте лишайниковым покровом разной толщины. Максимальные (дневные) и минимальные (ночные) значения контрастов температуры на поверхности образцов не существенно отличаются от среднесуточных значений, что свидетельствует о возможности изучения природы температурных аномалий на поверхности тундрового напочвенного покрова, связанных с геокриологическими неоднородностями, по одномоментным измерениям температуры на его поверхности в разное время суток. Показана возможность использования установки для характеристики теплофизических свойств образцов грунта и напочвенного покрова, а также для изучения и моделирования фазовых переходов.

Геокриологические неоднородности, грунт, контрасты температуры, напочвенный покров, тундра, физическое моделирование

PHYSICAL MODELING OF SURFACE TEMPERATURE CONTRASTS
ON SAMPLES OF TUNDRA SOIL COVER

S.G. Kornienko

Oil and Gas Research Institute, RAS, 3, Gubkina str., Moscow, 119333, Russia; spaceakm2@ogri.ru

The results of modeling temperature contrasts on the surface of single-layer and multi-layer columns containing samples of ground, substrate and tundra soil cover using an open-type simulation setup are provided, in which the temperature differences of varying permafrost conditions are simulated. Quantitative indicators of the extent of attenuation of temperature variations in the ground by lichen cover of different thickness are evaluated. Maximum (daytime) and minimum (night) values of the temperature on the surface of the samples do not differ significantly from the average values, indicating the possibility of investigating the nature of temperature anomalies on the surface of the tundra soil cover related to permafrost heterogeneity by simultaneous measurements of the soil surface temperature at any time of the day. The possibility of using the setup to characterize the thermophysical properties of soil samples and of the soil cover, as well as to study and simulate phase transitions of water, is demonstrated.

Permafrost heterogeneity, ground, temperature variations, soil cover, tundra, physical modeling

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в зарубежных исследованиях стали более широко использоваться данные инфракрасного теплового дистанционного зондирования (ТДЗ) для характеристики многолетнемерзлых пород (ММП) [Leschack et al., 1973; Morrissey et al., 1986; Hachem et al., 2009; Langer et al., 2010; Muster et al., 2015; Ran et al., 2015; Westermann et al., 2015]. Разработка методик и накопление опыта в этом направлении мотивированы принципиальной возможностью построения картографических моделей состояния и динамики криогенных ландшафтов, а также изучения геокриологических неоднородностей по температуре

поверхности, рассчитанной на основе данных ТДЗ. Под геокриологическими неоднородностями в данном случае понимаются любые различия свойств и параметров ММП ниже активного слоя, в том числе различия температуры на глубине нулевых теплооборотов, льдистости, теплофизических свойств мерзлых грунтов, наличие криопэгов, которые в совокупности могут влиять на распределение температуры поверхности грунта.

В большинстве случаев под температурой поверхности грунта и почвы понимается температура на незначительном заглублении (2–10 см) открытого грунта или под растительным и напоч-

венным покровом (НП), к которому относят мхи, лишайники, низкорослые дерново-кустарничковые и травяные виды, дерн, торф. Температура поверхности грунтов и почвы считается достаточно информативным параметром для характеристики и моделирования параметров ММП [Бобрик и др., 2015; Nelson et al., 1985; Heggem et al., 2006; Throop et al., 2012], в отличие от температуры поверхности НП. Это связано с тем, что сама поверхность находится в области наиболее интенсивных периодических и спорадических теплообменных процессов, к числу которых относят адвективный теплоперенос в приповерхностном воздушном слое, а также эвапотранспирацию. Тем не менее в работах [Hachem et al., 2009; Ran et al., 2015; Westermann et al., 2015] показана возможность построения мелкомасштабных карт среднегодовой температуры ММП и границ распространения ММП по данным реанализа и среднегодовым значениям температуры поверхности, рассчитанным на основе данных ТДЗ.

Другой подход основан на оценке различий (контрастов) температуры поверхности участков с равной тепловой инерцией слоя суточных колебаний температуры (СКТ) в период летнего растепления [Корниенко, 2012]. Влияние адвективного теплопереноса может быть учтено при повторных съемках, а такие взаимосвязанные параметры, как интенсивность эвапотранспирации, тепловая инерция и влажность НП, субстрата и грунта, могут определяться на основе альбедо, спектральных индексов и данных ТДЗ [Sandholt et al., 2002; García et al., 2013; Girolimetto, Venturini, 2013; Minacapilli et al., 2016]. В то же время немаловажным остается вопрос о возможности использования температуры поверхности тундрового НП, так же как и температуры поверхности грунта (почвы), для характеристики геофизиологических неоднородностей.

В целом пока отмечаются недостаточное количество экспериментальных работ по этому направлению и слабая изученность процессов формирования теплового режима и температуры на поверхности тундрового НП, в том числе при разных геофизиологических условиях. Цель работы – моделирование контрастов температуры на поверхности образцов тундрового НП и грунта с использованием установки, имитирующей температурные проявления геофизиологических неоднородностей.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКА ОБРАЗЦОВ НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Вариации температурного поля земной поверхности имеют суточную и годовую периодичность и при отсутствии снежного покрова и про-

цессов кристаллизации почвенной влаги приближенно могут быть описаны выражением [Павлов, 1975]:

$$T_{\text{п}}(\tau) = T_0 + \sum_{i=1}^N a_i \cos\left(\frac{2\pi}{t_i}\tau - \varphi_i\right), \quad (1)$$

где T_0 – среднегодовая температура поверхности; a_i – амплитуда колебаний температуры отдельной гармоники на поверхности; t_i – период колебаний; τ – время; φ_i – начальная фаза колебаний; N – число гармоник; i – номер гармоники. Величина T_0 зависит от температуры ММП на глубине нулевых теплооборотов, а амплитуды СКТ и годовых колебаний температуры (ГКТ) поверхности зависят от теплофизических свойств соответствующих слоев СКТ и ГКТ. Для тундровых районов мощность слоя СКТ составляет 0.4–1.0 м, а мощность слоя ГКТ – 10–15 м.

Из уравнения (1) следует, что теоретически при равных условиях инсоляции, скорости ветра, температуры и влажности воздуха на участках с равными теплофизическими свойствами слоя СКТ разница температуры на их поверхности $T_{\text{п}}(\tau)$ может нести информацию о различиях температуры ММП и теплофизических свойств слоя ГКТ, связанных с геофизиологическими неоднородностями. Вклад последних в результирующее температурное поле на поверхности не превышает нескольких градусов [Корниенко, Разумов, 2009; Leschack et al., 1973]. В физической модели существует возможность “включения” и “отключения” температурных проявлений, имитирующих влияние геофизиологических неоднородностей, что позволяет оценить их вклад на фоне других факторов формирования теплового режима НП.

Моделирование сходных температурных проявлений (контрастов температуры) предполагалось проводить на одно- и многослойных колонках, включающих образцы тундрового НП, субстрата и грунта. Под контрастом температуры в данном случае понимается разность температуры между двумя колонками на их нижней границе ($\Delta T_{\text{нр}}$), на поверхности ($\Delta T_{\text{п}}$) и в воздухе ($\Delta T_{\text{в}}$) над поверхностью. Схема установки близка по конструкции к известным устройствам для определения теплофизических характеристик образцов почвы, грунта и снега методом стационарного теплового воздействия [Методы..., 2004; Бровка и др., 2016; Riche, Schneebeli, 2013]. Отличительная особенность предлагаемой установки – использование двух одинаковых открытых сверху контейнеров (рис. 1) с колонками, что позволяет определять контрасты температуры в естественных условиях суточных и метеорологических колебаний влажности и температуры воздуха.

Размеры внутренней части каждого контейнера 25 × 25 × 32 см, дно контейнеров выполнено из

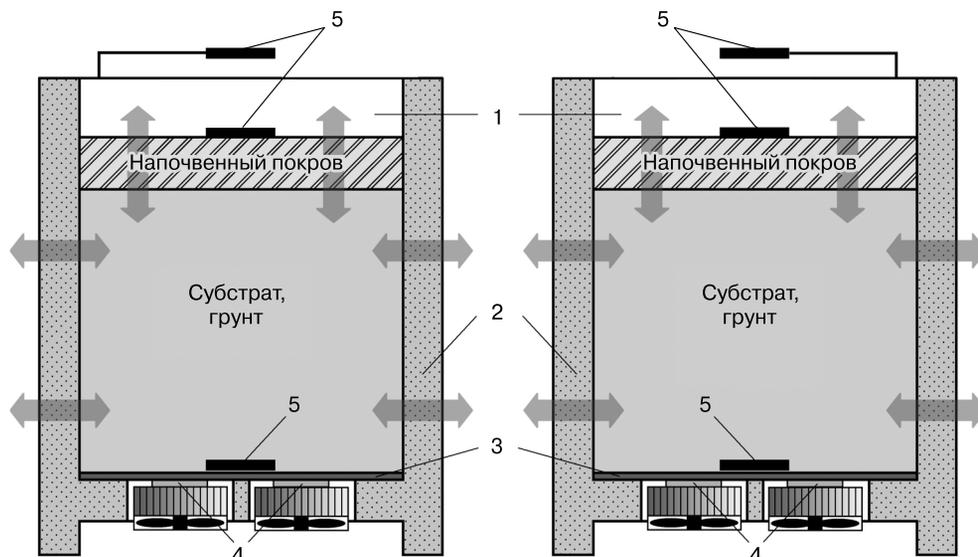


Рис. 1. Схема установки для моделирования контрастов температуры на поверхности образцов тундрового напочвенного покрова.

1 – внешние стенки контейнеров; 2 – теплоизоляция стенок контейнеров; 3 – дюралюминиевые листы; 4 – элементы Пельтье с радиаторами и вентиляторами охлаждения; 5 – температурные датчики (логгеры).

дюралюминиевой пластины толщиной 2 мм, стенки и дно контейнеров внутри выложены теплоизолирующими листами из пенополиуретана толщиной 3 см. На внешней стороне дюралюминиевой пластины размещены два полупроводниковых элемента Пельтье, обеспечивающих снижение или повышение температуры в нижней части контейнера до 16 °С относительно температуры окружающей среды. Для поддержания одинаковых условий теплообмена стенок контейнеров с окружающей средой контейнеры устанавливались на ножках на высоту 25 см от пола. Температурные датчики (логгеры) располагались у дна контейнеров, на поверхности колонок и выше на расстоянии 5 см над поверхностью для контроля темпера-

туры воздуха. В установке использовались спаренные температурные логгеры НОВО U23-003 (OnSet, США) с точностью измерения 0.2 °С. Датчики температуры располагались по центральной вертикальной оси контейнеров.

В процессе эксперимента поочередно охлаждается или нагревается снизу один из контейнеров, что приводит к возникновению контраста температуры между колонками, в том числе на их поверхности. Охлаждение (нагрев) колонок поддерживается на постоянном уровне в течение нескольких дней, создавая дополнительную постоянную составляющую к сезонным, суточным и метеорологическим колебаниям температуры. Поскольку теплоизоляция стенок контейнеров не идеальна, для достижения контрастов температуры на поверхности колонок $\Delta T_{\text{п}} = 1-2$ °С контрасты $\Delta T_{\text{нг}}$ устанавливались в диапазоне 9–16 °С.

В табл. 1 приведены характеристики образцов тундрового НП, субстрата и грунта, составляющих пять исследуемых колонок, поочередно помещаемых в контейнеры. Образцы покрова с собственным субстратом были взяты в районе Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения.

На рис. 2 даны фотографии колонок К1 и К2 при снятых боковых стенках контейнеров, указаны толщины покрова. Колонку К1 составляет достаточно мощный слой мха с собственным суглинистым субстратом. У образца лишайникового НП в колонке К2 толщина собственного супесча-

Таблица 1. Характеристики образцов напочвенного покрова, субстрата и грунта в колонках

Колонка	Состав образцов в колонке	Толщина, см
К1	Мох “кукушкин лен” (<i>Polytrichum commune</i>) с включением травянистой растительности	20
	Суглинистый субстрат	5
К2	Лишайник (<i>Cladonia arbuscula</i>)	7
	Садовый (торфяной) грунт	18
К3	Садовый (торфяной) грунт	25
К4	Мох “кукушкин лен” (<i>Polytrichum commune</i>)	11
	Садовый (торфяной) грунт	20
К5	Мох “кукушкин лен” (<i>Polytrichum commune</i>)	12
	Садовый (торфяной) грунт	18

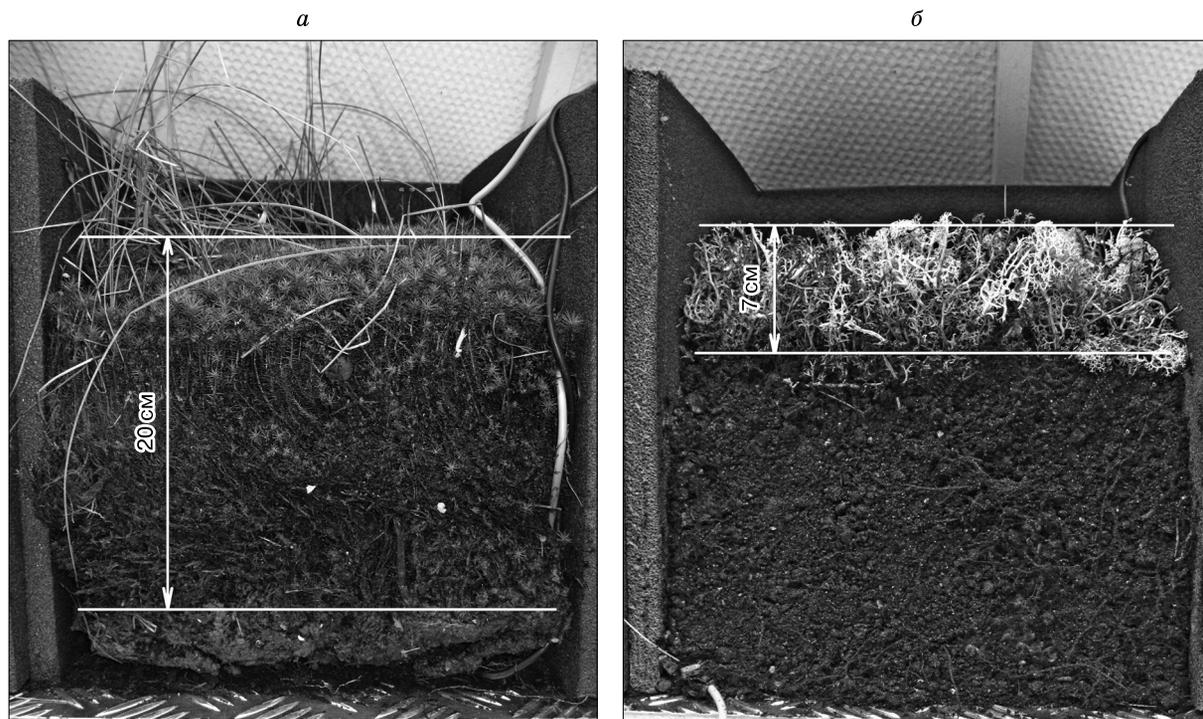


Рис. 2. Вид сбоку контейнеров с колонками К1 (а) и К2 (б) и образцами напочвенного покрова.

ного субстрата не превышала 1 см. Колонка К3 представлена однородным садовым (торфяным) грунтом. У идентичных образцов мха в колонках К4 и К5 толщина собственного суглинистого субстрата также не превышала 1 см.

Установка размещалась вне помещений в тени на открытом воздухе, все измерения проводились в г. Москве в летне-осенние периоды 2013–2014 гг. до наступления заморозков. Во время измерений максимальная температура воздуха достигала 35 °С, минимальная равна 5 °С. В процессе эксперимента объемная влажность в колонках поддерживалась на уровне 12–14 %, для контроля влажности использовались датчики ЕС-5 (Decagon Devices Inc., США). Эксперимент состоял из трех циклов измерений, каждый из которых включал периоды поочередного охлаждения (нагрева) колонок, а также фоновые периоды без охлаждения (нагрева). Длительность циклов составляла 27, 13 и 43 сут; длительность периодов охлаждения (нагрева) колонок с образцами – от 4 до 14 сут. Регистрация значений температуры проводилась круглосуточно с интервалом 5 мин. Анализ и обработка данных осуществлялась с помощью программы НОВО Pro ВНВ, поставляемой вместе с логгерами, а также программы Excel стандартного пакета Microsoft Office.

Фоновые (аддитивные) составляющие контрастов температуры, связанные с различием теп-

лофизических свойств колонок, а также с влиянием других факторов (различия в теплоизоляции контейнеров, особенности циркуляции воздуха и т. д.), определялись по измерениям в промежутках между периодами охлаждения (нагрева). На основе этих данных для каждого цикла измерений определялись поправки, позволяющие устранить разницу между фоновыми составляющими в значения $\Delta T_{нг}$, $\Delta T_{п}$ и $\Delta T_{в}$. При обработке данных исключались дни включения и выключения охлаждения (нагрева), а также дни значительных (>10 °С) скачков среднесуточной температуры воздуха.

Связь между контрастами $\Delta T_{нг}$, $\Delta T_{п}$ и $\Delta T_{в}$ в первую очередь оценивалась по среднесуточным значениям температуры, что уменьшает влияние случайных факторов. Аналогично оценивались связи между этими параметрами по максимальным (дневным) и минимальным (ночным) значениям температуры. Для этой цели усреднялись значения температуры за каждый час и выбирались максимальные и минимальные (в сутках) значения. Поскольку интенсивность охлаждения (нагрева) в циклах не всегда была одинаковой, для сравнения влияния типов НП на контрасты $\Delta T_{п}$ использовался коэффициент передачи $G = \Delta T_{п} / \Delta T_{нг}$. Значения контрастов температуры всегда определялись как разность температур между (условно) первым и вторым контейнером.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ КОНТРАСТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБРАЗЦОВ ГРУНТА И НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

На рис. 3 приведены двухсуточные термограммы колонки К2 в фоновый период и период охлаждения на нижней границе. Измерения представлены с осреднением в 1 ч и относятся ко второму циклу наблюдений, проводимому в октябре 2013 г. При сравнении термограмм видно, что при охлаждении температура поверхности образца НП заметно снижается относительно температуры воздуха.

На рис. 4 приведены кривые, характеризующие изменение среднесуточных контрастов температуры в первом цикле наблюдений при охлаждении колонки К3 (грунт, зона А) и колонки К1 (мох, зона Б). Колонка К3 размещалась во втором контейнере, поэтому контрасты температуры на нижней границе и поверхности колонки К3 даны с положительным знаком. Здесь и далее результаты измерений даны с поправками на разницу фоновых составляющих контрастов температуры. На рис. 4 видно, что контраст $\Delta T_{\text{п}}$ явно зависит от $\Delta T_{\text{нг}}$ и не связан с $\Delta T_{\text{в}}$, значения которого близки к нулю. Причем для колонки К3 с однородным грунтом при меньших значениях $\Delta T_{\text{нг}}$ (зона А) отмечаются

более высокие значения $\Delta T_{\text{п}}$ по сравнению с колонкой К1 (зона Б) состоящей в основном из мха.

Для той же пары колонок рассматривались статистические связи между среднесуточными значениями $\Delta T_{\text{п}}$ и $\Delta T_{\text{нг}}$ (рис. 5, а) и между $\Delta T_{\text{в}}$ и $\Delta T_{\text{п}}$ (рис. 5, б). Здесь наличие связи $\Delta T_{\text{п}}$ и $\Delta T_{\text{нг}}$ подтверждается достаточно высоким значением индекса корреляции ($R = 0.957$), а разница в интенсивности проявления контрастов температуры на поверхности грунта (А) и мха (Б) характеризуется разным наклоном участков аппроксимирующей функции (см. рис. 5, а). Относительно невысокая корреляция ($R = 0.658$) между $\Delta T_{\text{в}}$ и $\Delta T_{\text{п}}$ (см. рис. 5, б) и на порядок более низкий разброс значений $\Delta T_{\text{в}}$ по сравнению с $\Delta T_{\text{п}}$ свидетельствуют об отсутствии влияния температуры воздуха на температуру поверхности и о возможном влиянии температуры поверхности (охлаждаемой снизу) на температуру воздуха у поверхности.

Во втором цикле измерений в первом контейнере оставалась колонка К1, а колонка К3 заменялась на колонку К2 с тем же грунтом и лишайниковым НП. Сочетание колонок второго цикла показано на рис. 2. Вначале искусственно нагревалась колонка К1 (зона А), а затем, после фонового периода, охлаждалась колонка К2 (зона Б, рис. 6, а). Здесь, так же как и в предыдущем при-

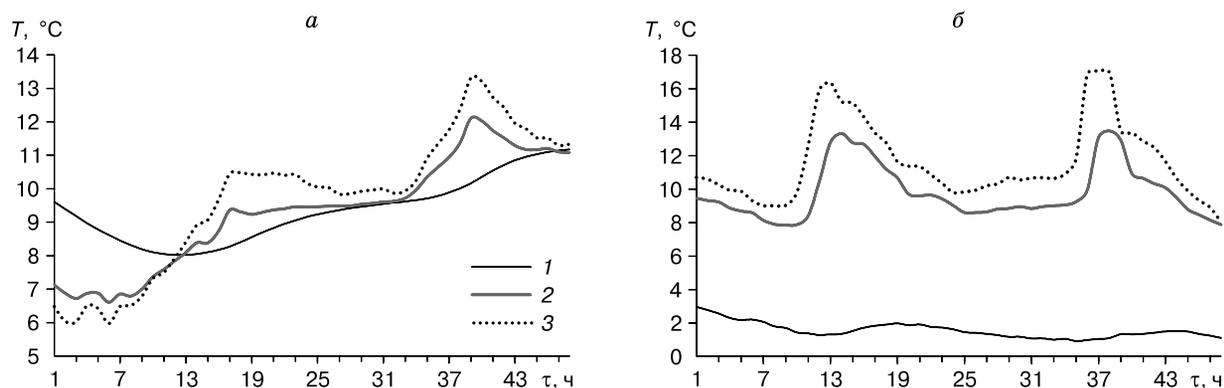


Рис. 3. Термограммы колонки К2 в фоновый период (а) и период искусственного охлаждения снизу (б). 1 – температура на нижней границе; 2 – температура на поверхности образца НП; 3 – температура воздуха над образцом НП.

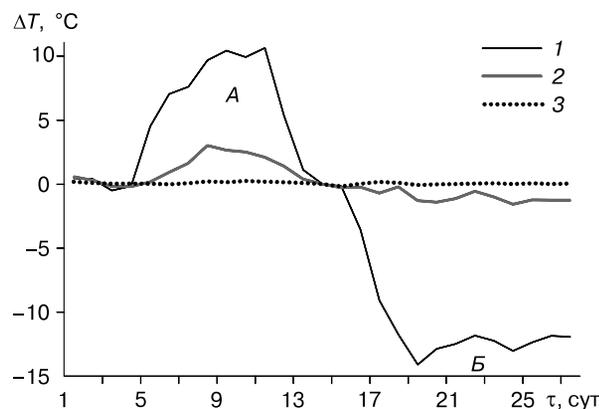


Рис. 4. Изменение среднесуточных значений контрастов температуры при охлаждении колонок К3 (А) и К1 (Б) в первом цикле измерений.

1 – $\Delta T_{\text{нг}}$; 2 – $\Delta T_{\text{п}}$; 3 – $\Delta T_{\text{в}}$.

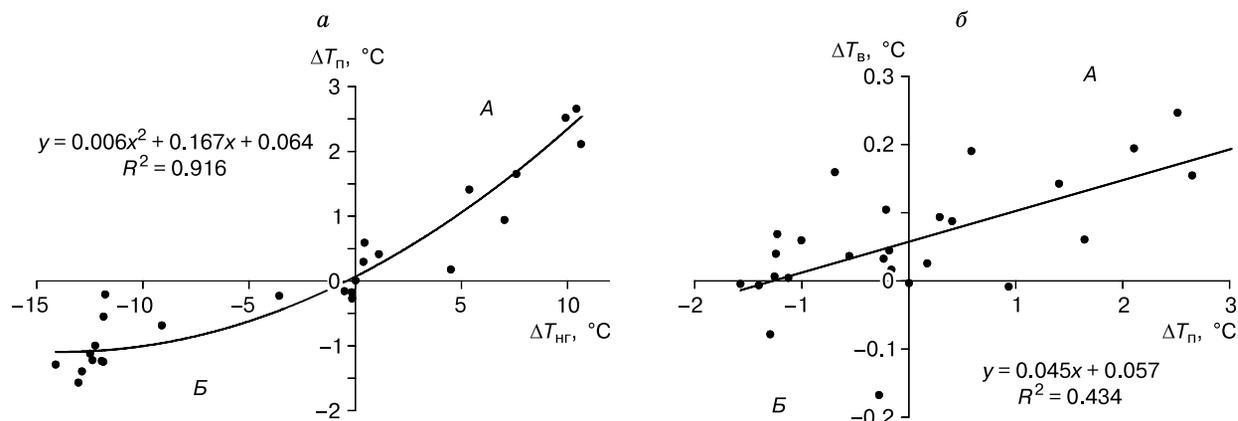


Рис. 5. Связь среднесуточных значений $\Delta T_{\text{п}}$ и $\Delta T_{\text{нр}}$ (а), $\Delta T_{\text{в}}$ и $\Delta T_{\text{п}}$ (б) при охлаждении колонок К3 (А) и К1 (Б).

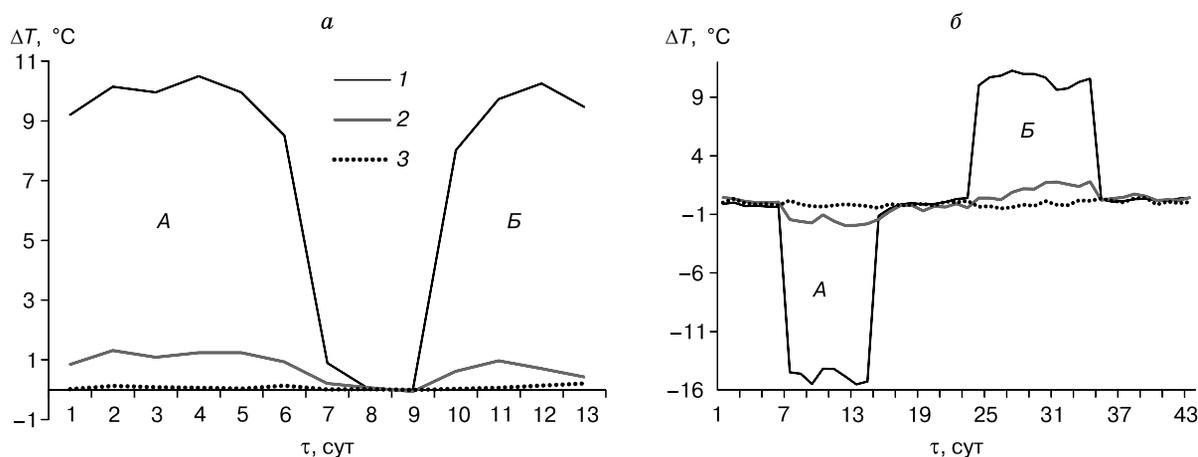


Рис. 6. Изменение среднесуточных значений контрастов температуры при нагреве колонки К1 (А) и охлаждении колонки К2 (Б) во втором цикле (а) измерений и при охлаждении колонок К4 (А) и К5 (Б) в третьем цикле (б).

1 – $\Delta T_{\text{нр}}$; 2 – $\Delta T_{\text{п}}$; 3 – $\Delta T_{\text{в}}$.

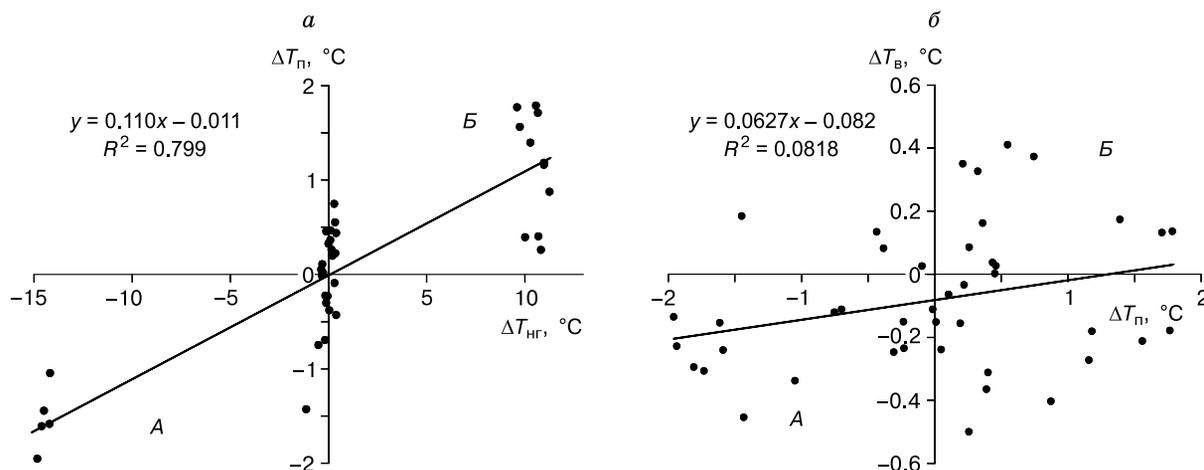


Рис. 7. Связь среднесуточных значений $\Delta T_{\text{п}}$ и $\Delta T_{\text{нр}}$ (а), $\Delta T_{\text{в}}$ и $\Delta T_{\text{п}}$ (б) при охлаждении колонок К4 (А) и К5 (Б).

Таблица 2. Значения контрастов среднесуточной, максимальной, минимальной температуры и коэффициента передачи (G) при охлаждении (охл.) и нагреве колонок

Цикл	Колонка	$\Delta T_{\text{нр}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	$G = \Delta T_{\text{п}}/\Delta T_{\text{нр}}$
1	K1 (охл., ср.сут.)	-11.42	-0.98	0.086
	K1 (охл., макс.)	-12.99	-1.08	0.083
	K1 (охл., мин.)	-12.55	-1.16	0.092
	K3 (охл., ср.сут.)	9.22	2.14	0.232
	K3 (охл., макс.)	9.27	2.08	0.224
	K3 (охл., мин.)	8.65	1.81	0.209
2	K1 (нагрев, ср.сут.)	9.71	1.10	0.113
	K1 (нагрев, макс.)	10.44	1.27	0.121
	K1 (нагрев, мин.)	9.18	0.98	0.107
	K2 (охл., ср.сут.)	9.80	0.97	0.099
	K2 (охл., макс.)	9.52	0.98	0.103
	K2 (охл., мин.)	9.20	0.99	0.107
3	K4 (охл., ср.сут.)	-15.77	-1.66	0.105
	K4 (охл., макс.)	-15.44	-1.39	0.090
	K4 (охл., мин.)	-16.19	-1.51	0.093
	K5 (охл., ср.сут.)	10.88	1.27	0.116
	K5 (охл., макс.)	10.33	1.33	0.128
	K5 (охл., мин.)	11.60	1.63	0.140

мере, $\Delta T_{\text{п}}$ явно зависит от $\Delta T_{\text{нр}}$. Достаточно высокий коэффициент корреляции между $\Delta T_{\text{п}}$ и $\Delta T_{\text{нр}}$ ($R = 0.867$) значим при $p < 0.05$, в то время как для параметров $\Delta T_{\text{в}}$ и $\Delta T_{\text{п}}$ его относительно низкое значение ($R = 0.302$) не является значимым при этой же величине p .

В третьем, наиболее продолжительном цикле измерений охлаждались колонки K4 (зона А) и K5 (зона Б, см. рис. 6, б) с идентичным составом грунта и НП. Результаты в целом аналогичны результатам измерений в первых двух циклах. Статистические связи между среднесуточными значениями $\Delta T_{\text{п}}$ и $\Delta T_{\text{нр}}$, $\Delta T_{\text{в}}$ и $\Delta T_{\text{п}}$ для этой пары колонок приведены на рис. 7. Коэффициент корреляции $R = 0.894$ между $\Delta T_{\text{п}}$ и $\Delta T_{\text{нр}}$ (см. рис. 7, а) значим при $p < 0.05$. Значения $\Delta T_{\text{п}}$ и $\Delta T_{\text{нр}}$ здесь группируются в три кластера, соответствующих периодам охлаждения колонок K4 (А) и K5 (Б), а также фоновому периоду с близкими к нулю значениями $\Delta T_{\text{нр}}$. Связь между $\Delta T_{\text{в}}$ и $\Delta T_{\text{п}}$ ($R = 0.286$) здесь также практически отсутствует (см. рис. 7, б).

В табл. 2 приведены усредненные за периоды охлаждения (нагрева) значения контрастов среднесуточной, максимальной и минимальной (в сутках) температуры на нижней границе и на поверхности колонок, а также соответствующие значения коэффициента передачи G .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования установки с двумя

попеременно охлаждаемыми (нагреваемыми) контейнерами с образцами грунта и тундрового НП для оценки связи температуры на поверхности колонок с температурой на их нижней границе. Достаточно высокая корреляция значений $\Delta T_{\text{п}}$ и $\Delta T_{\text{нр}}$ и относительно низкая корреляция $\Delta T_{\text{в}}$ и $\Delta T_{\text{п}}$ по всем циклам наблюдений однозначно свидетельствуют о зависимости $\Delta T_{\text{п}}$ от $\Delta T_{\text{нр}}$. Из табл. 2 следует, что коэффициенты передачи G , по сути, характеризующие теплофизические свойства колонок, могут различаться в 2–3 раза. Наиболее высокие значения G относятся к колонке K3 с садовым грунтом без НП, что ожидаемо, учитывая его более высокие значения коэффициента теплопроводности по сравнению с образцами НП. У колонки K2 с тем же грунтом, но с лишайниковым покровом, коэффициент G приблизительно в 2 раза меньше, чем у колонки K3.

Для колонок K1, K4 и K5 с образцами мохового покрова значения G различаются не столь существенно. При нагреве колонки K1 значение G приблизительно на 30 % выше, чем при ее охлаждении, что может быть связано с ростом доли конвективной составляющей теплообмена в мощном слое мха при нагреве снизу. В то же время коэффициент G колонки K1 (при охлаждении) несколько ниже, чем у колонок K4 и K5 с таким же покровом, что может быть связано с меньшей толщиной образцов мха колонок K4 и K5.

Поскольку условия эксперимента имитируют процесс стационарного теплопереноса, на основе простых уравнений можно приближенно рассчитать контрасты температуры на любом расстоянии от дна до поверхности колонки K3 с грунтом, а также в колонке K2 под лишайниковым НП с таким же грунтом, учитывая одинаковую высоту колонок и допуская равенство коэффициентов теплопроводности грунта в колонках. В фоновые периоды температура воздуха вокруг контейнеров приблизительно одинаковая, поэтому среднесуточные значения температуры на нижней границе и поверхности колонок различаются несущественно. Поэтому можно допустить, что среднесуточные значения тепловых потоков и градиентов температуры в колонках в фоновые периоды равны нулю. Тогда предполагаем, что в периоды охлаждения (нагрева) градиенты температуры в колонках будут зависеть только от величины создаваемого контраста температуры на нижней границе. Градиент температуры в колонке с грунтом K3 ($T_{\text{гр},\text{K3}}$) определяется по формуле

$$\text{grad}(T_{\text{гр},\text{K3}}) = \frac{\Delta T_{\text{нр},\text{K3}} - \Delta T_{\text{п},\text{K3}}}{L}, \quad (2)$$

где $\Delta T_{\text{нр},\text{K3}}$, $\Delta T_{\text{п},\text{K3}}$ – среднесуточные значения контрастов температуры на нижней границе и на поверхности открытого грунта колонки K3 соответственно (см. табл. 2); L – толщина (высота) колонок

К3 и К2 (см. табл. 1). Поскольку в данном случае градиент температуры зависит только от контраста температуры на нижней границе, градиент температуры в грунте в колонке К2 ($T_{гр,К2}$) можно рассчитать по формуле

$$\text{grad}(T_{гр,К2}) = \text{grad}(T_{гр,К3}) \frac{\Delta T_{нг,К2}}{\Delta T_{нг,К3}},$$

где $\Delta T_{нг,К2}$ – среднесуточное значение контраста температуры на нижней границе колонки К2 (см. табл. 2). Контраст температуры в колонке К2 на границе между грунтом и НП ($\Delta T_{гнп,К2}$) определяется по формуле

$$\Delta T_{гнп,К2} = \Delta T_{нг,К2} - \text{grad}(\Delta T_{гр,К2}) \cdot (L - d), \quad (3)$$

где d – толщина НП в колонке К2 (см. табл. 1). В данном случае расчетное значение контраста температуры на границе между грунтом и НП в колонке К2 (при $d = 7$ см) составило 4.38 °С. Величина градиента температуры в НП колонки К2 рассчитывалась аналогично (2) по значениям $\Delta T_{гнп,К2}$ и $\Delta T_{п,К2}$ (см. табл. 2):

$$\text{grad}(T_{гнп,К2}) = \frac{\Delta T_{гнп,К2} - \Delta T_{п,К2}}{d}.$$

Отношение градиентов температуры в НП и грунте колонки К2 показывает, что коэффициент теплопроводности грунта в 1.61 раза больше, чем у НП. Контрасты температуры поверхности НП колонки К2 для $d = 0-7$ см рассчитывались по формуле

$$\Delta T_{п,К2}(d) = \left[\Delta T_{нг,К2} - \text{grad}(T_{гр,К2}) \cdot (L - d) \right] - \text{grad}(T_{гнп,К2}) \cdot d.$$

Степень ослабления контраста температуры слоем НП в колонке К2 может быть выражена в виде коэффициента $E = \Delta T_{гнп,К2} / \Delta T_{п,К2}(d)$. Зависимость коэффициента E от d приведена на рис. 8.

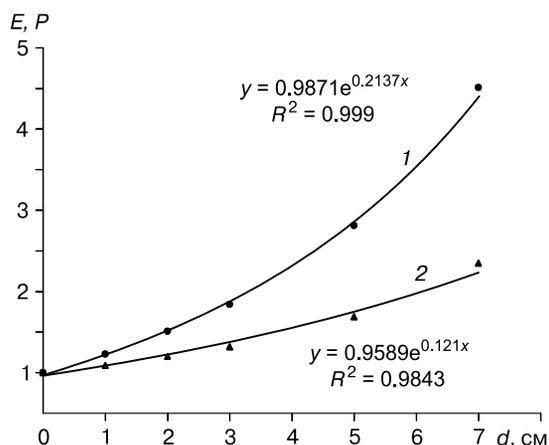


Рис. 8. Зависимость коэффициентов E (кривая 1) и P (кривая 2) ослабления контрастов температуры от толщины d лишайникового покрова.

Согласно (3), при $d = 0$ (т. е. в гипотетическом случае, когда колонка К2 целиком состоит из грунта) контраст температуры на поверхности $\Delta T_{нг,К2} = 2.28$ °С. При том же контрасте температуры на нижней границе и той же общей толщине колонки измеренное среднее значение контраста на поверхности лишайникового НП ($\Delta T_{п,К2}$) составило 0.97 °С (см. табл. 2). Отношение этих параметров может быть выражено коэффициентом $P = \Delta T_{п,К2} / \Delta T_{нг,К2}(d)$. При постоянном значении $\Delta T_{нг,К2} = 2.28$ °С зависимость коэффициента P от d также приведена на рис. 8. Коэффициент P показывает, во сколько раз, в зависимости от толщины НП, могут отличаться контрасты температуры на его поверхности от контрастов на поверхности открытого грунта при одинаковых контрастах на нижней границе равных по толщине (высоте) колонок.

Для каждой из колонок среднесуточные, максимальные и минимальные (в сутках) значения коэффициента G различаются незначительно (см. табл. 2) и не нарушают общей картины связи температурных контрастов с типом колонки. Все вышесказанное справедливо в отношении результатов одномоментных измерений в любое время суток.

При незначительной доработке описанная установка может применяться для определения эффективных значений коэффициентов теплопроводности одно- и многослойных колонок с образцами плотного и сыпучего грунта, субстрата и тундрового НП в любом их сочетании, в том числе в зависимости от их собственной влажности и влажности воздуха. Установка также может быть использована для изучения и моделирования фазовых переходов в грунтах и субстратах при различной их влажности и солености. На рис. 9 приведены кривые хода температуры (осреднение 1 ч)

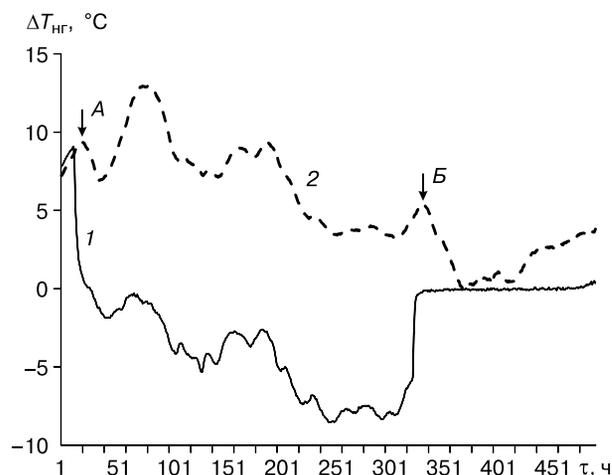


Рис. 9. Ход температуры на нижней границе ($T_{нг}$) колонок К1 (кривая 1) и К3 (кривая 2) с периодом фазового перехода в колонке К1.

на нижней границе охлаждаемой колонки К1 и колонки К3. Стрелками обозначены моменты включения (А) и отключения (Б) охлаждения. В начале промерзания (момент А) при переходе температуры через 0 °С признаков фазового перехода не отмечается, что связано с относительно низкой влажностью грунта в период охлаждения. После отключения охлаждения и полива обеих колонок (момент Б) зарегистрировано состояние пятисуточного фазового перехода в колонке К1.

В целом полученные результаты могут быть приняты во внимание при изучении природы температурных аномалий на поверхности тундрового напочвенного покрова, связанных с геокриологическими неоднородностями.

ВЫВОДЫ

Разработана и опробована установка открытого типа с двумя охлаждаемыми (нагреваемыми) контейнерами с образцами грунта, субстрата и тундрового напочвенного покрова, позволяющая имитировать на их поверхности температурные контрасты, обусловленные геокриологическими неоднородностями.

По значениям контрастов температуры на границе грунта и лишайникового напочвенного покрова, на поверхности открытого грунта и поверхности покрова определены зависимости, характеризующие степень ослабления температурных контрастов в грунте покровом разной толщины.

Максимальные (дневные) и минимальные (ночные) значения контрастов температуры на поверхности образцов не существенно отличаются от среднесуточных значений, что свидетельствует о возможности изучения природы температурных аномалий на поверхности тундрового напочвенного покрова, в том числе связанных с геокриологическими неоднородностями, по одномоментным измерениям контрастов температуры поверхности покрова в разное время суток.

Установка может применяться для определения эффективных значений коэффициентов теплопроводности одно- и многослойных колонок с образцами плотного и сыпучего грунта, субстрата и тундрового напочвенного покрова, а также для моделирования фазовых переходов в грунтах и субстратах.

Литература

- Бобрин А.А., Гончарова О.Ю., Матышак Г.В. и др.** Взаимосвязь геокриологических условий и гидротермических параметров почв плоскобугристых торфяников севера Западной Сибири (стационар Надым) // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 4, с. 31–38.
- Bobrik, A.A., Goncharova, O.Yu., Matyshak, G.V., et al., 2015. Correlation of active layer thickness and landscape parameters of peatlands in the northern West Siberia (Nadym station). *Earth's Cryosphere* XIX (4), 29–35.
- Бровка Г.П., Агутин К.А., Бровка А.Г. и др.** Комплекс методов экспериментального исследования процессов теплопереноса и пучения в промерзающих грунтах и горных породах // Материалы Пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Универ. книга, 2016, с. 11–17.
- Brovka, G.P., Agutin, K.A., Brovka, A.G., et al., 2016. A complex of methods of experimental study of the processes of heat and mass conduction and soil bulging in freezing soils and alpine rocks, in: *Proceedings of the Fifth Conference of Permafrost Scientists of Russia*. (Moscow, June 14–17, 2016). *Universitetskaya Kniga*, Moscow, pp. 11–17.
- Корниенко С.Г.** Методика оценки льдистости мерзлых грунтов по данным дистанционного зондирования в видимом и инфракрасном диапазоне // Исслед. Земли из космоса, 2012, № 5, с. 75–84.
- Kornienko, S.G., 2012. Evaluation method of the permafrost soil ice content by use of the remote sensing data in the visible and infrared range. *Issledovanie Zemli is Kosmosa*, No. 5, 75–84.
- Корниенко С.Г., Разумов С.О.** Моделирование контрастов температуры на поверхности неоднородных по льдистости грунтов // Криосфера Земли, 2009, т. XIII, № 2, с. 55–61.
- Kornienko, S.G., Razumov, S.O., 2009. Modelling of temperature contrasts on the surface of inhomogeneous ice content in the ground. *Earth's Cryosphere* XIII (2), 55–61.
- Методы геокриологических исследований: Учеб. пособие / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 512 с.**
- Ershov, E.D. (Ed.), 2004. *Methods of Geocryological Studies: a textbook*. Moscow University Press, Moscow, 512 pp. (in Russian)
- Павлов А.В.** Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск, Кн. изд-во, 1975, 304 с.
- Pavlov, A.V., 1975. *Heat Exchange between Soil and Atmosphere in Northern and Temperate Latitudes of the USSR Territory*. Publishing House, Yakutsk. 304 pp. (in Russian)
- García, M., Sandholt, I., Ceccato, P., et al.** Actual evapotranspiration in drylands derived from in-situ and satellite data: Assessing biophysical constraints // *Remote Sens. Environ.*, 2013, vol. 131, p. 103–118.
- Girolimetto, D., Venturini, V.** Water stress estimation from NDVI-Ts plot and the wet environment evapotranspiration // *Adv. Remote Sens.*, 2013, No. 2, p. 283–291.
- Hachem, S., Allard, M., Duguay, C.** Using the MODIS land surface temperature product for mapping permafrost: an application to northern Quebec and Labrador, Canada // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2009, vol. 20, p. 407–416.
- Heggem, E.S.F., Eitzelmüller, B., Anarmaa, S., et al.** Spatial distribution of ground surface temperatures and active layer depths in the Hövsgöl area, northern Mongolia // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2006, vol. 17, No. 4, p. 357–369.
- Langer, M., Westermann, S., Boike, J.** Spatial and temporal variations of summer surface temperatures of wet polygonal tundra in Siberia – implications for MODIS LST based permafrost monitoring // *Remote Sens. Environ.*, 2010, vol. 114, p. 2059–2069.
- Leschack, L., Morse, F., Brinley, W., et al.** Potential use of airborne dual-channel infrared scanning to detect massive ice in permafrost // *North American Contribution Permafrost: Second Intern. Conf. Washington, USA, 1973*, p. 542–549.
- Minacapilli, M., Consoli, S., Vanella, D., et al.** A time domain triangle method approach to estimate actual evapotranspiration: Application in a Mediterranean region using MODIS and MSG-SEVIRI products // *Remote Sens. Environ.*, 2016, vol. 174, p. 10–23.

- Morrissey, L., Strong, L., Card, D.** Mapping permafrost in the boreal forest with Thematic Mapper satellite data // *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 1986, vol. 52, No. 9, p. 1513–1520.
- Muster, S., Langer, M., Abnizova, A., et al.** Spatio-temporal sensitivity of MODIS land surface temperature anomalies indicates high potential for large-scale land cover change detection in Arctic permafrost landscapes // *Remote Sens. Environ.*, 2015, vol. 168, p. 1–12.
- Nelson, F., Outcalt, S., Goodwin, C., et al.** Diurnal thermal regime in a peat-covered tundra, Toolik lake, Alaska // *Arctic*, 1985, vol. 38, No. 4, p. 310–315.
- Ran, Y., Li, X., Jin, R., et al.** Remote sensing of the mean annual surface temperature and surface frost number for mapping permafrost in China // *Arctic, Antarctic, and Alpine Res.*, 2015, vol. 47, No. 2, p. 255–265.
- Riche, F., Schneebeli, M.** Thermal conductivity of snow measured by three independent methods and anisotropy considerations // *The Cryosphere*, 2013, vol. 7, p. 217–227.
- Sandholt, I., Rasmussen, K., Andersen, J.** A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status // *Remote Sens. Environ.*, 2002, vol. 79, p. 213–224.
- Throop, J., Lewkowicz, A., Smith, S.** Climate and ground temperature relations at sites across the continuous and discontinuous permafrost zones, northern Canada // *Can. J. Earth Sci.*, 2012, vol. 49, No. 8, p. 865–876.
- Westermann, S., Ostby, T., Gissnas, K., et al.** A ground temperature map of the North Atlantic permafrost region based on remote sensing and reanalysis data // *The Cryosphere*, 2015, vol. 9, p. 1303–1319.

*Поступила в редакцию
12 июля 2017 г.*