КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 1, с. 9–20

https://www.sibran.ru

ГЕОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В КРИОСФЕРЕ

УДК 551.341

DOI: 10.15372/KZ20220102

ИЗУЧЕНИЕ ВАРИАЦИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ТУНДРОВОГО ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

С.Г. Корниенко

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

По данным термометрических наблюдений в районе Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения в летний период рассчитывались коэффициенты температуропроводности мха (Sphagnum fuscum), кустистого лишайника (Cladonia arbuscula), а также двухслойных образиов почвенно-растительного покрова, включающих смешанную растительность (Empetrum nigrum, Vaccinium vitis-idaea, Carex arctisibirica) разной толщины и песчаный грунт. Полученные в ходе эксперимента значения коэффициента температуропроводности для мха сфагнума и лишайника, рассчитанные для периодов с разными метеорологическими условиями, близки к ранее опубликованным значениям коэффициента температуропроводности схожих типов напочвенного покрова. Амплитуда суточных колебаний температуры на глубине 12 см под образцами покрова снижается на 84–94 %. На 37 % амплитуда колебаний снижается в верхнем слое покрова толщиной 4.2–6.4 см в зависимости от типа покрова. Отмечен аномально высокий рост значений коэффициента температуропроводности мха сфагнума при повышении влажности воздуха и увеличении количества осадков к концу лета, что может быть подтверждением его уникальных теплоизоляционных свойств, обеспечивающих консервацию жильных льдов на участках дренированных отложений. Показано, что при среднесуточных температурах воздуха ниже 27 °С и относительной влажности воздуха выше 49 % коэффициент температуропроводности исследуемых образцов напочвенного покрова может служить индикатором их теплоизоляционных свойств.

Ключевые слова: коэффициент температуропроводности, почвенно-растительный покров, тундра, температура воздуха, влажность.

VARIATIONS IN THERMAL DIFFUSIVITY OF THE TUNDRA COVER ACCORDING TO THE DATA OF FIELD OBSERVATIONS DURING THE SUMMER PERIOD

S.G. Kornienko

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

Thermometric observations in the area of the Yamburg oil and gas condensate field in summer have been used to calculate the thermal diffusivity (K) coefficients of moss (*Sphagnum fuscum*), bushy lichen (*Cladonia arbuscula*), and two-layer samples of soil-vegetation cover, consisting of mixed vegetation (*Empetrum nigrum, Vaccinium vitis-idaea, Carex arctisibirica*) of different thickness and sandy soil. The thermal diffusivity for sphagnum moss and lichen have been calculated for the periods with different meteorological conditions. The K values, obtained during the experiment, are quite close to the previously published values of the thermal diffusivity for similar types of the land cover. An amplitude of daily temperature fluctuations at a depth of 12 cm under the cover samples decreases by 84–94 %. The amplitude of fluctuations decreases by 37 % in the upper layer of the thermal diffusivity of sphagnum moss was noted with an increase in air humidity and precipitation by the end of summer. This fact confirms the unique thermal insulation properties of sphagnum moss, which ensure the conservation of ice wedges in drained areas. It was found that at average daily air temperatures below 27 °C and relative air humidity above 49 %, the K values of the studied samples of the land cover can serve as indicators of their thermal insulation properties.

Key words: thermal diffusivity, land cover, tundra, air temperature, humidity.

введение

Актуальность изучения теплофизических свойств тундрового напочвенного растительного покрова *in situ* обусловлена в первую очередь необходимостью получения объективной информации о состоянии и возможных трансформациях многолетнемерзлых пород в условиях существующих климатических трендов и антропогенного воздействия. Изменение теплоизоляционных

© С.Г. Корниенко, 2022

9

свойств напочвенного покрова в криолитозоне относится к основным причинам изменения глубины сезонного протаивания и объемов эмиссии парниковых газов. Повышение среднегодовой температуры воздуха в северных широтах [Васильев и др., 2020] сопровождается изменениями видового состава и проективного покрытия растительности, что при определенных условиях может привести либо к деградации, либо к аградации мерзлоты [Конищев, 2009; Анисимов, Шерстюков, 2016]. Данные космической съемки показывают, что современное потепление климата уже привело к увеличению продуктивности и озеленению арктической тундровой растительности [Beck, Goetz, 2011; Urban et al., 2014; Bhatt et al., 2017]. Наблюдаемое в последние десятилетия одновременное изменение климата и фитоценозов является примером масштабных обратных связей в арктической и субарктической экосистемах.

Ключевую роль в теплообмене мерзлых грунтов с атмосферой играет поверхностный почвенно-растительный покров (ПРП), под которым в данном случае понимается верхняя часть деятельного слоя, включающая напочвенный растительный покров, дернину, органический субстрат и(или) грунт. Влияние тундрового напочвенного покрова на температурный режим грунтов может оцениваться по значениям коэффициента температуропроводности, рассчитанного по суточным перепадам температуры на поверхности и на подошве покрова [Методы..., 2004]. Выбор коэффициента температуропроводности в качестве возможного индикатора теплоизоляционных свойств ПРП *in situ* определяется в первую очередь простотой проведения измерений с использованием температурных логгеров. Несмотря на достаточно широкое применение температурных логгеров в геокриологических исследованиях, практически нет результатов их апробации при изучении вариаций коэффициентов температуропроводности тундрового покрова. Немаловажную роль в подобных исследованиях играют сведения, характеризующие связь коэффициентов температуропроводности типичных видов тундрового покрова с метеорологическими условиями, в первую очередь с влажностью воздуха. Цель настоящей работы – изучение и характеристика вариаций коэффициентов температуропроводности некоторых типов тундрового почвенно-растительного покрова в летний период в условиях их естественного распространения. Задачи исследования:

 – апробация методики определения коэффициентов температуропроводности тундрового ПРП *in situ* на основе долговременных измерений с применением температурных логгеров;

 характеристика связи коэффициентов температуропроводности различных типов покрова с метеорологическими условиями; – оценка возможности использования коэффициентов температуропроводности как индикаторов теплоизоляционных свойств напочвенных растительных покровов.

ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТУНДРОВОГО НАПОЧВЕННОГО ПОКРОВА

Доминирующими напочвенными растительными покровами в арктических и субарктических тундрах являются мхи, лишайники, кустарнички и травы [*Memodы..., 2004; Морозова, Магомедова, 2004*]. Толщина мохового мата может варьировать от 0.01 до 0.2 м, а в редких случаях достигать 0.5 м. Достаточно хорошо изучены теплофизические свойства грунтов и торфа, в меньшей степени – свойства мхов, лишайников и сосудистых растений.

Коэффициент температуропроводности (*K*) образцов тундрового покрова *in situ* определяется по затуханию амплитуды суточных колебаний температуры (СКТ) с глубиной [*Memodul..., 2004*]:

$$K = \frac{\pi z^2}{\tau_{\rm cyr} \left(\ln A_1 - \ln A_2 \right)^2},$$
 (1)

где A_1 , A_2 – амплитуды СКТ на поверхности покрова и на глубине *z* соответственно; $\tau_{\text{сут}}$ – период колебаний температуры (как правило, $\tau_{\text{сут}}$ соответствует одним суткам).

Реальный тундровый ПРП представляет собой неоднородную по теплофизическим свойствам многослойную среду, и, кроме того, в более пористом верхнем растительном слое теплообмен может иметь конвективную составляющую [Степаненко и др., 2020]. Поэтому в условиях естественного распространения экспериментально могут быть оценены только эффективные значения коэффициента температуропроводности покрова. В данном случае под эффективным значением коэффициента температуропроводности понимается значение К неоднородного по толшине почвенно-растительного покрова, эквивалентное значению К однородного покрова той же толщины, находящегося в идентичных условиях нестационарного теплового воздействия.

Толщина приповерхностного слоя (D), в котором амплитуда суточных колебаний температуры затухает на 37 %, определяется формулой [*Stoy et al.*, 2012]:

$$D = \frac{z}{\ln A_1 - \ln A_2}.$$
 (2)

Параметр, характеризующий степень затухания амплитуды СКТ до глубины *z*, может быть рассчитан по формуле

$$M = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \cdot 100 \%.$$
(3)

Если известны значения коэффициента теплопроводности (λ) и объемной теплоемкости (C_n), то K рассчитывается как их отношение:

$$K = \lambda / C_n. \tag{4}$$

В табл. 1 приведены значения плотности скелета (ρ_d), объемной влажности (W_n), объемной теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности образцов напочвенного покрова в талом состоянии, в том числе рассчитанные по данным, приведенным в источниках, с использованием формул (1) и (4), а также соотношений между объемной и весовой влажностью образцов.

В работе [Soudzilovskaia et al., 2013] на примере 17 видов мхов делается вывод о том, что теплоизолирующие свойства мохового покрова не зависят от плотности, а зависят только от влажности и

Таблица	1.	Теплофизические свойства образцов тундрового напочвенного покрова
		в талом состоянии

Nº	Тип покрова	ρ _d , г/см ³	W _n , %	λ, Вт/(м·К)	$C_n \cdot 10^{-6}, B_T \cdot c/(M^3 \cdot K)$	<i>K</i> ·10 ⁷ , м ² /с	Источник
1	17 видов мохообразных	0.02-0.08	0-80	0.05-0.50	0.3-4.0	_	[Soudzilovskaia et al., 2013]
2	Зеленый мох	0.18	0 - 90	0.05-0.29	0.3 - 4.0	0.7 - 1.4	[Гаврильев, 2004]
3	Дерн, мох, лишайник, травяная растительность	—	8-80	0.05-0.50	_	0.8-1.3	[Алексютина, Мотенко, 2012]
4	Мохово-лишайниковый	_	0-100	0.05-0.48	0.5-3.9	0.9-1.2*	[Porada et al., 2016]
5	Лишайник	0.07	18	0.22	_	—	[Мандаров, Скрябин, 1978]
6	Мох бурый	0.15	41	0.23	_	_	[Мандаров, Скрябин, 1978]
7	Мох сфагнум	0.18	17	0.28	_	_	[Мандаров, Скрябин, 1978]
8	Лишайник	0.06	12	0.15	_	_	[Павлов,1980]
9	Мох бурый, зеленый и др.	0.12	34	0.22	_	_	[Павлов, 1980]
10	Мох сфагнум	0.12	43	0.28	_	_	[Павлов,1980]
11	Mox (Sanionia uncinata)	0.096	14*	0.17	_	-	[Осокин, Соснов- ский, 2012]
12	Mox (Hylocomium splendens var. alascanum)	0.059	12*	0.13	_	—	[Осокин, Соснов- ский, 2012]
13	Лишайник	_	_	0.13*	_	_	[Фельдман и др., 1988]
14	Зеленый мох	_	_	0.16*	_	_	[Фельдман и др., 1988]
15	Сфагнум	_	_	0.31*	_	_	[Фельдман и др., 1988]
16	Дерн	_	-	0.40*	_	_	[Фельдман и др., 1988]
17	Мох сфагнум	_	_	0.07-0.19	_	_	[Fukui et al., 2008]
18	Перистые мхи (Hylocomium splendens, Pleurozium schreberi)	0.02-0.12	0-40	0.02-0.2	_	_	[O'Donnell et al., 2009]
19	Mox сфагнум (Sphagnum fuscum)	0.04-0.17	0-90	0.03-0.43	_	_	[O'Donnell et al., 2009]
20	Mox (Tomentypnum nitens)	_	_	_	_	1.1*	[Gornall et al., 2007]
21	Мохово-лишайниковый	_	_	-	_	1.8*	[Павлов,1979]
22	Осоко-сфагновый	-	_	-	-	2.8*	[Павлов, 1979]
23	Сфагново-ерниковый	-	_	-	-	1.4*	[Павлов, 1979]
24	Зеленый мох (слабоувлажненный)	-	_	0.19		1.0	[Методы, 2004]
25	Лишайник (ягель, сухой)	—	_	0.17	_	_	[Методы, 2004]

 $\overline{\Pi \, \mathrm{p} \, \mathrm{u} \, \mathrm{w} \, \mathrm{e}^{\, \mathrm{u}}}$ а н и е. ρ_d – плотность скелета; W_n – объемная влажность; λ – коэффициент теплопроводности; C_n – объемная теплоемкость; K – коэффициент температуропроводности.

* Значения, рассчитанные по данным, приведенным в источнике.

толщины мата. Данный вывод в целом подтверждается результатами, приведенными в работах [Мандаров, Скрябин, 1978; O'Donnell et al., 2009; Porada et al., 2016] (см. табл. 1). Несмотря на достаточно большой разброс значений плотности мхов, зависимость $\lambda(W_n)$, согласно этим данным, приблизительно одинаковая. В работе [Porada et al., 2016] приведены результаты моделирования зависимостей $\lambda(W_n)$ и $C_n(W_n)$ для бриофито-лишайникового мата толщиной 4.5 см и пористостью 80 %. Принимались во внимание свойства мхов (без уточнения видов), распространенных на возвышенных, дренированных участках, а также свойства лишайников, поскольку по плотности и механизму водонасыщения они близки к перьевым мхам [*Stoy et al.*, 2012].

РАЙОН И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований расположен в центральной части Тазовского полуострова, в бассейне р. Пойловояха, на территории Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) и относится к подзоне субарктических южных тундр. Карта-схема расположения района и участков наблюдений, построенная на основе космических снимков [https://earth.google.com.my/], приведена на рис. 1. Рельеф территории месторождения представлен зырянской и казанцевской морскими равнинами, а также эрозионно-аккумулятивными поверхностями пойм рек и надпойменных террас [Павлунин и др., 2015]. Незатронутые оврагами участки характеризуются плоскими поверхностями и незначительными перепадами высотных отметок. Район наблюдений (см. рис. 1, б) относится к озерно-аллювиальной равнине с абсолютными отметками рельефа от 26 до 43 м. Для водоразделов территории месторождения характерны высокая заболоченность и заозеренность, а также широкое распространение плоскобугристых торфяников. В напочвенном покрове доминируют мохово-лишайниково-кустарничковая растительность и кустарники.

Климат на Тазовском полуострове морской субарктический и во многом определяется близостью Карского моря [*Вечная мерзлота..., 2002*]. Среднегодовая температура воздуха на Ямбургском НГКМ –7.8 °С, среднегодовое количество осадков 350–390 мм, высота снежного покрова 56–78 см [*Павлунин и др., 2015*].

Район исследований относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород мощностью 300-400 м. Температуры грунтов на глубине нулевых теплооборотов (7-10 м) составляют -0.5...-3.5 °С. Многолетнемерзлые грунты включают эпигенетически промерзшие пески и твердомерзлые супеси с массивной, реже слоистой, криогенной текстурой. Глубина сезонноталого слоя (СТС) варьирует от 0.8 до 4.1 м и не превышает 1.5 м на участках залегания торфов. Геологический разрез исследуемого района до глубины 10 м представлен верхнеплейстоценовыми лагунно-морскими осадками зырянского горизонта, в основном перекрытыми современными биогенными отложениями в виде торфов, а также отложениями техногенного генезиса (насыпными грунтами), представленными преимущественно мелкими песками [Павлунин и др., 2015].

Участки термометрических измерений № 1 и 2 были выбраны вблизи р. Пойловояха и на схеме



Рис. 1. Карта-схема расположения Ямбургского НГКМ и района наблюдений на территории Тазовского полуострова (*a*) и участков наблюдений № 1 и 2 (*б*).



Рис. 2. Участки термометрических наблюдений с кустарничково-мохово-лишайниковым (*a*) и кустарничково-мохово-травяным покровом (*б*) в районе Ямбургского НГКМ.

условно обозначены красными квадратами (см. рис. 1, б). Расстояние между участками около 6 км. На обоих участках рельеф равнинный, слабовыраженный, с абсолютными высотными отметками 32 м. Первые два пункта наблюдений (п. 1 и 2) расположены на участке № 1 дренированных торфяных отложений с ледяной жилой шириной 20-30 см. Ландшафт представляет собой кустарничково-лишайниково-моховую мелкокочковатую тундру (рис. 2, a). В пункте 1, расположенном непосредственно на ледяной жиле, покров представлен преимущественно сфагновым мхом (Sphagnum fuscum) толщиной 12 см с включениями мха кукушкин лен (Polytrichum commune) и брусники (Vaccinium vitis-idaea). Напочвенный покров в п. 2 представлен кустистым лишайником (Cladonia arbuscula) толщиной 12 см, почвы представлены торфяными отложениями.

Другие два пункта (п. 3 и 4) располагались на участке № 2 дренированных песчаных грунтов с относительно однородным низкорослым кустарничково-мохово-травяным (*Empetrum nigrum*, *Vaccinium vitis-idaea*, *Carex arctisibirica*) покровом с включением мелких кустарников (*Ledum decumbens*, *Betula nana*) (см. рис. 2, *б*). Толщина растительного покрова в пункте 3 составляла 5 см, а в пункте 4 – 2 см. Глубина СТС на данной территории колеблется от 1.8 до 3.2 м. Расстояние между пунктами наблюдений на каждом участке не превышало 1.5 м. В работе использовались данные с метеостанции пос. Ямбург, расположенного в 37 км западнее района исследований (см. рис. 1, *a*).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения температуры ПРП осуществлялись автономными логгерами НОВО U23-003 с точностью ±0.2 °С. Схема расположения термодатчиков приведена на рис. З. В пунктах 1 и 2 нижние датчики располагались непосредственно на подошве мха (без контакта со льдом) и лишайника, а в пунктах 3 и 4 в грунте на расстоянии 12 см от поверхности растительного покрова. Датчики, размешаемые на поверхности, имели затеняющие козырьки размерами 10 × 30 мм. Поскольку расстояние между пунктами наблюдений на каждом участке не превышало 1.5 м, влияние факторов, связанных с рельефом, инсоляцией и метеорологическими условиями, считалось одинаковым для обоих пунктов. Регистрация данных проводилась после снеготаяния с 23 июня по 26 августа 2013 г. с интервалом 30 мин. Обработка и анализ данных осуществлялись с помощью программ HOBO Pro BHW и Excel Microsoft Office.

Коэффициенты температуропроводности K, величина затухания M амплитуды суточных колебаний температуры под покровом на 12 см и толщина слоя D затухания СКТ на 37 % рассчитывались по формулам (1)–(3). На практике рекомендуется проводить измерения в течение 3–5 дней при относительно стабильных погодных условиях (без дождей) и по ним определять среднее значение параметра K [*Memodul..., 2004*].

Для характеристики связи параметров *K*, *M* и *D* с особенностями метеорологических условий рассчитывались средние значения этих парамет-





ров по трем оценочным периодам наблюдений А, Б, В (рис. 4, табл. 2), характеризующимся относительно стабильными погодными условиями, но различающимся средними значениями температуры (T_a) и влажности (W_a) воздуха.

В период А отмечались аномально высокие среднесуточные температуры воздуха, причем на поверхности покрова значения температуры достигали 40–50 °С, а максимальные суточные пере-



Рис. 4. График среднесуточных температур воздуха *T_a* за весь цикл наблюдений.

А, Б, В – периоды оценки коэффициента температуропроводности K, параметра M и толщины приповерхностного слоя D.



пады составляли 25-40 °С. Для периода Б характерны близкие к средним за весь цикл наблюдений температуры воздуха, а в период В отмечены относительно низкие температуры воздуха. Из анализа были исключены данные, зарегистрированные в дни проливных дождей. Расчеты параметров *K*, *M* и *D* проводились для каждых суток после усреднения данных по температуре с шагом в 2 ч.

Таблица 2. Средние значения коэффициента температуропроводности (K, м²/с), параметра M (%) и толщины приповерхностного слоя (D, см) образцов покрова по трем периодам наблюдений (A, Б, В)

Номер пункта	Пе (21-	ериод -27 ик	А оля)	Пе (2-е	ериод 3 авгус	Б ста)	Период В (18–26 августа)			
на́блю- дений	K·10 ⁷	М	D	K·10 ⁷	М	D	K·10 ⁷	М	D	
1	0.791	90.6	4.6	0.931	89.1	4.9	1.265	86.1	5.7	
2	0.664	93.9	4.3	0.831	91.8	4.8	0.870	91.5	4.9	
3	0.914	90.8	5.0	1.164	88.1	5.6	1.035	89.5	5.3	
4	1.299	86.5	6.0	1.514	84.5	6.4	1.496	84.6	6.4	

<u>П</u>римечание. Период А: температура воздуха $T_a = 27.3$ °С, влажность $W_a = 49$ %; период Б: $T_a = 14.8$ °С, $W_a = 70$ %; период В: $T_a = 9.8$ °С, $W_a = 79$ %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Учитывая относительно большое расстояние (6 км) между участками наблюдений, более корректным может быть сравнение полученных результатов для пунктов, находящихся в непосредственной близости друг к другу (1.5 м). В данном случае проводилось раздельное сравнение результатов для п. 1 и 2 (участок № 1) и для п. 3 и 4 (участок № 2). На рис. 5 приведены графики хода температуры на поверхности и под почвенно-растительным покровом (осреднение данных за 3 суток), среднеквадратическое отклонение (СКО) этих распределений, средние значения (горизонтальные линии) и разность средних значений температуры на поверхности и под покровом (ΔT) за весь период наблюдений. Положение кривых, соотношение значений СКО и ΔT свидетельствуют о том, что в среднем за лето теплоизоляция покрова в п. 1 была ниже, чем в п. 2 (см. рис. 5, *a*, *б*), а в п. 3 выше, чем в п. 4 (см. рис. 5, в, г).

Графики суточных вариаций и средние значения (горизонтальные линии) коэффициентов *К* для исследуемых образцов ПРП за весь период наблюдений приведены на рис. 6. За этот период значения *К* в п. 1 (см. рис. 6, *а*) могли меняться на порядок, а в п. 2 – в 4 раза. В пунктах 3 и 4 коэффициенты температуропроводности изменялись приблизительно в 3 раза (см. рис. 6, *б*). Столь существенный разброс фактических значений обусловлен в основном резкими перепадами температуры, влажности воздуха и осадками.

Средние значения параметров *K*, *M* и *D* для исследуемых образцов покрова по трем периодам наблюдений (A, Б, В) приведены в табл. 2 и в виде диаграмм на рис. 7, *a*, *в*, *г*.

Вполне закономерна разница значений K для пунктов 3 и 4, поскольку в п. 4 слой песка больше. Для мха сфагнума K заметно выше, чем для лишайника, особенно в "холодный" период В. По сравнению с другими образцами для мха отмечаются аномально высокие значения СКО коэффициента температуропроводности по всем периодам оценки, особенно в "холодный" период (см. рис. 7, δ).

Средние значения параметра M, характеризующего степень затухания суточных колебаний температуры на глубине 12 см, лежат в диапазоне от 84 до 94 % (см. табл. 2, рис. 7, e). Для анализируемых типов покрова амплитуда СКТ затухает на 37 % (параметр D) в приповерхностном слое толщиной от 4.2 до 6.5 см (см. табл. 2, рис. 7, e).



Рис. 5. Вариации усредненных за 3 суток значений температуры T на поверхности (I) и под почвеннорастительным покровом (II) в пунктах 1–4 ($a-\epsilon$) за весь период наблюдений.



Рис. 6. Вариации коэффициента температуропроводности *К* за весь период наблюдений на участках № 1 (*a*) и 2 (*б*).

1-4 – пункты наблюдений.



Рис. 7. Диаграммы средних значений K(a) и среднеквадратического отклонения (СКО) коэффициента температуропроводности (δ), средних значений параметра M(a) и толщины приповерхностного слоя D(a) образцов почвенно-растительного покрова по периодам наблюдений A–B.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в ходе эксперимента средние значения коэффициента *K* для п. 1 (сфагнум) и п. 2 (лишайник) (см. табл. 2) достаточно близки к опубликованным значениям сходных типов покрова (см. табл. 1). В целом это свидетельствует о корректности проведенных измерений, расчетов и перспективности использования температурных логгеров для характеристики коэффициентов температуропроводности различных типов тундрового напочвенного растительного покрова.

При высоких и средних температурах воздуха (периоды А, Б) коэффициенты температуропроводности мха сфагнума и лишайника отличаются несущественно (см. табл. 2, рис. 7, а). Снижение температуры воздуха и, соответственно, рост атмосферной влаги приводят к повышению К как для мха, так и для лишайника. Известно, что температуропроводность мхов и лишайников практически не зависит от температуры, но зависит от влажности. В этой связи наиболее вероятной причиной повышения значений К могут быть повышение влажности воздуха и увеличение интенсивности осадков к концу лета. Для лишайника К максимально повысился в 1.3 раза, что достаточно близко к тенденциям роста этого коэффициента некоторых типов тундрового покрова при повышении их влажности [Алексютина, Мотенко, 2012; Porada et al., 2016]. В то же время К мха при переходе от более высоких температур воздуха к низким температурам повысился в 1.6 раза (см. табл. 2, рис. 7, а). Разница в изменении коэффициентов температуропроводности образцов сфагнума и лишайника, находящихся в идентичных условиях, может быть связана с различием механизмов насыщения влагой. Для пунктов 3 и 4 изменения К практически одинаковы и не столь существенны, как у мха (см. табл. 2, рис. 7, а), что свидетельствует об аналогичных и слабых гигроскопических свойствах этих образцов ПРП. Отмечаемые относительно высокие значения СКО коэффициента температуропроводности образца мха сфагнума по всем периодам оценки (см. рис. 7, б), скорее всего, также связаны с его гигроскопическими свойствами и особенностями теплообмена, поскольку для образца лишайника СКО существенно ниже.

Результаты измерений температуры на поверхности и на подошве напочвенного покрова свидетельствуют о том, что в летнее время теплоизоляционные свойства мха сфагнума на ледяной жиле ниже, чем кустистого лишайника на торфе (см. рис. 5, a, δ). Средние значения коэффициента температуропроводности мха, рассчитанные для каждого периода наблюдений, оказались выше, чем у лишайника (см. табл. 2, рис. 7, a). Аналогично для образцов ПРП, включающих песчаный грунт и смешанный растительный покров разной толщины, теплоизоляционный эффект был выше у образца с более низким значением K (п. 4). Отсюда следует, что в сходных условиях для подобных типов покрова коэффициент температуропроводности может служить индикатором их теплоизоляционных свойств, так же как и коэффициент теплопроводности.

Ранее было показано, что полное насыщение влагой живых перьевых мхов (Hylocomium splendens, Pleurozium schreberi) доходило только до 40 %, в то время как живой сфагнум (чаще всего Sphagnum fuscum) мог насыщаться до 90 % за счет капиллярного подъема воды [O'Donnell et al., 2009]. Коэффициенты теплопроводности живых перьевых мхов и живого сфагнума практически одинаково зависят от объемной влажности (при $W_n < 40$ %). Разница лишь в том, что в реальных условиях насыщение водой перьевых мхов и лишайников ограничивается содержанием влаги в атмосфере, а мох сфагнум дополнительно может насыщаться грунтовыми водами. К началу осени влагосодержание и теплопроводность всех типов напочвенного покрова увеличиваются, однако влажность сфагнума будет существенно выше, чем у перьевых мхов и кустистых лишайников. При переходе в мерзлое состояние λ перьевых мхов и лишайников повышается в 1.5-2 раза. В то же время за счет более высокой влажности λ сфагнума в мерзлом состоянии становится в несколько раз выше, чем у перьевых мхов и лишайников. В этой связи полагаем, что на дренированных участках мох сфагнум обладает уникальными теплоизоляционными свойствами, предохраняя жильные льды от вытаивания. В жаркие летние дни он хороший теплоизолятор, а в холодное зимнее время хороший проводник тепла [*Park et al.*, 2018].

Ранее отмечалось, что под сфагновыми мхами глубина талого слоя существенно меньше, чем под зелеными лесными мхами и лишайниками [Бакалин, Bempoba, 2008; Fukui et al., 2008; Loranty et al., 2018]. Однако на сильнообводненных участках сфагнум существенно снижает свои теплоизоляционные свойства в летнее время, поскольку постоянно находится во влажном состоянии и не пересыхает даже в жаркие дни. В таких местах под сфагнумом мерзлые грунты залегают глубже, чем на участках с обычной влажностью почвы [Каргополов, 2001]. Поэтому при сильном увлажнении участков, в случае замещения перьевых мхов и кустистых лишайников сфагновыми мхами, прогнозируется увеличение глубины талого слоя [O'Donnell et al., 2009].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных непрерывных термометрических измерений в районе Ямбургского НГКМ в

летний период охарактеризованы вариации эффективных значений коэффициентов температуропроводности мха сфагнума (Sphagnum fuscum, толщина 12 см) на ледяной жиле и кустистого лишайника (Cladonia arbuscula, толщина 12 см) на торфе. Дополнительно производились измерения для двух двухслойных образцов почвенно-растительного покрова (толщина 12 см), включающих смешанный растительный покров толщиной 5 и 2 см (Empetrum nigrum, Vaccinium vitis-idaea, Carex arctisibirica) и песчаный грунт. Полученные в ходе эксперимента средние значения коэффициента температуропроводности для мха сфагнума и кустистого лишайника достаточно близки к ранее опубликованным значениям схожих типов напочвенного покрова, что в целом свидетельствует о корректности проведенных измерений, расчетов и перспективности применения температурных логгеров для определения коэффициентов температуропроводности in situ различных типов тундрового почвенно-растительного покрова.

По сравнению с лишайником образец мха сфагнума, находящийся в непосредственной близости и идентичных метеорологических условиях, характеризуется более значительным ростом *К* при изменении среднесуточной температуры воздуха от 27.3 до 9.8 °С и относительной влажности воздуха от 49 до 79 %. Данный факт подтверждает уникальность теплоизоляционных свойств мха сфагнума для предохранения жильных льдов от вытаивания, поскольку при высоких положительных значениях температуры воздуха он хороший теплоизолятор, а при отрицательных – хороший проводник тепла.

Результаты наблюдений показали, что амплитуда суточных колебаний температуры на глубине 12 см под исследуемыми образцами почвенно-растительного покрова снижается на 84–94 %. На 37 % амплитуда СКТ снижается в напочвенном покрове толщиной 4.2–6.4 см в зависимости от типа покрова. Вариации глубины затухания амплитуды СКТ, обусловленные изменением метеорологических условий, наиболее существенны для мха сфагнума.

Полученные результаты могут служить подтверждением того, что в реальных условиях, при среднесуточной температуре воздуха от 27 °С и ниже и относительной влажности воздуха более 49 %, коэффициент температуропроводности подобных типов тундрового почвенно-растительного покрова может служить индикатором их теплоизоляционных свойств.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания (тема "Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли", АААА-А19-119021590079-6).

Литература

Алексютина Д.М., Мотенко Р.Г. Теплофизические свойства напочвенных покровов // Тр. Десятой междунар. конф. по мерзлотоведению (Салехард, 25–29 июня 2012 г.). Тюмень, Печатник, 2012, т. 5, с. 5–6.

Анисимов О.А., Шерстюков А.Б. Оценка роли природноклиматических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 2, с. 90–99.

Бакалин В.А., Ветрова В.П. Взаимосвязь растительности и мерзлоты в зоне спорадического распространения многолетней мерзлоты на Камчатке // Экология, 2008, № 5, с. 338–346.

Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А. и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе Российской Арктики // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 2, с. 15–30.

Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных районов / Под ред. Е.С. Мельникова (ч. I, III), С.Е. Гречищева (ч. II, III, IV). М., ГЕОС, 2002, 402 с.

Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне: справ. пособие. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2004, 146 с.

Каргаполов В.Д. Влияние растительности на условия образования многолетнемерзлых пород на побережье Охотского моря // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 4, с. 22–29.

Конищев В.Н. Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2009, № 4, с. 10–20.

Мандаров А.А., Скрябин П.Н. Теплопроводность грунтов Енисейского Севера и ее сезонная динамика // Геотеплофизические исследования в Сибири. Новосибирск, Наука, 1978, с. 74–82.

Методы геокриологических исследований: учеб. пособие / Под ред. Э.Д. Ершова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 512 с.

Морозова Л.М., Магомедова М.А. Структура растительного покрова и растительные ресурсы полуострова Ямал. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2004, 63 с.

Осокин Н.И., Сосновский А.В. Теплофизические свойства мохового покрова и его влияние на термический режим грунтов на архипелаге Шпицберген // Тр. Десятой междунар. конф. по мерзлотоведению (Салехард, 25–29 июня 2012 г.). Тюмень, Печатник, 2012, т. 3, с. 391–395.

Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск, Наука, 1979, 284 с.

Павлов А.В. Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы. Новосибирск, Наука, 1980, 240 с.

Павлунин В.Б., Быкова А.В., Лобастова С.А. Мониторинг техногенного оврагообразования на объектах добычи углеводородного сырья в условиях криолитозоны // Инж. изыскания, 2015, № 3, с. 60–68.

Степаненко В.М., Репина И.А., Федосов В.Э. и др. Обзор методов параметризации теплообмена в моховом покрове для моделей земной системы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2020, т. 56, № 2, с. 127–138.

Фельдман Г.М., Тетельбаум А.С., Шендер Н.И., Гаврильев Р.И. Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии. Якутск, Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1988, 239 с.

Beck P.S.A., Goetz S.J. Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: ecological variability and regional differences // Environ. Res. Lett., 2011, vol. 6, No. 045501, p. 10.

Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K. et al. Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables // Environ. Res. Lett., 2017, vol. 12, No. 5.

Gornall J.L., Jonsdottir I.S., Woodin S.J., Van der Wal R. Arctic mosses govern below-ground environment and ecosystem processes // Oecologia, 2007, No. 153, p. 931–941.

Fukui K., Sone T., Yamagata K. et al. Relationships between permafrost distribution and surface organic layers near Esso, Central Kamchatka, Russian Far East // Permafrost and Periglacial Process., 2008, vol. 19, p. 85–92.

Loranty M.M., Berner L.T., Taber E.D. et al. Understory vegetation mediates permafrost active layer dynamics and carbon dioxide fluxes in open-canopy larch forests of northeastern Siberia // PLoS One, 2018, No. 13 (3), e0194014. – https://doi. org/10.1371/journal.pone.0194014

O'Donnell J.A., Romanovsky V.E., Harden J.W., Mc-Guire A.D. The effect of moisture content on the thermal conductivity of moss and organic soil horizons from black spruce ecosystems in interior Alaska // Soil Science, 2009, vol. 174, No. 12, p. 646–651.

Park H., Launiainen S., Konstantinov P.Y. et al. Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a tundra site in northeastern Siberia // J. Geophys. Res.: Biogeosciences, 2018, vol. 123, No. 9, p. 3028–3044.

Porada P., Ekici A., Beer C. Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale // The Cryosphere, 2016, vol. 10, p. 2291–2315.

Soudzilovskaia N.A., Van Bodegom P.M., Cornelissen J.H.C. Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation // Functional Ecology, 2013, No. 27, p. 1442–1454.

Stoy P.C., Street L.E., Johnson A.V. et al. Temperature, heat flux, and reflectance of common subarctic mosses and lichens under field conditions: might changes to community composition impact climate-relevant surface fluxes? // Arctic, Antarctic, and Alpine Res., 2012, vol. 44, No. 4, p. 500–508.

Urban M., Forkel M., Eberle J. et al. Pan-Arctic climate and land cover trends derived from multi-variate and multi-scale analyses (1981–2012) // Remote Sensing, 2014, vol. 6, p. 2296–2316.

URL: https://earth.google.com.my/ (дата обращения: 17.09.2021).

References

Aleksyutina D.M., Motenko R.G. Thermophysical properties of surface organic layers. In: Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost (Salekhard, June 25–29, 2012). Tyumen, Pechatnik, 2012, vol. 4, p. 13–14.

Anisimov O.A., Sherstyukov A.B. Evaluating the effect of climatic and environmental factors on permafrost in Russia. Earth's Cryosphere, 2016, vol. XX, No. 2, p. 78–86.

Bakalin V.A., Vetrova V.P. The relationship of vegetation and permafrost in the zone of sporadic distribution of permafrost in Kamchatka. Ekologiya [Ecology], 2008, No. 5, p. 338–346 (in Russian).

Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A. et al. Permafrost degradation: results of the long-term geocryological monitoring in the Western sector of Russian Arctic. Earth's Cryosphere, 2020, vol. XXIV, No. 2, p. 14–26.

Melnikov E.S., Grechishchev S.E. (Eds.). Vechnaya merzlota i osvoenie neftegazonosnykh raionov [Permafrost and Development of Oil and Gas Regions]. Moscow, GEOS, 2002, 402 p. (in Russian). Gavril'ev R.I. Teplofizicheskie svoistva komponentov prirodnoi sredy v kriolitozone: sprav. posobie [Thermophysical Properties of the Components of the Natural Environment in the Permafrost Zone: A reference guide]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2004, 146 p. (in Russian).

Kargapolov V.D. Influence of vegetation on the formation of perennially frozen rocks on the Okhotsk coast. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2001, vol. V, No. 4, p. 22–29 (in Russian). Konishchev V.N. Permafrost response to climate warming. Vestnik moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya [Moscow University Bulletin. Ser. 5. Geography], 2009, No. 4, p. 10–20 (in Russian).

Mandarov A.A., Skryabin P.N. Thermal conductivity of the soil of the Yenisei North and its seasonal dynamics. In: Geoteplofizicheskie issledovaniya v Sibiri [Geothermophysical Research in Siberia]. Novosibirsk, Nauka, 1978, p. 74–82 (in Russian).

Ershov E.D. (Ed.) Metody geokriologicheskikh issledovanii: ucheb. posobie [Methods of Geocryological Research]. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 2004, 512 p. (in Russian).

Morozova L.M., Magomedova M.A. Struktura rastitel'nogo pokrova i rastitel'nye resursy poluostrova Yamal [The Structure of the Vegetation Cover and Plant Resources of the Yamal Peninsula]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta, 2004, 63 p. (in Russian).

Osokin N.I., Sosnovskii A.V. Thermophysical properties of moss cover and its influence on the thermal regime of the ground, Spitsbergen archipelago. In: Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost (Salekhard, June 25–29, 2012). Tyumen, Pechatnik, 2012, vol. 2, p. 313–316.

Pavlov A.V. Teplofizika landshaftov [Thermophysics of Landscapes]. Novosibirsk, Nauka, 1979, 284 p. (in Russian).

Pavlov A.V. Raschet i regulirovanie merzlotnogo rezhima pochvy [Calculation and Regulation of Permafrost Soil Regime]. Novosibirsk, Nauka, 1980, 240 p. (in Russian).

Pavlunin V.B., Bykova A.V., Lobastova S.A. Monitoring of technogenic gully formation at hydrocarbon production facilities in permafrost conditions. Inzhenernye izyskaniya [Engineering Survey], 2015, No. 3, p. 60–68 (in Russian).

Stepanenko V.M., Repina I.A., Fedosov V.E. et al. An overview of a parameterization method of heat transfer over moss-covered surfaces in models of Earth system. Izvestiya RAN. Fizika atmosfery i okeana [Proceedings of RAS. Physics of the atmosphere and ocean], 2020, vol. 56, No. 2, p. 127–138 (in Russian). Fel'dman G.M., Tetel'baum A.S., Shender N.I., Gavril'ev R.I. Posobie po prognozu temperaturnogo rezhima gruntov Yakutii [Handbook on the forecast of the temperature regime of the soils of Yakutia]. Yakutsk, In-t merzlotovedeniya SO AN SSSR, 1988, 239 p. (in Russian).

Beck P.S.A., Goetz S.J. Satellite observations of high northern latitude vegetation productivity changes between 1982 and 2008: ecological variability and regional differences. Environ. Res. Lett., 2011, vol. 6, No. 045501, p. 10.

Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K. et al. Changing seasonality of panarctic tundra vegetation in relationship to climatic variables. Environ. Res. Lett., 2017, vol. 12, No. 5.

Gornall J.L., Jonsdottir I.S., Woodin S.J., Van der Wal R. Arctic mosses govern below-ground environment and ecosystem processes. Oecologia, 2007, No. 153, p. 931–941.

Fukui K., Sone T., Yamagata K. et al. Relationships between permafrost distribution and surface organic layers near Esso, Central Kamchatka, Russian Far East. Permafrost and Periglacial Processes, 2008, vol. 19, p. 85–92.

Loranty M.M., Berner L.T., Taber E.D. et al. Understory vegetation mediates permafrost active layer dynamics and carbon dioxide fluxes in open-canopy larch forests of northeastern Siberia. PLoS One, 2018, No. 13 (3), e0194014. – https://doi. org/10.1371/journal.pone.0194014 O'Donnell J.A., Romanovsky V.E., Harden J.W., McGuire A.D. The effect of moisture content on the thermal conductivity of moss and organic soil horizons from black spruce ecosystems in interior Alaska. Soil Science, 2009, vol. 174, No. 12, p. 646–651.

Park H., Launiainen S., Konstantinov P.Y. et al. Modeling the effect of moss cover on soil temperature and carbon fluxes at a tundra site in northeastern Siberia. J. Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, vol. 123, No. 9, p. 3028–3044.

Porada P., Ekici A., Beer C. Effects of bryophyte and lichen cover on permafrost soil temperature at large scale. The Cryosphere, 2016, vol. 10, p. 2291–2315.

Soudzilovskaia N.A., Van Bodegom P.M., Cornelissen J.H.C. Dominant bryophyte control over high-latitude soil temperature fluctuations predicted by heat transfer traits, field moisture regime and laws of thermal insulation. Functional Ecology, 2013, No. 27, p. 1442–1454.

Stoy P.C., Street L.E., Johnson A.V. et al. Temperature, heat flux, and reflectance of common subarctic mosses and lichens under field conditions: might changes to community composition impact climate-relevant surface fluxes? Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2012, vol. 44, No. 4, p. 500–508.

Urban M., Forkel M., Eberle J. et al. Pan-Arctic climate and land cover trends derived from multi-variate and multi-scale analyses (1981–2012). Remote Sensing, 2014, vol. 6, p. 2296–2316.

URL: https://earth.google.com.my/ (last visited: 17.09.2021).

Поступила в редакцию 13 апреля 2021 г., после доработки – 30 декабря 2021 г., принята к публикации 3 января 2022 г.