

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ЕКАТЕРИНБУРГА

Н.Р. Факаева*, Д.Ю. Демежко, А.А. Горностаева, Б.Д. Хацкевич

*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 100, Россия*

**Автор для контакта; e-mail: fakaeva.n@gmail.com*

В регионах с умеренным и холодным климатом высота и тепловые свойства снежного покрова играют ключевую роль в формировании теплового режима земной поверхности и “городского острова тепла”. В статье приведены результаты лабораторных и полевых исследований характеристик снежного покрова в Екатеринбурге в сезон 2023/24 г. В лабораторных условиях методом игольчатого зонда изучена теплопроводность снега при различной плотности, в том числе снега, загрязненного типичными для Екатеринбурга поллютантами. Построена региональная зависимость теплопроводности снега от плотности. В естественных условиях, на площадке геотермического полигона Института геофизики УрО РАН, проводились измерения высоты и вертикального распределения плотности снежного покрова. По этим данным и с учетом полученной зависимости плотность–теплопроводность построены временные разрезы изменений плотности, теплопроводности, температуропроводности и тепловой активности снежного покрова в сезон 2023/24 г.

Ключевые слова: *снежный покров, плотность снега, теплопроводность, температуропроводность, тепловая активность, игольчатый зонд, Екатеринбург.*

Ссылка для цитирования: Факаева Н.Р., Демежко Д.Ю., Горностаева А.А., Хацкевич Б.Д. Теплофизические характеристики снежного покрова Екатеринбурга // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 2, с. 64–73. DOI: 10.15372/KZ20250206. EDN: YYFEKM.

THERMAL PROPERTIES OF THE SNOW COVER IN YEKATERINBURG

N.R. Fakaeva*, D.Yu. Demezhko, A.A. Gornostaeva, B.D. Khatskevich

*Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Amundsen St. 100, Yekaterinburg, 620016 Russia*

**Corresponding author; e-mail: fakaeva.n@gmail.com*

The thickness and thermal properties of snow cover play a significant role in the formation of the thermal regime of the ground surface and an urban heat island in regions with cold or temperate climate. This article describes the results of laboratory and field studies of the snow thermal properties in Yekaterinburg carried out in 2023/24. The thermal conductivity vs density dependence for different types of snow, including snow contaminated with pollutants typical of Yekaterinburg, was investigated in laboratory using the needle probe method. A regional dependence of thermal conductivity of the snow on its density was plotted. The snow cover depth and the vertical distribution of snow density were measured in situ at the geothermal test site of the Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Based on these data and taking into account the obtained density vs thermal conductivity dependence, time sections of changes in the density, thermal conductivity, thermal diffusivity, and thermal effusivity of the snow cover in the 2023/24 season were constructed.

Keywords: *snow cover, snow density, thermal conductivity, thermal diffusivity, thermal effusivity, needle probe, Yekaterinburg.*

ВВЕДЕНИЕ

В формировании “городского острова тепла” как в поле температур приземного воздуха, так и в подземной среде существенную роль играют теплофизические свойства подстилающих поверхностей [Демежко и др., 2022, 2024; Byrne, Davis, 1980; Goward, 1981; Carnahan, Larson, 1990; Mohajerani et al., 2017]. В городах с умеренным климатом значительную часть года подстилающей поверхностью является снежный покров. Обладая теплоизоляционными свойствами, снег препятствует проник-

новению низких температур в глубинные слои грунта. Глубина проникновения зависит от температуры приземного воздуха, высоты и теплофизических свойств снега [Осокин и др., 1999, 2000; Демежко, 2001; Павлов, 2008; Zhang, 2005; Slater et al., 2017].

Эффективная теплопроводность снега определяется преимущественно его плотностью [Павлов, 1960; Куваева, Сулаквелидзе, 1967; Yosida, 1955; Sturm et al., 1997]. Известны три основных

Наиболее известные зависимости теплопроводности снега от его плотности

№ п/п	Метод	Источник	Кол-во измерений	Район исследования	ρ , г/см ³	λ , Вт/(м·К); a , м ² /с	Образец
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Колебания температур	[Abels, 1892]	13	Россия, Екатеринбург	0.14–0.4	$\lambda = 2.846\rho^2$	Естественное залегание снега
2	Стационарный	[Jansson, 1901]	33	Швеция, Упсала	0.047–0.5	$\lambda = 0.02093 + 0.7953\rho + 2.512\rho^4$	Метелая доска, округлые зерна
3	Колебания температур	[Kondratieva, 1954]	16	Россия, Якутск	0.12–0.5	$\lambda = 3.558\rho^2$	Уплотненный снег
4	Стационарный	[Yen, 1965]	4	США, Нью-Хэмпшир	0.42–0.59	$\lambda = 3.223\rho^2$	Неконсолидированный снег
5	Стационарный	[Павлов, 1979]	800	Россия, Якутск	0.12–0.35	$\lambda = 0.035 + 0.353\rho + 0.206\rho^2 + 0.206\rho^3$	Естественное залегание снега
6	Игольчатый	[Lange, 1985]	45	Антарктида, Шельфовый ледник Фильхнера	0.24–0.42	$\lg(\lambda) = 6.9\rho - 3.0$, $R = 0.83$	Снег, фирн
7	Игольчатый	[Ostlin, Andersson, 1991]	58	Швеция	0.077–0.7	$\lambda = -0.00871 + 0.439\rho + 1.05\rho^2$	Глубинная изморозь
8	Игольчатый	[Sturm et al., 1997]	488	Аляска	0.156–0.6	$\lambda = 0.138 - 1.01\rho + 3.233\rho^2$, $R^2 = 0.79$	Свежевыпавший снег, глубинная изморозь, метелая доска, округлые зерна, талые формы
9	Стационарный	[Павлов, 2008]	–	Россия, Якутия	<0.156	$\lambda = 0.023 + 0.234\rho$	
10	Игольчатый	[Aggarwal et al., 2009]	200	Индия, Гималаи	0.12–0.42	$\lambda = k\rho$ $\lambda = 3.80635\rho^3 - 1.7756\rho^2 + 0.84\rho + 0.004$, $R = 0.997$	Свежевыпавший снег, округлые зерна, опранные кристаллы, глубинная изморозь, поверхностная изморозь
11	Моделирование	[Calonne et al., 2011]	30	Франция	0.103–0.544	$\lambda = 2.5\rho^2 - 0.123\rho + 0.024$, $R = 0.997$	Свежевыпавший снег, распавшиеся и фрагментированные снежинки, округлые зерна, глубинная изморозь, талые формы
12	Игольчатый	[Domine et al., 2011]	106	Франция, Альпы	0.03–0.51	$\lambda = 2.041\rho^2 - 0.128\rho + 0.032$, $R^2 = 0.84$	Распавшиеся и фрагментированные снежинки, округлые зерна, метелая доска, смешанные формы, опранные кристаллы, глубинная изморозь, талые формы
13	Стационарный	[Чернов, 2013]	$n \cdot 10^2$	Россия, Подмосковье	0.15–0.45	$\lambda = 0.636\rho - 0.023$, $R^2 = 0.93$	Глубинная изморозь
14	Игольчатый, стационарный	[Riche, Schneebeli, 2013]	34	Компляция из наших данных и данных [Calonne et al., 2011]	0.091–0.364	$\lambda = 3 \cdot 10^{-6}\rho^2 - 1.06 \cdot 10^{-5}\rho + 0.024$, $R^2 = 0.986$	Свежевыпавший снег, распавшиеся и фрагментированные снежинки, округлые зерна, ограниченные кристаллы, глубинная изморозь, талые формы

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8
15	Стационарный	[Осокин и др., 2017]	360	Россия, Подмосковье	0.08–0.45	$\lambda = 0.8682\rho - 0.0278$	Свежевыпавший снег, распавшиеся и фрагментированные снежинки, округлые зерна, ограниченные кристаллы, глубинная изморозь
16а	Суточная волна через температуропроводность	[Котляков и др., 2018]	500	Шпицберген	0.2–0.45	$\lambda = 0.4219\rho + 0.1922, R^2 = 0.015$	Твердый снег
16б					0.2–0.45	$\lambda = 0.3824\rho + 0.1362, R^2 = 0.28$	Средний снег
16в					0.2–0.45	$\lambda = 0.4021\rho - 0.0674, R^2 = 0.28$	Рыхлый снег
16г					0.2–0.4	$\lambda = 0.7398\rho - 0.0907, R^2 = 0.791$	Очень рыхлый
17	Стационарный	[Борисов и др., 2023]	4	Россия, Москва	0.32–0.5	$\lambda = 3.5564\rho^2; a^2 = 0.0165\rho$	Уплотненный снег (дорожный покров)
18	Моделирование	[Macfarlane et al., 2023]	138	Арктика	0.05–0.9	$\lambda = 2.62\rho^2 + 1.54 \cdot 10^{-30}\rho + 0.0304, R^2 = 0.97$	Снег с различной анизотропией, лед

Примечание: ρ – плотность, λ – теплопроводность, a – температуропроводность.

метода измерений теплопроводности снега [Sturm et al., 1997]. Первый основан на исследовании распространения суточных температурных волн в глубину. По характеру затухания амплитуды и сдвигу фазы можно определить температуропроводность снега, а затем при известной удельной теплоемкости и плотности рассчитать его теплопроводность. Именно таким методом Г.Ф. Абельсом, директором Екатеринбургской геофизической обсерватории, в 1893 г. была получена одна из первых в мире зависимостей теплопроводности снега от его плотности [Abels, 1892]. В другом лабораторном методе, методе стационарного режима, образец снега помещается между плоским нагревателем и пластиной, в которой поддерживается постоянная температура. Боковые стенки образца теплоизолируются. После установления стационарного теплового потока по измеренным температурному градиенту и тепловому потоку рассчитывается теплопроводность (согласно закону Фурье). В последние годы наиболее распространен метод игольчатого зонда. В длинном и тонком зонде совмещены нагреватель и термодатчик. Скорость изменения температуры зонда при постоянной мощности, выделяемой нагревателем, зависит от теплопроводности окружающего зонд материала.

Обобщения зависимостей теплопроводности снега от плотности, полученных более чем за вековую историю исследований, приведены в работах [Осокин и др., 2017; Sturm et al., 1997]. Наиболее известные аппроксимации приведены в таблице и на рис. 1. Можно отметить, что даже аппроксимирующие зависимости, полученные разными авторами, сильно отличаются друг от друга. Еще более заметны различия между отдельными измерениями. Столь существенная неопределенность связана с несколькими факторами: влиянием структуры снега, температуры, с особенностями применяемой методики измерений. Относительно влияния структуры снега на теплопроводность единого мнения нет. Согласно [Чернов, 2013; Осокин et al., 2017; Sturm et al., 1997], структура снега играет важную роль. Например, глубинная изморозь при одинаковой плотности с зернистым снегом обладает меньшей теплопроводностью [Осокин и др., 2017; Котляков и др., 2018; Sturm et al., 1997]. А.В. Павлов [2008], напротив, считал влияние структурного фактора несущественным. Роль температуры снега неоднозначна: с одной стороны, с уменьшением температуры растет теплопроводность ледяных кристаллов, основного проводника тепла [Pringle et al., 2007], а с другой – уменьшается влияние диффузии водяного пара, наиболее важного некондуктивного механизма теплопереноса, вносящего вклад в эффективную теплопроводность [Павлов, 1979]. В работах [Calonne et al., 2011; Riche, Schneebeli, 2013] утверждается, что метод стационарного режима систематически дает более высокие значения теплопроводности в сравнении с методом игольчатого зонда. По мнению

Ф. Ричи и М. Шнебели [Riche, Schneebeli, 2013], это связано с влиянием анизотропии образца при различной геометрии измерений этими методами. К. Форту с соавторами [Fourteau et al., 2022] полагают, что заниженные показания игольчатого зонда могут быть обусловлены недостаточной продолжительностью нагрева. При этом качество теплового контакта не играет заметной роли в оценке теплопроводности снега.

Сложный механизм теплопереноса в снежном покрове не оставляет надежды на получение сколь-нибудь универсальной количественной зависимости теплопроводности от плотности снега. В этих условиях сохраняют свою ценность региональные зависимости. Практически не исследованным остается вопрос о влиянии примесей в снеге, характерных для городской среды. Основные примеси связаны с механическим разрушением дорожных полотен, использованием противогололедных реагентов [Westerlund, Viklander, 2006], выпадением атмосферной пыли [Lygren et al., 1984; Furberg et al., 2019] и строительной деятельностью [Селезнев и др., 2018].

Настоящая статья посвящена экспериментальным исследованиям снежного покрова в Екатеринбурге, включая исследования зависимости эффективной теплопроводности от плотности, изучение динамики накопления снега и соответствующих изменений плотности, теплопроводности, температуропроводности и тепловой активности снежной толщи.

МЕТОДИКА

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лабораторные измерения проводились с помощью зондового измерителя МИТ-1, предназначенного для оценки теплопроводности твердых,

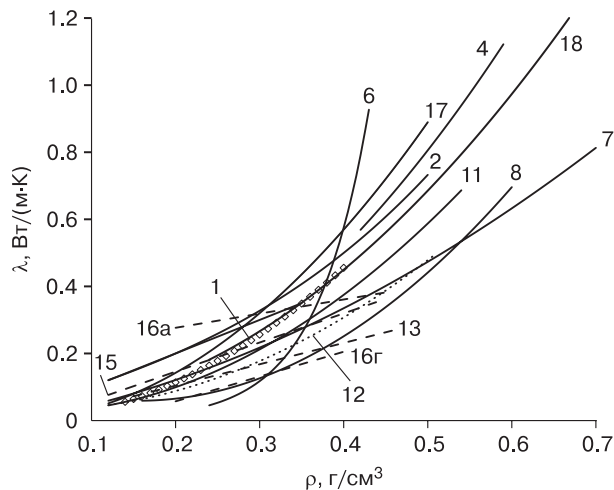


Рис. 1. Зависимости теплопроводности снега от плотности снега, приведенные в таблице.

Номера кривых соответствуют номерам в таблице.

волокнистых и сыпучих материалов в диапазоне $\lambda = 0.03–2.0$ Вт/(м·К) [https://www.interpribor.ru]. В качестве контрольных образцов использовали блок из пенополистирола ($\lambda = 0.033$ Вт/(м·К)) и глицерин ($\lambda = 0.279$ Вт/(м·К) при $T = 25$ °С). Измерения в образцах снега проводили в морозильной камере при температуре от -12 до -17 °С. Образцы объемом от 2 л (пробы уплотненного снега) до 4 л (пробы рыхлого снега, рис. 2, а) предварительно выдерживали в течение суток до полной стабилизации температурного поля. Режим минимальной мощности нагревателя (0.27 Вт) применялся для уменьшения температурных колебаний во время измерений и влияния температурной зависимости теплопроводности. Для проб, для кото-

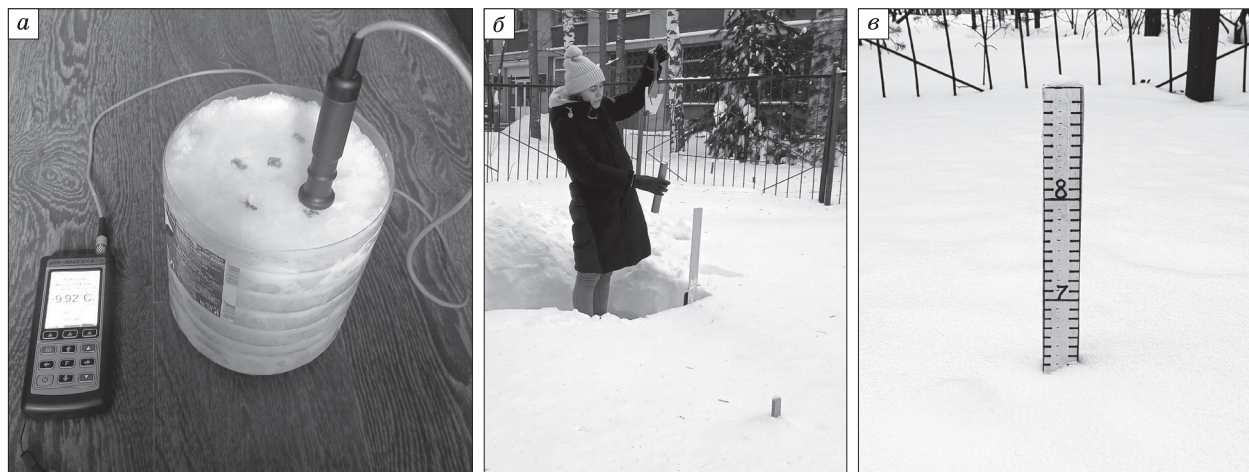


Рис. 2. Экспериментальные исследования.

а – проба снега с зондом и регистратором МИТ-1 вне морозильной камеры; б – измерение плотности весовым снегомером; в – снегомерная рейка.

рых можно провести многократные замеры при различном положении зонда, вычислялось среднее значение теплопроводности и стандартное отклонение. Плотность снега рассчитывалась по измерениям объема и массы пробы. Относительная погрешность оценки плотности не превышала 0.5 %. Для изготовления загрязненных проб использовался рыхлый зернистый снег из средней части снежной толщи. Согласно “Международной классификации для сезонно-выпадающего снега” [Фирц и др., 2012], он относился к классам *RG-FC* по морфологической классификации зерен и характеризовался значением 2 (*4F*) ручного индекса твердости. В холодных условиях в него добавляли поваренную соль, известково-доломитовую муку (<1.5 мм) или коры выветривания гранитов (<1.25 мм). Пробу перемешивали. Для получения загрязненных проб повышенной плотности пробу вынимали из морозильной камеры. Несколько минут при комнатной температуре и перемешивании было достаточно для оттаивания снега лишь на поверхности зерен, что позволяло легко утрамбовать пробу до необходимой плотности. По данным [Селезнев и др., 2018; Илгашева и др., 2020], доля твердой фракции в наиболее “грязных” пробах, отобранных с проезжих и пешеходных участков Екатеринбурга, не превышает 35 г/л воды (3.5 %), а на “чистых” участках – менее 1 г/л.

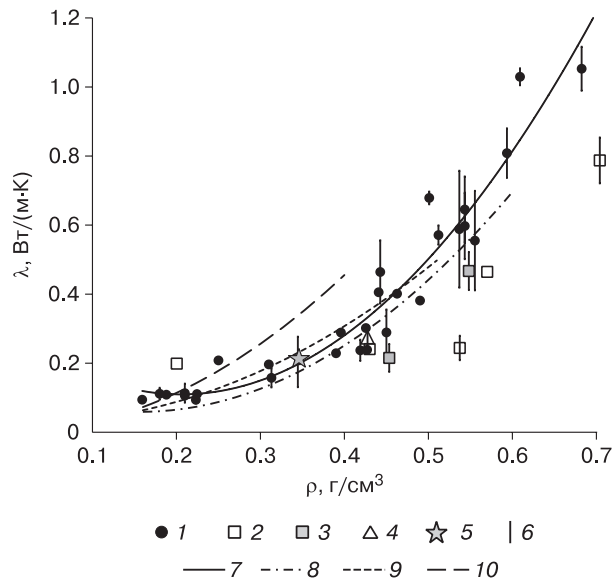


Рис. 3. Соотношение теплопроводности и плотности снега в Екатеринбурге.

1 – “чистый” снег; 2–5 – “грязный” (2 – кора выветривания гранитов, 3 – почва, 4 – известковая мука, 5 – NaCl); 6 – линии, ограничивающие диапазон (среднее ± стандартное отклонение); 7 – полиномиальная аппроксимация для “чистого снега”. Для сравнения приведены близкие зависимости других авторов: 8 – [Sturm et al., 1997]; 9 – [Domine et al., 2011]; 10 – зависимость Г.Ф. Абельса [Abels, 1892].

В подготовленных нами пробах содержание загрязнителей было намеренно завышено (от 7 до 15 %) – для более устойчивого проявления эффекта загрязнения.

Измерения высоты и плотности ненарушенной снежной толщи проводились в сезон 2023/24 г. на геотермическом полигоне Института геофизики УрО РАН в Екатеринбурге (см. рис. 2, б). Снегомерный участок расположен в черте Екатеринбурга, в 20 м от здания института и в 80 м от границы Юго-Западного лесопарка. Участок окружен деревьями, препятствующими ветровой эрозии. Для измерений высоты использовалась снегомерная рейка (см. рис. 2, в), плотности – весовой снегомер с объемом 380 см³.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СНЕГА

На рис. 3 приведены результаты измерений плотности (ρ , г/см³) и теплопроводности (λ , Вт/(м·К)) 25 проб “чистого” и 9 проб “грязного” снега. Общее количество измерений – 117. Аппроксимация экспериментальных данных полиномом второй степени

$$\lambda = 4.535\rho^2 - 1.87\rho + 0.30, \tag{1}$$

$$0.16 < \rho < 0.7, R^2 = 0.93$$

позволяет описать 93 % наблюдаемой дисперсии теплопроводности. Погрешность модели составляет 0.1 Вт/(м·К). Для сравнения: линейное приближение позволяет описать лишь 82 % дисперсии. Наиболее близки к ней обобщенная зависимость [Sturm et al., 1997] и зависимость для альпийского снега, полученная методом игольчатого зонда [Domine et al., 2011]. Расхождение с ними наблюдается при $\rho > 0.5$ г/см³, где полученная в настоящем исследовании кривая описывает более быстрый рост теплопроводности. Зависимость Г.Ф. Абельса [Abels, 1892] проходит выше нашей кривой на 0.1–0.2 Вт/(м·К) и ограничивает сверху отдельные выбросы полученных измерений.

Присутствие примесей в снеге в основном снижает его теплопроводность вне зависимости от состава. Наиболее заметно снижение теплопроводности при $\rho > 0.45$ г/см³. Однако, учитывая, что пробы “грязного” снега были подготовлены с заведомо завышенными содержаниями примесей, полагаем, что их реальные концентрации, если и изменяют теплопроводность, то в пределах погрешности модели.

При моделировании нестационарных процессов теплообмена в снежном покрове помимо теплопроводности необходимы данные о температуропроводности и тепловой активности. Коэффициент температуропроводности a контролирует амплитуду и фазу температурных колебаний в снежной толще в суточном цикле [Демежко, 2001;

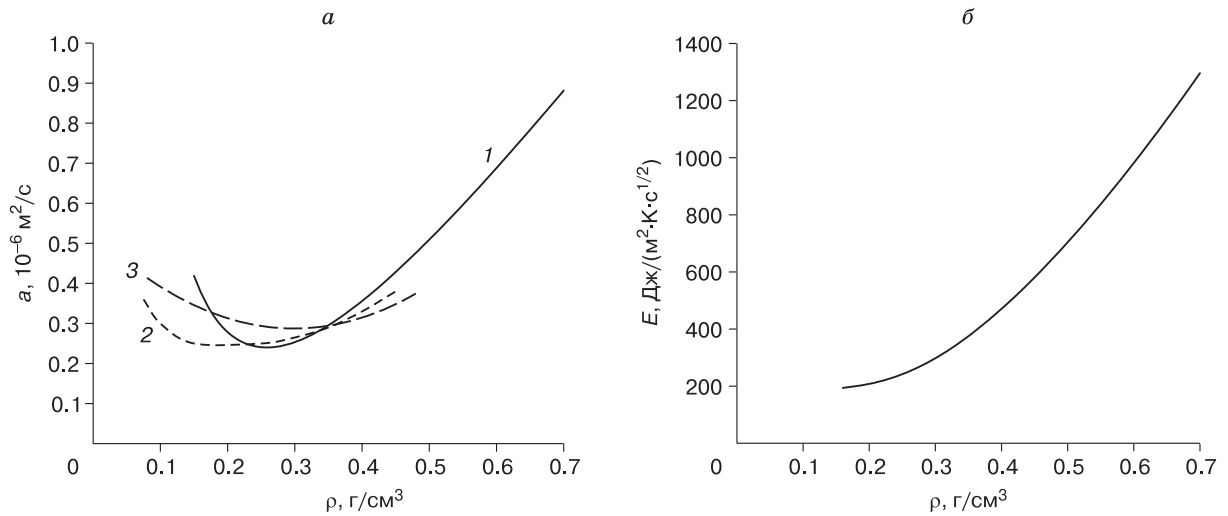


Рис. 4. Зависимости температуропроводности (а) и тепловой активности (б) от плотности снега.

1 – данные авторов; 2 – данные [Дьячкова, Серова, 1960]; 3 – полиномиальная аппроксимация данных из [Liu, Si, 2008].

Котляков и др., 2018; Kondrateva, 1954]. Коэффициент тепловой активности E (иногда его называют тепловой инерцией, а в зарубежной литературе принят термин *thermal effusivity*) определяет тем-

пературную реакцию поверхности при изменении поглощаемого средой теплового потока [Wang, Bras, 1999]. Чем выше тепловая инерция, тем медленнее нагревается поверхность при заданном

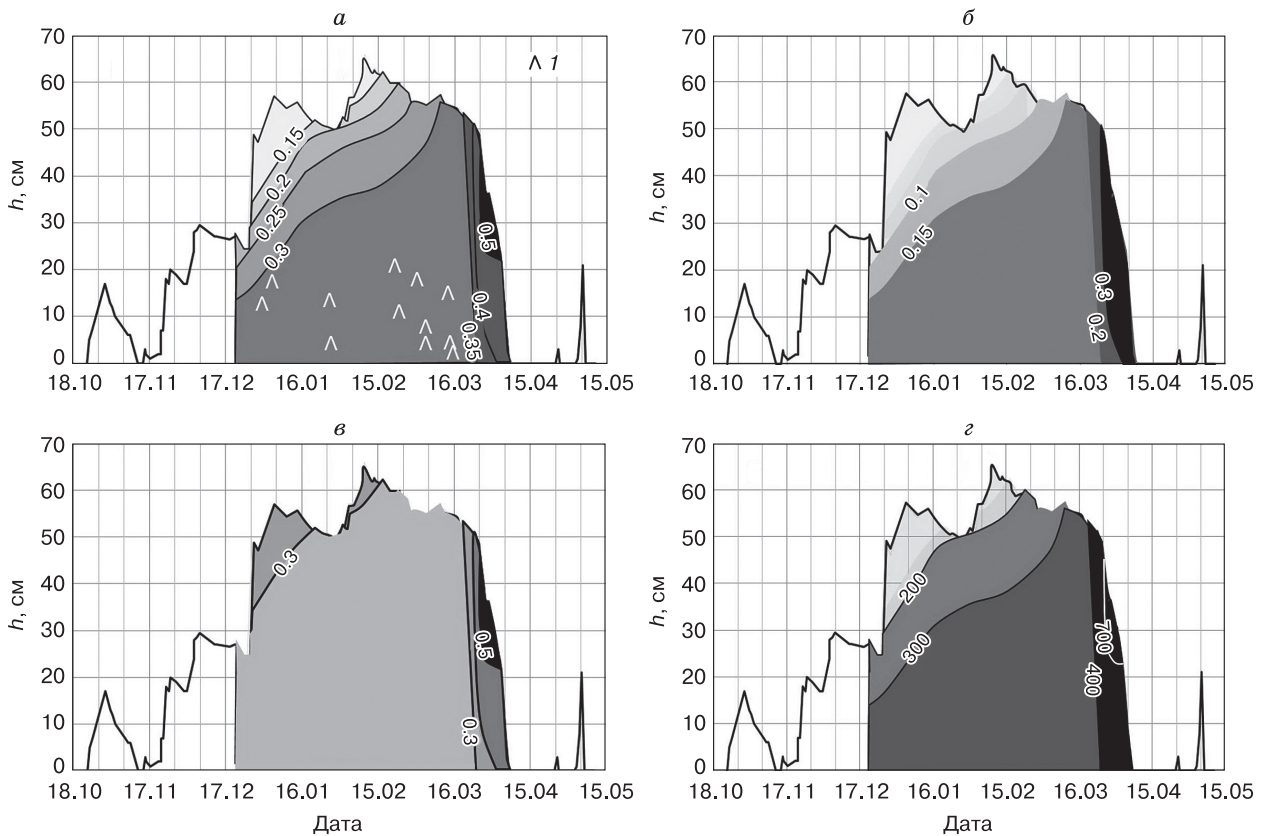


Рис. 5. Изменения высоты h , плотности ρ , теплопроводности λ , температуропроводности a и тепловой активности E по разрезу снежного покрова в сезоне 2023/24 г. в Екатеринбурге.

Изолинии величин: а – ρ , г/см³; б – λ , Вт/(м·К); в – a , 10⁻⁶ м²/с; з – E , Дж/(м²·К·с^{1/2}). 1 – прослойки глубинной изморози.

тепловом потоке на поверхности. Между перечисленными параметрами соблюдаются соотношения

$$a = \lambda/(\rho C); \quad (2)$$

$$E = (\lambda\rho C)^{1/2} = \lambda/a^{1/2}, \quad (3)$$

где C – удельная теплоемкость снега, которую, пренебрегая тепловыми свойствами и плотностью порового воздуха, можно считать равной удельной теплоемкости льда ($C_{\text{лед}} = 1972$ Дж/(кг·К) при -15°C [https://www.engineeringtoolbox.com]). Тогда из соотношений (1)–(3) получим

$$a = 2.30\rho - 0.947 + 0.153/\rho; \quad (4)$$

$$E = (8.944\rho^3 - 3.683\rho^2 + 0.596\rho)^{1/2}. \quad (5)$$

Здесь a измеряется в 10^{-6} м²/с, E измеряется в Дж/(м²·К·с^{1/2}). Зависимости (4), (5) приведены на рис. 4.

Устойчивый снежный покров в период сезона 2023/24 г. продержался с 23 октября по 5 апреля и достигал максимальной высоты 57–66 см в первой половине февраля (рис. 5). Большая часть снежной толщи была сложена рыхлым зернистым снегом (ручной индекс твердости 2 (4F)). Лишь 2–5 см верхнего слоя после снегопадов представляли свежавыпавший снег с плотностью <0.15 г/см³, а в интервале 0–20 см встречались прослой глубинной изморози с плотностью 0.25–0.28 г/см³, т. е. значительно уступающей плотности зернистого рыхлого снега на этой глубине (см. рис. 5, а). По данным о вертикальном распределении плотности с помощью соотношений (1), (4), (5) были рассчитаны распределения тепло- и температуропроводности, тепловой активности (см. рис. 5, б–г). На протяжении большей части сезона наблюдались медленные изменения теплофизических параметров. Наиболее однородна снежная толща по температуропроводности. На большей части разреза этот параметр находился вблизи минимума плотностной зависимости (4) и лежал в пределах 0.25–0.30 м²/с. Резкие изменения плотности и теплофизических параметров наблюдались с началом снеготаяния и уплотнения толщ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученная авторами зависимость теплопроводности от плотности проходит на 0.04–0.12 Вт/(м·К) выше усредненной по большому числу региональных данных зависимости М. Штурма [Sturm et al., 1997] и менее чем на 0.08 Вт/(м·К) ниже аналитической зависимости Н. Калонне с соавторами [Calonne et al., 2011]. В работе [Осокин и др., 2017], в которой проанализирована применимость разных зависимостей для определения коэффициента теплопроводности

снега, кривая М. Штурма оказалась близка к нижней огибающей совокупности рассмотренных зависимостей.

При малых плотностях теплопроводность снега почти не меняется. Но продифференцировав (1), обнаружим, что при $\rho = 0.206$ г/см³ существует слабый минимум функции $\lambda(\rho)$. Этот минимум не имеет физического объяснения, а является результатом формальной аппроксимации экспериментальных данных параболической зависимостью. Чтобы зависимость $\lambda(\rho)$ была монотонной, М. Штурм [Sturm et al., 1997] предлагает при малых плотностях аппроксимировать экспериментальные данные логарифмической или линейной зависимостью, а при более высоких – параболой. Следуя его предложению, авторы модифицировали выражение (1) в виде

$$\lambda = \begin{cases} 4.408\rho^2 - 1.706\rho + 0.26 & \text{при } 0.25 < \rho < 0.7, \\ 0.09\rho + 0.08 & \text{при } 0.16 < \rho < 0.25. \end{cases} \quad (6)$$

Однако большой практической ценности выражение (6) не имеет, поскольку изменения теплопроводности при малых плотностях невелико ($\Delta\lambda = 0.01$ Вт/(м·К) при 0.16 г/см³ < ρ < 0.25 г/см³). В отличие от теплопроводности, минимум зависимости температуропроводности снега от его плотности ($a = 0.24 \cdot 10^{-6}$ м²/с при $\rho = 0.26$ г/см³) весьма существен. Экстремальный характер зависимости $a(\rho)$ для снега отмечался, в частности, в работах [Дьячкова, Серова, 1960; Liu, Si, 2008]. Он объясняется тем, что при малых плотностях температуропроводность (числитель в соотношении (2)) остается почти неизменной, в то время как объемная теплоемкость (знаменатель) линейно растет. Зависимость тепловой активности от плотности монотонная. При увеличении плотности снега от 0.2 до 0.6 г/см³ тепловая активность возрастает в 5 раз. Соответственно, темпы нагрева поверхности, пропорциональные величине $1/E$, для уплотненного снега будут в 5 раз ниже, чем для рыхлого. Этим, к примеру, объясняется более медленное весеннее таяние плотного снега на тропинках.

Временные диаграммы теплофизических свойств по разрезу снежного покрова дают необходимую информацию для моделирования процессов теплообмена в снеге и верхней части грунтов. В работе [Демежко, 2001] описана математическая модель, позволяющая оценить влияние снежного покрова на среднегодовую температуру земной поверхности. Входными параметрами модели являются среднегодовая температура приземного воздуха T_0 , годовая амплитуда $D = (T_{\text{июл}} - T_{\text{январь}})/2$, максимальная декадная высота снежного покрова $h_{s-\text{max}}$, теплофизические свойства снега. Для климатических условий, зарегистрированных на центральной метеостанции Екатеринбург за 2019–2023 гг. ($T_0 = 4.5^\circ\text{C}$, $D = 16$ К)

[<http://www.pogodaiklimat.ru>], и усредненных за зимний период характеристик чистого снега ($\lambda = 0.15 \text{ Вт/(м·К)}$, $a = 0.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $h_{s-\text{max}} = 60 \text{ см}$) модель прогнозирует среднегодовую температуру земной поверхности на $\sim 1.5 \text{ К}$ выше среднегодовой температуры воздуха, т. е. около $6 \text{ }^\circ\text{C}$. Эта оценка близка к температуре ($5.5 \text{ }^\circ\text{C}$) на глубине 20 м в наблюдательной скважине, расположенной рядом с исследованным участком.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом игольчатого зонда в лабораторных условиях исследована зависимость теплопроводности от плотности чистого снега в Екатеринбурге. В диапазоне изменений плотности от 0.16 до 0.7 г/см^3 теплопроводность меняется от 0.1 до 1.2 Вт/(м·К) . С помощью параболической аппроксимации этой зависимости теплопроводность прогнозируется с погрешностью 0.1 Вт/(м·К) . При добавлении в снег типичных для города загрязнителей (глинистых минералов коры выветривания гранитов и габбро, почвы) теплопроводность уменьшается. Полевые исследования характеристик снежного покрова в Екатеринбурге в сезон 2023/24 г. позволили построить временные диаграммы изменений высоты и вертикального распределения плотности снега, а по этим данным оценить распределение тепловых свойств – теплопроводности, температуропроводности, тепловой активности. Полученные результаты могут быть полезны при моделировании температурного режима грунтов, в том числе дорожных покрытий, при разработке региональных климатических моделей, при оценке геотермического потенциала городских недр.

Исследование выполнено при финансировании Российского научного фонда (грант № 22-77-10018).

Литература

Борисов В.А., Акинин Д.В., Гасилова М.А., Романова А.Р. Теплопроводность снежного покрова и физические процессы, происходящие в нем под влиянием температурного градиента // Resources and Technology, 2023, т. XX, № 4, с. 45–73.

Демежко Д.Ю. Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). Екатеринбург, УрО РАН, 2001, 144 с.

Демежко Д.Ю., Горностаева А.А., Хацкевич Б.Д. и др. Новая модель формирования суточного цикла интенсивности городского острова тепла // Мониторинг, наука и технологии, 2022, № 4, с. 26–31.

Демежко Д.Ю., Горностаева А.А., Хацкевич Б.Д. и др. Подземный городской остров тепла Екатеринбурга // Литосфера, 2024, т. XXIV, № 3, с. 566–581.

Дьячкова Т.В., Серова Н.В. Теплофизические свойства снега // Тр. ГГО, 1960, № 94, с. 76–79.

Илгашева Е.О., Яρμοшенко И.В., Селезнев А.А., Малиновский Г.П. Снегогрязевая пульпа как индикатор эколо-

гических и седиментационных процессов в городской среде // Минералы: строение, свойства, методы исследования, 2020, № 11, с. 106–107.

Котляков В.М., Сосновский А.В., Осокин Н.И. Оценка коэффициента теплопроводности снега по его плотности и твердости на Западном Шпицбергене // Лед и снег, 2018, т. 58, № 3, с. 343–352.

Куваева Г.М. Физические свойства снежного покрова Большого Кавказа / Г.М. Куваева, Г.К. Сулаквелидзе. М., Наука, 1967, 193 с.

Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В. и др. К оценке влияния изменчивости характеристик снежного покрова на промерзание грунтов // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 1, с. 3–10.

Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В., Сократов С.А. О роли некоторых природных факторов в промерзании грунтов // Материалы гляциол. исслед., 2000, № 88, с. 41–45.

Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 60–68.

Павлов А.В. Исследование теплового баланса и теплофизических свойств снежного покрова в районе Загорска в период МГГ // Материалы гляциол. исслед., 1960, № 4, с. 109–118.

Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск, Наука, 1979, 282 с.

Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск, Акад. изд-во “Гео”, 2008, 229 с.

Селезнев А.А., Яρμοшенко И.В., Малиновский Г.П., Баглаева Е.М. Оценка запасов современных пылегрязевых отложений на урбанизированной территории (на примере г. Екатеринбурга) // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, 2018, № 3, с. 74–85.

Фирц Ш., Армстронг Р.Л., Дюран И. и др. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова). Рус. изд. // Материалы гляциол. исслед., 2012, № 2, 80 с.

Чернов Р.А. Экспериментальное определение эффективной теплопроводности глубинной изморози // Лед и снег, 2013, т. 53, № 3, с. 71–77.

Abels H.F. Beobachtungen der taglichen Periode der Temperatur im Schnee und Bestimmung des Wärmeleitungsvermögens des Schnees als Function seiner Dichtigkeit // Akad. Wissensch., Rep. Meteorologie, 1892, vol. XVI, p. 1–53.

Aggarwal R.K., Negi P.S., Satyawali P.K. New density-based thermal conductivity equation for snow // Defence Sci. J., 2009, vol. LIX, No. 2, p. 126.

Byrne G.F., Davis J.R. Thermal inertia, thermal admittance, and the effect of layers // Remote Sens. Environ., 1980, vol. IX, No. 4, p. 295–300.

Calonne N., Flin F., Morin S. et al. Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow // Geophys. Res. Lett., 2011, vol. XXXVIII, No. 23, p. 1–6.

Carnahan W.H., Larson R.C. An analysis of an urban heat sink // Remote Sens. Environ., 1990, vol. XXXIII, No. 1, p. 65–71.

Domine F., Bock J., Morin S., Giraud G. Linking the effective thermal conductivity of snow to its shear strength and density // J. Geophys. Res.: Earth Surface, 2011, vol. CXVI, No. F4, p. 1–10.

Fourteau K., Hagenmuller P., Roule J., Domine F. On the use of heated needle probes for measuring snow thermal conductivity // J. Glaciol., 2022, vol. LXVIII, No. 270, p. 705–719.

Furberg A., Arvidsson R., Molander S. Dissipation of tungsten and environmental release of nanoparticles from tire studs: A Swedish case study // *J. Clean. Product.*, 2019, vol. XX, p. 920–928.

Goward S.N. Thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island // *Phys. Geogr.*, 1981, vol. II, No. 1, p. 19–33.

Jansson M. Über die Wärmeleitungsfähigkeit des Schnees // *Ofversigt K. Vetenskapsakad. Forh.*, 1901, vol. LVIII, p. 207–222.

Kondrateva A.S. Thermal conductivity of the snow cover and physical processes caused by the temperature gradient // *Snow, Ice and Permaf. Res. Establishment*, 1954, vol. XXII, p. 14–28.

Lange M.A. Measurements of thermal parameters in Antarctic snow and firn // *Ann. Glaciol.*, 1985, vol. 6, p. 100–104.

Liu G., Si B.C. Dual-probe heat pulse method for snow density and thermal properties measurement // *Geophys. Res. Lett.*, 2008, vol. XXXV, No. 16, p. 1–5.

Lygren E., Gjessing E., Berglund L. Pollution transport from a highway // *Sci. Total Environ.*, 1984, vol. 33, p. 147–159.

Macfarlane A.R., Lowe H., Gimenes L. et al. Temporospatial variability of snow's thermal conductivity on Arctic sea ice // *The Cryosphere*, 2023, vol. XVII, No. 12, p. 5417–5434.

Mohajerani A., Bakaric J., Jeffrey-Bailey T. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete // *J. Environ. Managem.*, 2017, vol. CXCVII, p. 522–538.

Ostin R., Andersson S. Frost growth parameters in a forced air stream // *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1991, vol. 34, No. 4/5, p. 1009–1017.

Pringle D.J., Eicken H., Trodahl H.J., Backstrom L.G.E. Thermal conductivity of landfast Antarctic and Arctic sea ice // *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2007, vol. CXII, No. C4, p. 1–13.

Riche F., Schneebeli M. Thermal conductivity of snow measured by three independent methods and anisotropy considerations // *The Cryosphere*, 2013, vol. VII, No. 1, p. 217–227.

Slater A.G., Lawrence D.M., Koven C.D. Process-level model evaluation: a snow and heat transfer metric // *The Cryosphere*, 2017, vol. 11, No. 2, p. 989–996.

Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow // *J. Glaciol.*, 1997, vol. XLIII, No. 143, p. 26–41.

Wang J., Bras R.L. Ground heat flux estimated from surface soil temperature // *J. Hydrol.*, 1999, vol. CCXVI, p. 214–226.

Westerlund C., Viklander M. Particles and associated metals in road runoff during snowmelt and rainfall // *Sci. Total Environ.*, 2006, vol. CCCLXII, p. 143–156.

Yen Y.C. Effective thermal conductivity and water vapor diffusivity of naturally compacted snow // *J. Geophys. Res.*, 1965, vol. LXX, No. 8, p. 1821–1825.

Yosida Z. Physical Studies on Deposited Snow. I. Thermal Properties // *Contributions from the Institute of Low Temperature Science*, 1955, vol. VII, p. 19–74.

Zhang T. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview // *Rev. Geophys.*, 2005, vol. XLIII, No. 4, p. 1–23.

URL: <https://www.interpribor.ru> [официальный сайт Научно-производственного предприятия “ИНТЕРПРИБОР”, г. Челябинск] (дата обращения: 24.11.2024).

URL: <https://www.engineeringtoolbox.com> – The Engineering ToolBox [Электрон. ресурс – инж. справ.] (дата обращения: 24.11.2024).

URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> [сайт “Погода и климат”] (дата обращения: 24.11.2024).

Reference

Borisov V.A., Akinin D.V., Gasilina M.A., Romanova A.R. Thermal conductivity of snow cover and physical processes occurring in it under the influence of temperature gradient. *Resources and Technology*, 2023, vol. XX, No. 4, p. 45–73. DOI: 10.15393/j2.art.2023.7243.

Demezhko D.Yu. Geotermicheskiy metod rekonstrukcii paleoklimata (na primere Urala) [Geothermal method for paleoclimate reconstruction (examples from the Urals, Russia)]. Yekaterinburg, UB RAS, 2001, 144 p. (in Russian).

Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Khatskevich B.D. et al. A new model for the formation of the diurnal cycle of the urban heat island intensity. *Monitoring, nauka i tekhnologii [Monitoring. Science & Technologies]*, 2022, vol. IX, No. 4, p. 26–31. – doi.org/10.25714/MNT.2022.54.004

Demezhko D.Yu., Gornostaeva A.A., Khatskevich B.D. et al. Subsurface urban heat island in the city of Yekaterinburg. *Litosfera [Lithosphere]*, 2024, vol. XXIV, No. 3, p. 566–581. DOI: 10.24930/2500-302X-2024-24-3-566-581.

D'yachkova T.V., Serova N.V. Thermophysical properties of snow. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 1960, No. 94, p. 76–79.

Ilgasheva E.O., Yarmoshenko I.V., Seleznev A.A., Malinovskii G.P. Snow-mud pulp as an indicator of ecological and sedimentation processes in urban environment. In: *Mineraly: stroenie, svoystva, metody issledovaniya [Minerals: structure, properties, research methods]*, 2020, No. 11, p. 106–107. (in Russian).

Kotlyakov V.M., Sosnovskii A.V., Osokin N.I. Estimation of snow thermal conductivity coefficient by its density and hardness on West Spitsbergen. *Led i sneg [Ice and Snow]*, 2018, vol. 58, No. 3, p. 343–352. – doi.org/10.15356/2076-6734-2018-3-343-352

Kuvaeva G.M., Sulakvelidze G.K. *Fizicheskie svoystva snezhnogo pokrova Bol'shogo Kavkaza [Physical properties of the snow cover of the Greater Caucasus]*. Moscow, Nauka, 1967, 193 p. (in Russian).

Osokin N.I., Samoilov R.S., Sosnovskii A.V. et al. On estimation of the influence of snow cover characteristics variability on soils freezing. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 1999, vol. III, No. 1, p. 3–10.

Osokin N.I., Samoilov R.S., Sosnovskii A.V., Sokratov S.A. On the role of some natural factors in ground freezing. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Data of Glaciological Studies]*, 2000, No. 88, p. 41–45.

Osokin N.I., Sosnovskii A.V., Chernov R.A. Effective thermal conductivity of snow and its variations. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, No. 3, p. 55–61.

Pavlov A.V. Study of the heat balance and thermophysical properties of the snow cover in the Zagorsk. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Data of Glaciological Studies]*, 1960, No. 4, p. 109–118.

Pavlov A.V. *Teplofizika landshaftov [Thermal physics of landscapes]*. Novosibirsk, Nauka, 1979, 282 p. (in Russian).

Pavlov A.V. *Monitoring kriolitozony [Monitoring of the cryolithozone]*. Novosibirsk, GEO, 2008, 229 p. (in Russian).

Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Malinovskii G.P., Baglaeva E.M. Total amount of contemporary dirt and dust sediments in an urban environment (on the example of Ekaterinburg, Russia). In: *Biosfernaya sovmestimost': chelovek, region, tekhnologii [Biosphere compatibility: human, region, technologies]*, 2018, No. 3, p. 74–84 (in Russian).

Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y. et al. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground: IHP-VII

- Technical Documents in Hydrology No. 83: IACS Contribution No. 1. Paris, UNESCO-IHP, 2009, 90 p.
- Chernov R.A. Experimental estimation of effective thermal conductivity of depth hoar. *Led i sneg [Ice and Snow]*, 2013, vol. III, No. 123, p. 71–77.
- Abels H.F. Beobachtungen der taglichen Periode der Temperatur im Schnee und Bestimmung des Wärmeleitungsvermögens des Schnees als Function seiner Dichtigkeit. *Akad. Wissensch., Rep. Meteorologie*, 1892, vol. XVI, p. 1–53.
- Aggarwal R.K., Negi P.S., Satyawali P.K. New density-based thermal conductivity equation for snow. *Defence Sci. J.*, 2009, vol. LIX, No. 2, p. 126.
- Byrne G.F., Davis J.R. Thermal inertia, thermal admittance, and the effect of layers. *Remote Sens. Environ.*, 1980, vol. IX, No. 4, p. 295–300.
- Calonne N., Flin F., Morin S. et al. Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow. *Geophys. Res. Lett.*, 2011, vol. XXXVIII, No. 23, p. 1–6. DOI: 10.1029/2011GL049234.
- Carnahan W.H., Larson R.C. An analysis of an urban heat sink. *Remote Sens. Environ.*, 1990, vol. XXXIII, No. 1, p. 65–71. – doi.org/10.1016/0034-4257(90)90056-r
- Domine F., Bock J., Morin S., Giraud G. Linking the effective thermal conductivity of snow to its shear strength and density. *J. Geophys. Res.: Earth Surface*, 2011, vol. CXVI, No. F4, p. 1–10. – doi:10.1029/2011JF002000
- Fourteau K., Hagenmuller P., Roulle J., Domine F. On the use of heated needle probes for measuring snow thermal conductivity. *J. Glaciol.*, 2022, vol. LXVIII, No. 270, p. 705–719. – doi.org/10.1017/jog.2021.127
- Furberg A., Arvidsson R., Molander S. Dissipation of tungsten and environmental release of nanoparticles from tire studs: A Swedish case study. *J. Clean. Product.*, 2019, vol. XX, p. 920–928. – doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.004
- Goward S.N. Thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island. *Phys. Geogr.*, 1981, vol. II, No. 1, p. 19–33.
- Jansson M. Über die Wärmeleitungsfähigkeit des Schnees. *Översigt K. Vetenskapsakad. Forh.*, 1901, vol. LVIII, p. 207–222.
- Kondrateva A.S. Thermal conductivity of the snow cover and physical processes caused by the temperature gradient. *Snow, Ice and Permafrost. Res. Establishment*, 1954, vol. XXII, p. 14–28.
- Lange M.A. Measurements of thermal parameters in Antarctic snow and firn. *Ann. Glaciol.*, 1985, vol. VI, p. 100–104. – doi.org/10.3189/1985AoG6-1-100-104
- Liu G., Si B.C. Dual-probe heat pulse method for snow density and thermal properties measurement. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, vol. XXXV, No. 16, p. 1–5. – doi.org/10.1029/2008GL034897
- Lygren E., Gjessing E., Berglind L. Pollution transport from a highway. *Sci. Total Environ.*, 1984, vol. XXXIII, p. 147–159. – doi.org/10.1016/0048-9697(84)90389-9
- Macfarlane A.R., Lowe H., Gimenes L. et al. Temporospatial variability of snow's thermal conductivity on Arctic sea ice. *The Cryosphere*, 2023, vol. XVII, No. 12, p. 5417–5434. – doi.org/10.5194/tc-17-5417-2023
- Mohajerani A., Bakaric J., Jeffrey-Bailey T. The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *J. Environ. Manage.*, 2017, vol. 197, p. 522–538. – doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.095
- Ostin R., Andersson S. Frost growth parameters in a forced air stream. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1991, vol. XXXIV, No. 4/5, p. 1009–1017.
- Pringle D.J., Eicken H., Trodahl H.J., Backstrom L.G.E. Thermal conductivity of landfast Antarctic and Arctic sea ice. *J. Geophys. Res.: Oceans*, 2007, vol. CXII, No. C4, p. 1–13.
- Riche F., Schneebeli M. Thermal conductivity of snow measured by three independent methods and anisotropy considerations. *The Cryosphere*, 2013, vol. VII, No. 1, p. 217–227. – doi.org/10.5194/tc-7-217-2013
- Slater A.G., Lawrence D.M., Koven C.D. Process-level model evaluation: a snow and heat transfer metric. *The Cryosphere*, 2017, vol. XI, No. 2, p. 989–996. – doi.org/10.5194/tc-11-989-2017
- Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow. *J. Glaciol.*, 1997, vol. XLIII, No. 143, p. 26–41. – doi.org/10.3189/S0022143000002781
- Wang J., Bras R.L. Ground heat flux estimated from surface soil temperature. *J. Hydrol.*, 1999, vol. CCXVI, p. 214–226. – doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00008-6
- Westerlund C., Viklander M. Particles and associated metals in road runoff during snowmelt and rainfall. *Sci. Total Environ.*, 2006, vol. CCCLXII, p. 143–156. – doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.06.031
- Yen Y.C. Effective thermal conductivity and water vapor diffusivity of naturally compacted snow. *J. Geophys. Res.*, 1965, vol. LXX, No. 8, p. 1821–1825. – doi.org/10.1029/JZ070i008p01821
- Yosida Z. Physical Studies on Deposited Snow. I. Thermal Properties. In: *Contributions from the Institute of Low Temperature Science*, 1955, vol. VII, p. 19–74.
- Zhang T. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Rev. Geophys.*, 2005, vol. XLIII, No. 4, p. 1–23. – doi.org/10.1029/2004RG000157
- URL: <https://interpribor.com> – INTERPRIBOR, Chelyabinsk, Russian Federation (last visited: 24.11.2024).
- URL: <https://www.engineeringtoolbox.com> – The Engineering ToolBox (last visited: 24.11.2024).
- URL: <http://www.pogodaiklimat.ru> – “Pogoda i klimat” (last visited: 24.11.2024).

*Поступила в редакцию 21 октября 2024 г.,
после доработки – 25 ноября 2024 г.,
принята к публикации 11 февраля 2025 г.*