

ГРУНТОВЕДЕНИЕ И МЕХАНИКА ГРУНТОВ

УДК 550.362

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ГОРОДСКИХ РЫХЛЫХ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ПОКРЫТИЙ

© 2025 г. Д. Ю. Демежко^{1,*}, Н. Р. Факаева¹, А. А. Горностаева¹, Б. Д. Хацкевич¹

¹Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН,
ул. Амундсена 100, Екатеринбург, 620016 Россия

*E-mail: ddem54@inbox.ru

Поступила в редакцию 03.02.2025 г.

После доработки 06.02.2025 г.

Принята к публикации 21.04.2025 г.

Методом игольчатого зонда исследована теплопроводность проб некоторых рыхлых приповерхностных отложений и покрытий в Екатеринбурге, в том числе глинисто-древянистых кор выветривания гранитов и ультраосновных пород, гранитного отсева, кварцевого песка, а также дробленого пьезокварца. Одновременно исследовались влажность и гранулометрический состав. При увеличении влажности от 2–3% до 20–25% теплопроводность возрастает от 0.18–0.3 до 1.2–2.0 Вт·м⁻¹·К⁻¹. Для многих проб характерна S-образная зависимость теплопроводности от влажности, включающая начальный участок медленного роста теплопроводности, участок более быстрого роста и выполаживание зависимости при приближении к максимальному насыщению. Полученные экспериментальные данные аппроксимированы с помощью соотношения, использующего приближение эффективной среды на основе теории перколяции (percolation-based effective medium approximation — Р-ЕМА). Погрешность аппроксимации составила 0.08–0.26 Вт·м⁻¹·К⁻¹. Параметр “критическая влажность” в приближении Р-ЕМА определяет положение перегиба кривой. Установлено, что критическая влажность увеличивается с ростом содержания наиболее мелкодисперсных фракций — глинистых и пылеватых. Данные о теплопроводности рыхлых приповерхностных отложений могут быть полезны при расчетах теплообмена на городских поверхностях, например, в рамках исследований городского острова тепла.

Ключевые слова: *рыхлые приповерхностные отложения, теплопроводность, влажность, гранулометрический состав, перколяция*

DOI: 10.31857/S0869780925020071 EDN: EPZEGJ

ВВЕДЕНИЕ

Тепловой баланс между атмосферой и земной поверхностью, во многом определяющий региональный и локальный климат [4, 6, 9, 10], зависит от тепловых свойств природных или искусственных материалов, слагающих земную поверхность. Города, значительную часть площадей которых занимают твердые искусственные покрытия (асфальт, бетон), формируют свой микроклимат, известный как феномен городского острова тепла [4, 10]. Тепловые свойства твердых искусственных покровов хорошо изучены и широко используются при моделировании городских островов [6, 3, 9]. Менее изучены рыхлые приповерхностные отложения — почвы, неконсолидированные осадочные породы, коры выветривания коренных пород,

песчано-гравийные покрытия парковых дорожек, хотя они занимают значительную часть территории городов, их окраин и новостроек. И даже будучи перекрыты искусственными материалами, они участвуют в городском теплообмене, поскольку суточная температурная волна распространяется до 30–50 см на глубину, а годовая — до 15–20 м [2]. В отличие от твердых влагонепроницаемых материалов их тепловые свойства сильно меняются в зависимости от влагонасыщенности и фазового состояния воды.

Цель работы — экспериментальное исследование теплопроводности рыхлых приповерхностных отложений и покрытий, широко представленных в городской среде Екатеринбурга, рассмотрение

теоретических зависимостей для аппроксимации экспериментальных данных.

Екатеринбург расположен на восточном склоне Уральского хребта, на рубеже восточных предгорий Среднего Урала и Зауральской складчатой возвышенности. Породы коренной основы представлены палеозойскими вулканогенными, вулканогенно-осадочными и метаморфическими комплексами основного состава. Широко развиты интрузивные массивы: габбровой и гранитоидной формаций. Коренные породы в пределах города иногда выходят на поверхность, но в основном перекрыты отложениями различных генетических типов. Ведущая роль среди приповерхностных образований принадлежит корам физического и химического выветривания [1]. Мощность кор выветривания колеблется от первых до десятков метров. Маломощный (5–10 см) дерновый слой сохраняется в лесопарковых зонах и на газонах.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ОТ ВЛАЖНОСТИ

Теплопроводность рыхлых отложений определяется сложным взаимодействием между структурами порового пространства и твердой матрицы. При этом, как показывает опыт многих исследователей, по мере увеличения содержания воды от сухой среды до полностью насыщенной теплопроводность возрастает.

В простейшем случае, когда среда состоит из двух компонент с различными свойствами (λ_1 и λ_2), ее эффективная теплопроводность при разных соотношениях компонент лежит в пределах между λ_1 и λ_2 . Сложнее оценить поведение кривой эффективной теплопроводности между этими крайними точками. Для среды, состоящей из параллельных пластин, если тепловой поток направлен перпендикулярно пластинам, эффективная теплопроводность равна среднему взвешенному гармоническому:

$$\lambda = [k / \lambda_1 + (1 - k) / \lambda_2]^{-1}, \quad (1)$$

где $0 < k < 1$ — доля первой компоненты, и среднему взвешенному арифметическому, если поток направлен параллельно пластинам:

$$\lambda = k\lambda_1 + (1 - k)\lambda_2. \quad (2)$$

При любой другой структуре среды зависимости будут сложнее. Среднее арифметическое ограничивает сверху диапазон возможных значений теплопроводности, среднее гармоническое — снизу (рис. 1).

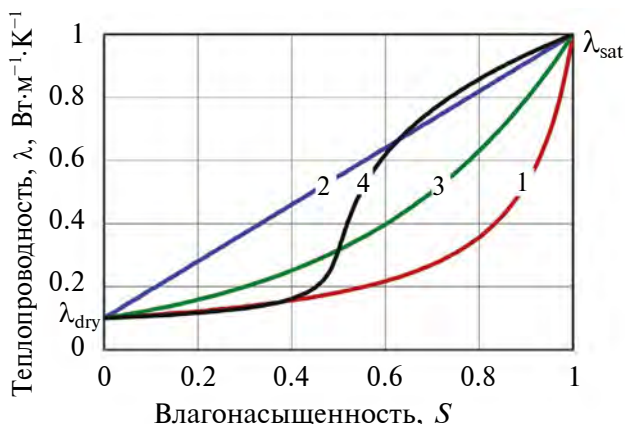


Рис. 1. Теоретические зависимости теплопроводности рыхлых материалов от влагонасыщенности. Номера кривых соответствуют номерам зависимостей (1–4).

Авторы [11] полагают, что среднее геометрическое:

$$\lambda = \lambda_1^k \lambda_2^{(1-k)}, \quad (3)$$

применимо как для сред с твердыми компонентами, в том числе с зернистой структурой, так и для пористых водонасыщенных сред. Sepaskhah and Boersma [12], исследовав теплопроводность образцов суглинков и супесей, обнаружили, что существует порог влагонасыщенности, ниже которого эффективная теплопроводность почти не зависит от содержания воды. Многие экспериментальные исследования позже подтвердили слабую зависимость теплопроводности от влажности при малых значениях последней для песчаных и глинистых грунтов. Был предложен ряд эмпирических и квазифизических моделей для описания влияния влагонасыщенности на теплопроводность пористых материалов, но большинство этих моделей хорошо согласуется с эмпирическими данными выше некоторого порога влагонасыщенности. Лишь некоторые, не имея физического обоснования, позволяли описать поведение всей кривой теплопроводности/влажность (например, [7, 8]). Ghanbarian and Daigle [5], рассмотрев большое число таких моделей, предложили аппроксимирующие зависимости, использующие приближения эффективной среды на основе теории перколяции (percolation-based effective medium approximation — P-EMA). Концепция критической объемной доли хорошо известна как порог перколяции в рамках теории перколяции (просачивания).

Рассмотрим несколько упрощенно проявление эффекта перколяции применительно к нашему случаю трехкомпонентной среды, включающей высокотеплопроводные минеральные зерна, воду и воздух с очень низкой теплопроводностью.

Теплопроводность сухой породы обусловлена большим количеством воздуха в порах и плохими тепловыми контактами между зернами. Добавление в такую среду небольшого количества воды улучшает тепловые контакты между зернами, образуя конечные проводящие кластеры. Однако между кластерами остаются пустоты/поры, в которых вода отсутствует, и эффективную теплопроводность определяют свойства низкотеплопроводной фазы. Эта часть зависимости описывается уравнением (1). С ростом содержания воды проводящие кластеры охватывают все большее пространство и в некоторый момент начинают пронизывать весь объем. Здесь происходит резкое увеличение эффективной теплопроводности. При дальнейшем увеличении содержания воды кривая выполаживается, поскольку вода имеет более низкую теплопроводность по сравнению с минеральным скелетом. Эта финальная часть зависимости описывается уравнением (2) (см. рис. 1).

Для аппроксимации эмпирических данных теплопроводность/влажность в [5] была предложена следующая зависимость:

$$W = \frac{(\lambda^{1/p} - \lambda_d^{1/p}) [W_c \lambda_s^{1/p} + (\phi - W_c) \lambda^{1/p}]}{(\lambda_s^{1/p} - \lambda_d^{1/p}) \lambda^{1/p}}, \quad (4)$$

где W — объемная влажность, равная отношению объема воды в пробе к объему пробы, W_c — критическая объемная влажность, $\lambda = \lambda(W)$ — эффективная теплопроводность, λ_d — теплопроводность сухого грунта (поры заполнены воздухом), λ_s — теплопроводность влажного грунта (поры полностью заполнены жидкостью), ϕ — коэффициент пористости, p — параметр масштабирования. Зависимости теплопроводности от объемной влажности, нормированной на пористость $\lambda(W/\phi)$, или от степени насыщения пор водой, $S = W/\phi$, приведены на рис. 2. Параметр масштабирования

p в соответствии с теорией перколяции задает степенной закон изменения $\lambda(W - W_c)$ вблизи порога перколяции W_c [5]. Иными словами, он определяет масштаб перехода от нижней предельной зависимости (1) к верхней (2). Критическая влагонасыщенность S_c (или влажность $W_c = S_c \phi$) отмечает начальную фазу более интенсивного изменения теплопроводности.

Зависимость (4) можно использовать и в том случае, когда вместо объемной влажности W измеряется массовая влажность W_m , равная отношению массы влаги к массе сухого вещества пробы $W_m = M_w/M_{dry}$. Между ними существует простое соотношение $W = W_m \cdot \rho_{dry}/\rho_w$, где ρ_{dry} и ρ_w — плотности сухой пробы и воды. В этом случае вместо коэффициента пористости используется показатель максимальной массовой влажности W_m^{max} (все поры заняты водой), а вместо критической объемной влажности — критическая массовая W_{mc} :

$$W_m = \frac{(\lambda^{1/p} - \lambda_d^{1/p}) [W_{mc} \lambda_s^{1/p} + (W_m^{max} - W_{mc}) \lambda^{1/p}]}{(\lambda_s^{1/p} - \lambda_d^{1/p}) \lambda^{1/p}}. \quad (5)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Для измерений теплопроводности и влажности использовались пробы природного происхождения, а также искусственно полученные путем дробления горных пород. Проба дисперсного материала (4–6 кг) высушивалась при температуре 100–120°C. С помощью набора сит с ячейками 40, 20, 15, 10, 5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315 и 0.16 мм определялся гранулометрический состав пробы. Затем все компоненты ситового анализа перемешивались. Теплопроводность высушенной пробы в 5-литровом контейнере измерялась методом игольчатого зонда с помощью зондового устройства МИТ-1 (www.interpribor.ru) согласно

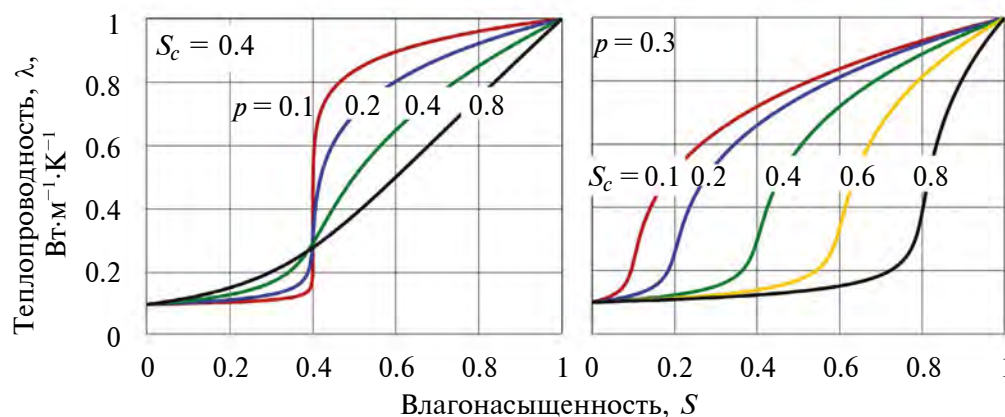


Рис. 2. Теоретические зависимости теплопроводности рыхлых материалов от влагонасыщенности в соответствии с (4) при различных параметрах масштабирования p и критической влагонасыщенности S_c .

ГОСТ 30256-94. Для определения массовой влажности использовался диэлькометрический зондовый влагомер ВИМС-2.21 (www.interpribor.ru). Затем в пробу добавлялась вода, материал тщательно перемешивался и отстаивался в течение нескольких часов. После чего проводился следующий цикл измерений. Влажность увеличивали до тех пор, пока не начинал увеличиваться объем пробы (набухание тонкодисперсных материалов), или пока свободная вода не появлялась над поверхностью пробы (крупнозернистые материалы). Выполнено 315 измерений для 10 проб. Параметры p и W_{mc} в уравнении (5) подбирались из условия минимизации среднеквадратической погрешности аппроксимации σ . Характеристики исследованных проб приведены в табл. 1, интегральные кривые гранулометрического состава — на рис. 3, зависимости теплопроводности от влажности и их аппроксимации в соответствии с (5) — на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Теплопроводность исследованных проб в диапазоне массовой влажности 2–25% лежит в пределах $0.18\text{--}2\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$. Для всех проб теплопроводность увеличивается с ростом влажности. Для многих характерен отмеченный выше участок слабой зависимости теплопроводности от влажности. Максимальное значение $W_{mc} = 17.5\%$ наблюдается у глинисто-дресвянистой коры выветривания габбро (проба №5), содержащей большую долю

мелких фракций (см. рис. 3). Еще больше таких фракций — в пробе гранитного отсева-II (№4), однако критическая влажность при этом ниже ($W_{mc} = 5.0\%$). Можно заметить, что кривая $\lambda(W_m)$ пробы №4 имеет два субгоризонтальных участка: первый — до 5.0% , второй — от 8 до 12% , а гистограмма гранулометрического состава — соответственно два максимума. Вероятно, крупные фракции определяют первое значение критической влажности ($W_{mc} = 5.0\%$), а наиболее мелкие — второе ($W_{mc} \approx 13\%$). Впрочем, это лишь качественное объяснение, поскольку влияния отдельных фракций не аддитивны. Минимальной критической влажностью ($W_{mc} \approx 2\%$) и, одновременно, минимальным значением параметра масштабирования ($p = 0.19$) характеризуется проба отсортированного дробленого пьезокварца (№6) с размерами частиц от 0.65 до 4 мм . Сами кристаллы пьезокварца обладают высокой теплопроводностью ($\lambda_{\parallel} = 9.5\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$, $\lambda_{\perp} = 6.1\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$), но из-за плохих тепловых контактов между обломками теплопроводность сухой пробы мала ($\lambda = 0.19\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$). Поскольку кварц — гидрофильный минерал, то даже небольшое количество воды распределяется на контактах между обломками, резко уменьшая тепловое сопротивление и создавая обширные кластеры. Поэтому наблюдается быстрый рост теплопроводности пробы. Однако вскоре (при $W_{mc} > 5\%$) рост теплопроводности замедляется, поскольку теплопроводность воды намного ниже ($\lambda = 0.6\text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$) теплопроводности скелета.

Таблица 1. Характеристики исследованных проб и параметры аппроксимации

№	Состав пробы	К-во измере- ний	Параметры аппроксимации					
			λ_d	λ_s	W_m^{max}	W_{mc}	p	σ
			Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹		%			Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹
1	Кварцевый песок	34	0.23	2.95	49	3.6	0.35	0.13
2	Отсев жильного кварца	28	0.18	2.06	47	2.5	0.26	0.26
3	Гранитный отсев-I	39	0.22	2.00	49	3.8	0.33	0.10
4	Гранитный отсев-II	31	0.21	2.15	50	5.0	0.40	0.10
5	Отсев пьезокварца	25	0.19	2.25	45	2.3	0.19	0.14
6	Глинисто-дресвянистая кора выветривания габбро	34	0.22	1.3	46	17.5	0.29	0.08
7	Кора выветривания гранитов-I	35	0.26	2.02	44	7.8	0.29	0.16
8	Кора выветривания гранитов-II	27	0.18	2.06	39	5.0	0.46	0.15
9	(№7+№8), фракция <2.5 мм	35	0.19	2.00	47	7.0	0.33	0.11
10	(№7+№8), фракция >2.5 мм	27	0.07	2.20	30	4.0	0.85	0.09

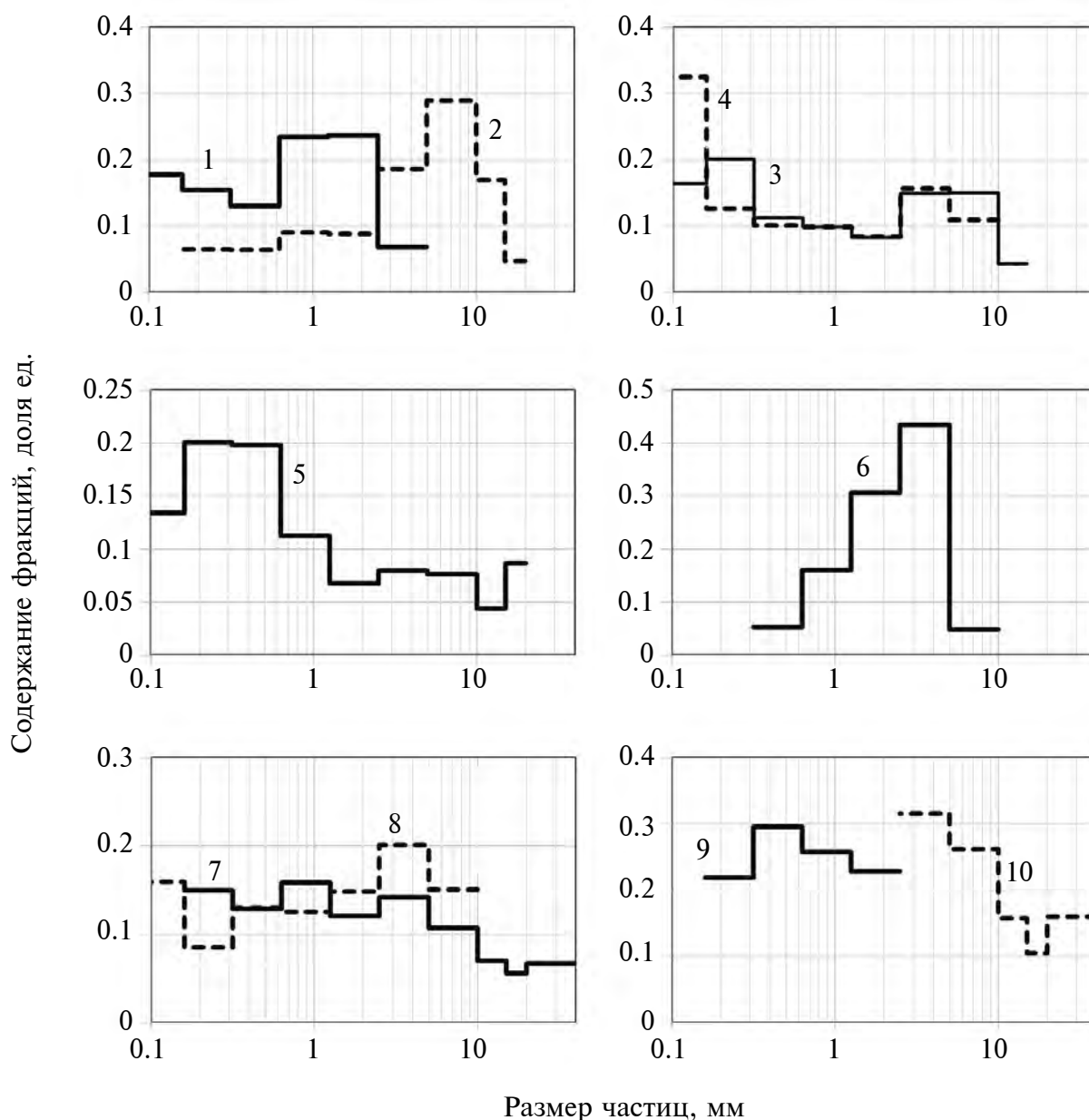


Рис. 3. Гранулометрический состав проб. Номера кривых соответствуют номерам проб в табл. 1.

Таким образом, критическая влажность W_{mc} растет с увеличением доли мелких фракций, в первую очередь глинистых. Этот вывод подтверждают и результаты измерений проб № 7–10. Критическая влажность исходных отобранных проб глинисто-дресвянистой коры выветривания гранитов (№ 7, 8) равнялась 7.8% и 5%. Объединенная проба была разделена на фракции <2.5 мм (№9) и >2.5 мм (№10). Критическая влажность фракции <2.5 мм сохранилась на уровне исходных проб (7%), а фракции >2.5 мм упала до 4%, а возможно, и ниже, поскольку перегиб на кривой $\lambda(W_m)$ практически незаметен (см. рис. 4). Поведение

масштабного параметра p не столь очевидно. Если для дробленого пьезокварца (№6), не содержащего мелких фракций, он минимален ($p = 0.19$), то для крупной фракции коры выветривания гранитов (№10) — максимален ($p = 0.85$). Возможно, этот параметр сложным образом зависит от структуры скелета, распределения минеральных зерен по крупности и теплопроводности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теплопроводность рыхлых приповерхностных отложений и покровов, характерных для г. Ека-

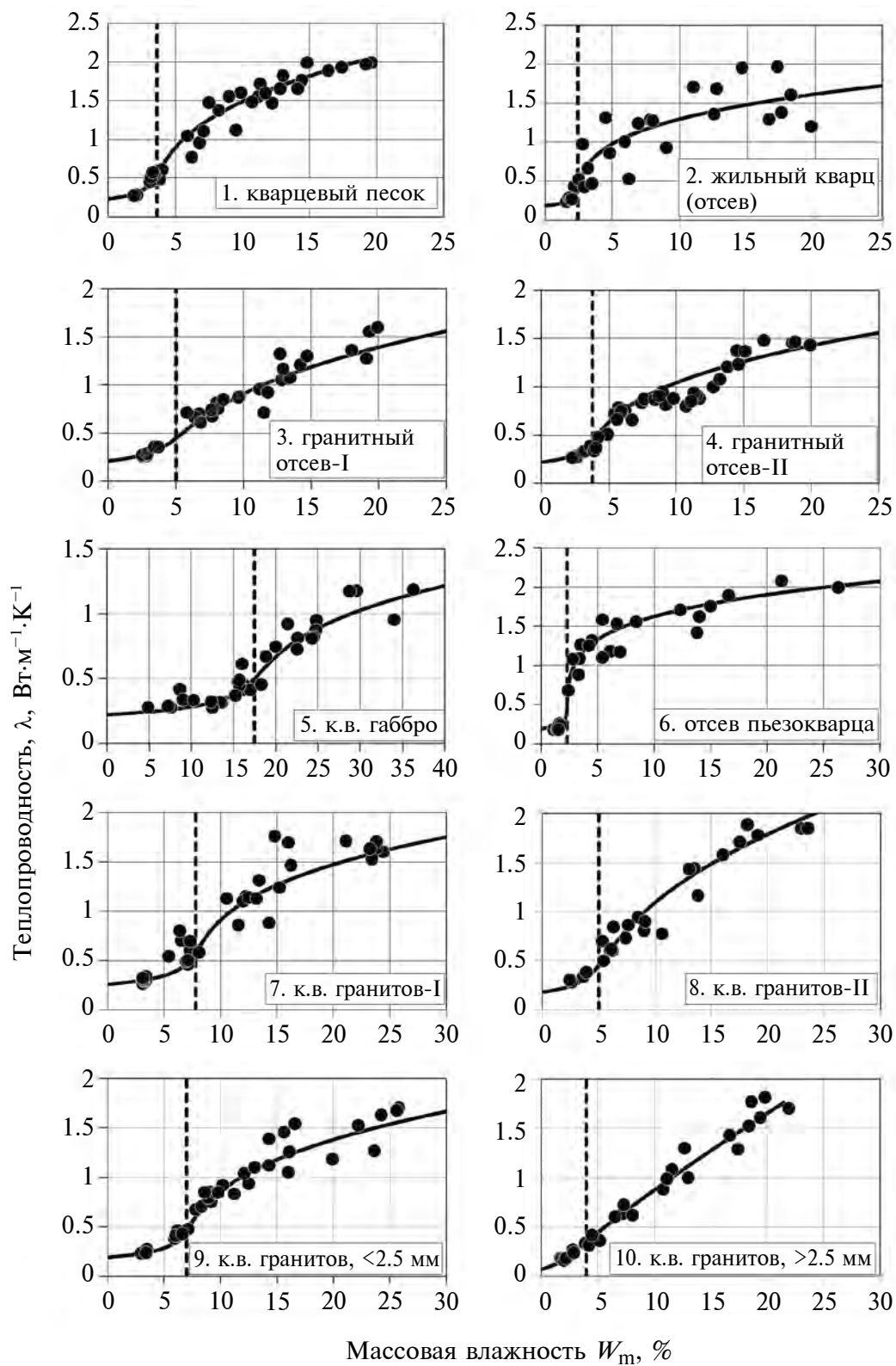


Рис. 4. Результаты измерений теплопроводности и массовой влажности проб (точки) и аппроксимирующие зависимости согласно соотношению (5).

теринбург, лежит в пределах $0.18\text{--}2 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$. Основной параметр, определяющий их теплопроводность, — влажность. С ростом влажности теплопроводность увеличивается. Для многих проб характерна S-образная зависимость $\lambda(W_m)$, включающая начальный участок медленного роста теплопроводности, участок более быстрого роста и выполаживание зависимости при приближении к максимальному насыщению.

Полученные экспериментальные данные аппроксимированы с помощью соотношения, использующего приближение эффективной среды на основе теории перколяции (percolation-based effective medium approximation — Р-ЕМА). Погрешность аппроксимации составила $0.08\text{--}0.26 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ (в среднем — $0.13 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$).

Данные о теплопроводности рыхлых городских приповерхностных отложений и покровов могут быть полезны при расчетах теплообмена, например, в рамках исследований городского острова тепла.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-77-10018, <https://rscf.ru/project/22-77-10018/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грязнов О.Н., Гуляев А.Н., Рубан Н.В. и др. Факторы инженерно-геологических условий города Екатеринбурга // Известия Уральского государственного горного университета. 2015. № 3 (39). С. 5–20.
2. Демежко Д.Ю. Геотермический метод реконструкции палеоклимата (на примере Урала). Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2001. 144 с.
3. Alchapar N.L., Correa E.N., Cantón M.A. Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones // Energy and Buildings. 2014. № 69. P. 22–32.
4. Chandler T.J. The climate of towns, Ch. 14. Chandler T.J. and Gregory S. (eds.). The Climate of the British. Longman, London, 1976. P. 307–329.
5. Ghanbarian B., Daigle H. Thermal conductivity in porous media: Percolation-based effective-medium approximation // Water Resources Research. 2016. № 52 (1). P. 295–314.
6. Goward S.N. Thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island // Physical Geography. 1981. № 2 (1). P. 19–33.
7. Lu S., Ren T., Gong Y., Horton R. An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature // Soil Science Society of America Journal. 2007. V. 71. № 1. P. 8–14.
8. Lu N., Dong Y. Closed-form equation for thermal conductivity of unsaturated soils at room temperature // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2015. V. 141(6): 04015016.
9. 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 // Journal of environmental management. 2017. V. 197. P. 522–538.
10. Oke T.R. The energetic basis of the urban heat island // Quarterly journal of the royal meteorological society. 1982. V. 108 (455). P. 1–24.
11. Sass J.H., Lachenbruch A.H., Munroe R.J. Thermal conductivity of rocks from measurements on fragments and its application to heat-flow determinations // Journal of geophysical research. 1971. V. 76 (14). P. 3391–3401.
12. Sepaskhah A.R., Boersma L. Thermal conductivity of soils as a function of temperature and water content // Soil Science Society of America Journal. 1979. V. 43 (3). P. 439–444.

THERMAL CONDUCTIVITY OF LOOSE URBAN SOILS

D. Yu. Demezhko^{1,*}, N. R. Fakaeva¹, A. A. Gornostaeva¹, B. D. Khatskevich¹¹*Bulashevich Institute of Geophysics, Urals Branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Amundsena 100, Yekaterinburg, 620016 Russia*^{*}*E-mail: ddem54@inbox.ru*

Thermal conductivity of some loose urban soils in Yekaterinburg has been studied using the needle probe method. The studied samples include weathering crusts of granitic and ultramafic rocks, quartz sand and crushed piezoelectric quartz. Humidity and granulometric composition have also been studied. An increase in humidity from 2–3% to 20–25% leads to an increase in thermal conductivity from 0.15–0.3 W m⁻¹ K⁻¹ to 1.2–2.0 W m⁻¹ K⁻¹. Most samples are characterized by an “S”-shaped dependence of thermal conductivity on humidity, including an initial section of slow growth in thermal conductivity, a section of a faster growth, and a flattening of the dependence as it approaches maximum saturation. For the analytical description of experimental data, the percolation-based effective medium approximation (P-EMA) was used. The approximation error was 0.08–0.26 W m⁻¹ K⁻¹. The “critical humidity” parameter in the P-EMA approximation determines the position of curve inflection. It has been established that the critical humidity increases with the growth of the finest fraction content, i.e., clay and silty loam. Data on the thermal conductivity of loose urban soils can be used in calculating heat exchange on urban surfaces, for example, in urban heat island studies.

Keywords: loose urban soils, thermal conductivity, humidity, granulometric composition, percolation

REFERENCES

1. Gryasnov, O.N., Gulyaev, A.N., Ruban, N.V., Savintsev, I.A., Cherkasov, S.A. [Factors of engineering geological conditions of Yekaterinburg]. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*, 2015, no. 3 (39), pp. 5–20. (in Russian).
2. Demezhko, D.Yu. [Geothermal method for paleoclimate reconstruction (by the example of the Urals, Russia)]. Yekaterinburg, UB RAS Publ., 2001, 144 pp. (in Russian).
3. Alchapar, N.L., Correa, E.N., Cantón, M.A. Classification of building materials used in the urban envelopes according to their capacity for mitigation of the urban heat island in semiarid zones. *Energy and Buildings*, 2014, no. 69, pp. 22–32.
4. Chandler, T.J. The climate of towns. Ch. 14. Chandler, T.J. and Gregory, S., Eds. *The Climate of the British*. London, Longman Publ., 1976, pp. 307–329.
5. Ghanbarian, B., Daigle, H. Thermal conductivity in porous media: Percolation-based effective-medium approximation. *Water Resources Research*, 2016, no. 52(1), pp. 295–314.
6. Goward, S.N. Thermal behavior of urban landscapes and the urban heat island. *Physical Geography*, 1981, no. 2(1), pp. 19–33.
7. Lu, S., Ren, T., Gong, Y., Horton, R., An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, vol. 71, no. 1, pp. 8–14.
8. Lu, N., Dong, Y. Closed-form equation for thermal conductivity of unsaturated soils at room temperature. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2015, vol. 141, no. 6, 04015016.
9. 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. *Journal of environmental management*, 2017, vol. 197, pp. 522–538.
10. Oke, T.R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 1982, vol. 108, no. 455, pp. 1–24.
11. Sass, J.H., Lachenbruch, A.H., Munroe, R.J. Thermal conductivity of rocks from measurements on fragments and its application to heat-flow determinations. *Journal of geophysical research*, 1971, vol. 76, no. 14, pp. 3391–3401.
12. Sepaskhah, A.R., Boersma, L. Thermal conductivity of soils as a function of temperature and water content. *Soil Science Society of America Journal*, 1979, vol. 43, no. 3, pp. 439–444.