

Изменение термического сопротивления снежного покрова при мелиорации земель в криолитозоне

© 2025. А. Ф. Галкин[✉], М. Н. Железняк, А. Ф. Жирков

ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация

Приведен краткий обзор исследований по изучению вариативности термического сопротивления снежного покрова и расчетных формул по определению коэффициента теплопроводности снега. Цель работы – установление закономерностей изменения термического сопротивления снежного покрова при снежной мелиорации путем трамбования. Для достижения цели введен критерий, представляющий собой отношение начального теплового сопротивления к тепловому сопротивлению после трамбования снежного покрова. Рассмотрено два практических интересных случая (полного и частичного трамбования), когда плотность снега после трамбования является постоянной и переменной величиной по глубине. Показано, что область допущения о постоянной плотности при трамбовании имеет достаточно узкий диапазон доверия и в практических расчетах необходимо учитывать, что под нагрузкой снежный покров уплотняется не полностью. Расчетные значения представлены в обобщенной безразмерной форме, учитывающей произвольный показатель степени в аппроксимирующей формуле определения коэффициента теплопроводности от плотности снега. Установлено, что вид функциональной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега существенно влияет на результаты расчетов термического сопротивления снежного покрова. Определены предельные значения коэффициента уплотнения снежного покрова, которые позволяют в расчетах термического сопротивления не превысить допустимой в инженерной практике ошибки (10,0 %). Например, для случая линейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности допустимое значение коэффициента уплотнения не должно превышать значения, равного 1,25, для квадратичной зависимости – 1,11. Результаты вариантов расчетов по формулам представлены в виде 2D- и 3D-графиков, что позволяет наглядно убедиться в обоснованности принятых допущений и сделанных выводов.

Ключевые слова: снежный покров, уплотнение, мелиорация, коэффициент теплопроводности, термическое сопротивление, плотность снега, расчет, ошибка

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук (НИОКР № 122011800062-5 «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика»).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку данной работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Галкин А. Ф., Железняк М. Н., Жирков А. Ф. Изменение термического сопротивления снежного покрова при мелиорации земель в криолитозоне. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(6):1355–1364.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.6.1355-1364>

Поступила: 23.07.2025 Принята к публикации: 08.12.2025 Опубликована онлайн: 26.12.2025

Change in thermal resistance of snow cover by land reclamation in cryolithozone

© 2025. Aleksandr F. Galkin[✉], Mikhail N. Zheleznyak, Aleksandr F. Zhirkov

Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

A brief review of research on variation of thermal resistance of snow cover and formulas to determine the thermal conductivity coefficient of snow are presented. This article aims to establish the regularities of variation in thermal resistance of snow when compressive melioration is applied to the snow cover. A criterion consisting of ratio of initial thermal resistance to the thermal resistance after compression is introduced. Two practically relevant cases, a full and partial compression, whereby the snow density after compression is a constant and a variable respectively, are considered. It is demonstrated that the area where it can be assumed that the snow density after compression is a constant has a low confidence interval and in practical applications it needs to be accounted for that the snow cover is not fully compressed under load. The calculation results are presented in a generalized dimensionless form that includes an indicator of arbitrary exponent in an approximated formula to determine the thermal conductivity coefficient from snow density. It has been established that the type of functional dependence of thermal conductivity coefficient on snow density has a significant influence on the calculation results of the thermal resistance of snow cover. The boundary values of snow compression coefficient within the permissible error level (10 %) were found. For example, for a linear dependence of the thermal conductivity coefficient on density the permissible compression coefficient is no higher than 1.25. For a quadratic dependence, it is 1.11. The results of variant calculations are presented as 2D and 3D charts, which allow quickly assessing the assumptions and conclusions.

Keywords: snow cover, compression, melioration, thermal conductivity coefficient, thermal resistance, snow density, calculation, error

Acknowledgements: the research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (R&D No. 122011800062-5 "Thermal field and cryogenic stratum of the North-East of Russia. Features of formation and dynamics").

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Galkin A. F., Zheleznyak M. N., Zhirkov A. F. Change in thermal resistance of snow cover by land reclamation in criolithozone. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(6):1355–1364. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.6.1355-1364>

Received: 23.07.2025

Accepted for publication: 08.12.2025 Published online: 26.12.2025

Снежный покров является важным элементом природной среды, во многом определяющим тепловой режим гелиотермозоны (зоны годовых теплооборотов). Исследованию термического сопротивления снежного покрова уделяется большое внимание в научном и инженерном сообществе. Это вызвано как проблемой прогноза и реконструкции влияния изменения климата на температурный режим криолитозоны, так и поиском и разработкой новых способов и средств снежной мелиорации грунтов [1, 2, 3]. Исследования, выполненные сотрудниками Института географии РАН, доказали зависимость тепловой устойчивости криолитозоны от термического сопротивления снежного покрова. В работе [4], например, отмечается, что неправильный расчет термического сопротивления снежного покрова может привести к недооценке техногенного влияния потепления климата на выбор стратегических решений при оценке надежности технических объектов в криолитозоне. Влияние снежного покрова на палеонтологическую точность «реконструкции влияния изменения климата на тепловой режим криолитозоны» исследовано в работах [5, 6]. В частности, авторы пришли к выводу, что «... при повышении средней годовой температуры воздуха на $+0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$ либо при увеличении мощности снежного покрова на 30 % и повышении средней годовой температуры воздуха на $+0,02^{\circ}\text{C}/\text{год}$ произойдёт достижение глубины пропаивания кровли ледового комплекса и начнется деградация верхней толщи ледового комплекса Центральной Якутии. Температуры грунтов восточных районов Центральной Якутии слабее реагируют на потепление климата, проявляя устойчивость до повышения средней годовой температуры воздуха более чем на $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в отличие от левобережья р. Лены, что связано с распределением снежного покрова...» [5, стр. 231]. Снежный покров, по результатам данных исследований, позволяет существенно изменять прогнозируемые сроки оттаивания вечной мерзлоты. Показано, что «... при тренде $0,02^{\circ}\text{C}/\text{год}$ и без изменения высоты снежного покрова глубина сезонного

оттаивания на межаласьях достигнет кровли льдистых пород в 2093 году. При тренде $0,04^{\circ}\text{C}/\text{год}$ и приращении снежного покрова на 30 % глубина пропаивания достигнет горизонта подземного льда в 2036–2041 гг. на западных многоснежных районах, а в восточных малоснежных – 2050–2061 гг.» [5, стр. 232]. Установлено, что отепляющее влияние снега является одним из основных факторов, определяющих формирование теплового режима криолитозоны как в прошлом, так и будущем.

Различные виды снежной мелиорации широко используются в сельском хозяйстве для улучшения плодородия почв [1, 2]. В научных работах ряда авторов отмечается эффективность и перспективность использования методов водной и снежной мелиорации для восстановления нарушенных термокарстом сельскохозяйственных земель криолитозоны [7, 8]. Нарушение обычно происходит при наличии в зоне теплового влияния поверхности льдонасыщенных грунтов или ледяных линз. Вовлечение таких земель в сельскохозяйственный оборот приводит к увеличению глубины деятельного слоя с консолидацией грунта при оттаивании и образованию на поверхности многочисленных «криогенных кратеров» с последующим прогрессирующим нарушением поверхности, приводящим к образованию траншей и оврагов. Процесс восстановления земель заключается, прежде всего, в снижении глубины деятельного слоя грунта (слоя промерзания-оттаивания). Этого можно добиться путем понижения температуры деятельного слоя грунтов в зимний период и увеличения влажности пород деятельного слоя в теплый период года, то есть комплексной зимней и летней мелиорацией грунтов. Если в средней полосе страны главной задачей зимней мелиорации является снижение глубины промерзания и увеличение влагоёмкости снежного покрова (то есть увеличение толщины снежного покрова), то в криолитозоне, наоборот, целью является снижение толщины снежного покрова для уменьшения его термического сопротивления. При этом и в том, и в другом случаях стоит задача увеличения

влажности деятельного слоя. Это может быть достигнуто с помощью управления состоянием снежного покрова трамбованием. Снежная мелиорация позволяет добиться уменьшения термического сопротивления снежного покрова без снижения его влагоемкости.

При расчетах термического сопротивления снежного покрова, как и любой слоистой структуры, важно учитывать его стратиграфию, т. е. наличие слоев из снега разного вида и различной плотности [9, 10]. В работе [9, стр. 63], например, доказывается, «... что игнорирование стратиграфии снежного покрова при расчёте термического сопротивления может увеличить значение последнего более чем в 1,5 раза. В результате расчётная скорость промерзания грунта в холодный период возрастает, тогда как реальное промерзание будет меньше, и можно пропустить момент опасного снижения прочности грунта и начало деградации многолетней мерзлоты». В работе [11] показано, что существует оптимальное соотношение термических сопротивлений отдельных элементов слоистой структуры, при котором можно считать всю слоистую структуру однородной с постоянными характеристиками, равными некоторой средней величине. В работе [12] выполнена оценка точности расчета коэффициента теплопроводности двухслойного снежного покрова, в зависимости от степени уплотнения одного из слоев. Рассмотрены два подхода в определении коэффициента теплопроводности: слоистой структуры; эквивалентной однородной структуры, имеющей постоянную среднюю плотность. Установлено, что при уплотнении одного из слоев, менее чем в 2 раза (коэффициент уплотнения $k < 2,0$) применение понятия «средняя плотность снежного покрова» в тепловых расчетах по определению термического сопротивления снежного покрова, является вполне допустимым. При увеличении степени уплотнения одного из слоев более чем в 2 раза необходимо определять коэффициент теплопроводности каждого слоя и рассчитывать общее термическое сопротивление снежного покрова как сумму термических сопротивлений отдельных слоев.

Цель исследований – установить основные закономерности изменения термического сопротивления снежного покрова при снежной мелиорации путем трамбования.

Научная новизна – установлены основные количественные закономерности, связывающие термическое сопротивление с коэффициентом

уплотнения снежного покрова при полном и частичном трамбовании.

Материал и методы. Различают два вида трамбования в зависимости от толщины снежного покрова и прилагаемой нагрузки: полное и частичное. При полном трамбовании происходит практически равномерное изменение плотности снежного покрова в пределах нового слоя. Это характерно для трамбования снежного покрова небольшой высоты и при больших нагрузках на поверхность (использование строительных катков), а также при трамбовании снега путем полива водой или увлажнения паром. При частичном трамбовании изменяется структура и плотность снега только в приповерхностном слое, глубина которого меньше нового уплотненного снежного покрова. Новый уплотненный покров представляет собой двухслойную структуру, в нижней части которого сохраняются первоначальные свойства снега, а в верхнем слое плотность снега изменяется от максимального значения, зависящего от приложенной нагрузки, до минимального, равного первоначальной плотности снежного покрова. В рассматриваемой постановке задачи будем считать, что плотность начального слоя до трамбования является постоянной величиной, т. е. структура снега по всему слою одинаковая [13]. Для оценки эффективности трамбования снежного покрова (уменьшение термического сопротивления) введем критерий β , характеризующий степень изменения начального термического сопротивления снежного покрова при трамбовании.

Степень уменьшения термического сопротивления снежного покрова можно определить по формуле:

$$\beta = R_1/R_2 = (h_1/h_2)(\lambda_2/\lambda_1), \quad (1)$$

где β – безразмерный критерий эффективности; R – термическое сопротивление снежного покрова, $\text{м}^2/\text{ВтК}$; h – толщина снежного покрова, м; λ – коэффициент теплопроводности снега, $\text{Вт}/\text{мК}$; индексы 1 и 2 относятся к естественному и уплотненному снежному покрову соответственно.

Используя понятие «коэффициент уплотнения снежного покрова, $k = h_1/h_2$ » и принимая во внимание, что зависимость коэффициента теплопроводности снега от плотности является степенной функцией вида [14, 15, 16] $\lambda = c\rho^n$, где ρ – плотность снега, $\text{кг}/\text{м}^3$, можно записать следующее равенство:

$$\beta = (R_1/R_2) = k(\lambda_2/\lambda_1) = k(c\rho_2^n/c\rho_1^n) = k\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^n = k^{n+1}. \quad (2)$$

Если считать, что зависимость коэффициента теплопроводности снега от плотности линейная ($n = 1$) [17], то это соотношение преобразуется к виду

$$\beta = (R_1/R_2) = k^2. \quad (3)$$

Легко показать, что, учитывая большое разнообразие видов снежного покрова и вариативности его плотности от множества параметров, любую частную нелинейную зависимость можно легко линеаризовать без больших потерь точности. То есть, при линеаризации функции результаты вычислений всегда будут находиться в доверительном интервале искомой величины.

Для наглядности и объективной оценки влияния вида выбранной функциональной зависимости коэффициента теплопроводности снега от плотности на конечный результат рассмотрим 2 варианта: линейную и квадратичную зависимость. Для возможных других вариантов рассмотрим общую теоретическую зависимость с произвольным показателем степени.

При выводе выражения (2) мы считали, что выполняется соотношение $\rho_2 = k\rho_1$, то есть весь снежный покров до поверхности земли равномерно уплотнен. Это допущение справедливо в том случае, если нагрузка на поверхность снежного покрова достаточно большая, а толщина снежного покрова незначительная. Обоснование данного допущения приведено в работе [18], где получена зависимость изменения плотности снега после прохода автомобиля на пневмоколесах, построенная по обобщающим данным для различных типов снега:

$$\rho_2 = \rho_1(l/(l-z)), \quad (4)$$

где ρ_2 – плотность снега на дне колеи в центральной части, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_1 – начальная плотность снега, $\text{кг}/\text{м}^3$; l – толщина снега на проезжей части, м; z – деформация снега пневмоколесом, м.

Деформацию снега оценивали только на основании экспериментальных данных.

Учитывая, что в принятых обозначениях l – это h_1 , а $(z - l) - h_2$ и $(h_1/h_2) = k$ можно записать $\rho_2 = \rho_1 k$. В принципе это равенство следует из простого и очевидного положения, что масса снега при уплотнении не изменяется.

Действительно, поскольку масса снега при уплотнении остается постоянной, можно записать следующее равенство:

$$M_1 = M_2 \text{ или } \rho_1 h_1 S_1 = \rho_2 h_2 S_2,$$

где M_1, M_2 – масса снега до и после уплотнения, кг; S_1, S_2 – площадь поверхности, м^2 ; ρ_1, ρ_2 – плотность снега до и после уплотнения, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Откуда получим (при очевидном условии $S_1 = S_2 = 1$): $\rho_2 = \rho_1 (h_1/h_2) = k \rho_1$. Что, как и следовало ожидать, полностью совпадает с экспериментально полученной формулой в работе [18].

Если толщина снежного покрова достаточно большая, а нагрузка при уплотнении позволяет изменить плотность лишь на части общей высоты (то есть, уплотняется только небольшой верхний слой снежного покрова, а ниже остается естественный слой с первоначальными физическими характеристиками), то плотность верхнего слоя после уплотнения может быть определена как среднеинтегральное значение по глубине. При этом выполняются следующие граничные условия:

$$\rho(h = h_1 - h_2) = \rho_1 \text{ и } \rho(h = h_2) = \rho_2. \quad (5)$$

Средняя плотность верхнего слоя определяется по формуле:

$$\rho_{\text{ср}} = (1/(h_1 - h_2)) \int_{h_1}^{h_2} \rho(h) dh. \quad (6)$$

При известной нагрузке на поверхность снежного покрова при трамбовании глубина зоны изменения плотности снега может быть определена по известной формуле А. Фёпеля [в изложении 19]. Согласно результатам исследований, приведенным в работе [20], приближенно можно считать, что изменение плотности по глубине является линейной функцией от координаты. В этом случае среднеинтегральное значение плотности уплотненного слоя будет равно среднеарифметическому:

$$\rho_{\text{ср}} = \rho_1(k + 1)/2. \quad (7)$$

Параметр β определяется из выражения (учитывая, что в этом случае, $\rho_{\text{ср}} = \rho_2$)

$$\beta = (R_1/R_2) = k((k + 1)/2)^n. \quad (8)$$

Процентная невязка (степень разногласия) результатов расчетов по формуле, учитывающей изменение плотности снежного покрова по глубине при трамбовании (8) и не учитывающей (2), можно определить по следующей формуле:

$$e = \text{abs}\{1 - \beta(8)/\beta(2)\} * 100 %. \quad (9)$$

Подставив в данное выражение формулы (2) и (8), получим:

$$e = \text{abs}\{1 - [(k + 1)/2k]^n\} * 100 %. \quad (10)$$

Для практических расчетов представляет интерес определить, при каком значении коэффициента уплотнения при расчете термического сопротивления можно не учитывать зависимость изменения плотности снежного покрова по глубине. То есть, расхождение результатов расчетов не превысит значения, допустимого в инженерной практике, которое обычно

принимают равным 10,0 %. В этом случае для $n = 1$ (линейная зависимость коэффициента теплопроводности от плотности снега) из (10) получим $k \leq 1,25$. Для случая $n = 2$ значение допустимого коэффициента уплотнения должно быть меньше или равно величине $k \leq 1,11$.

Результаты и их обсуждение. Для достижения цели по полученным формулам были проведены вариантные расчеты, результаты которых для наглядности представлены в графической форме.

На рисунке 1 даны изменения термического сопротивления снежного покрова при

уплотнении снега. Голубым (верхняя часть на графике – кривые 1 и 2) и зеленым (нижняя часть на графике – кривые 3 и 4) цветом выделены области изменения критерия β при использовании в расчетах квадратичной ($n = 2$) и линейной ($n = 1$) зависимости коэффициента теплопроводности снега от плотности соответственно. Нижняя граница областей соответствует случаю «полного трамбования слоя», то есть, плотность слоя не изменяется по глубине, верхняя граница областей, выделенных цветом на рисунке, соответствует переменной плотности утрамбованного слоя по толщине от ρ_2 до ρ_1 .

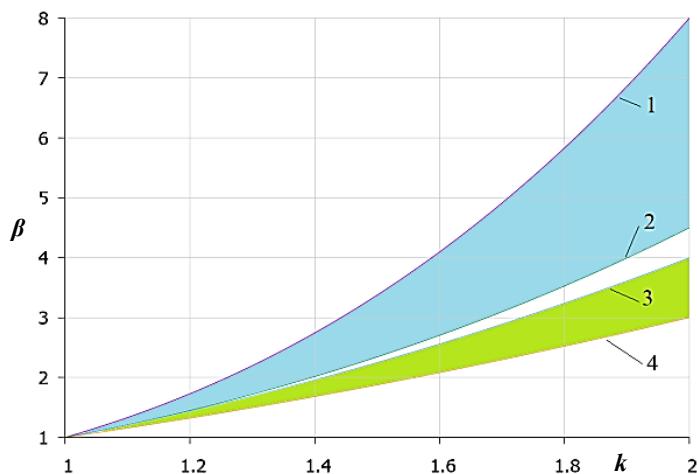


Рис. 1. Изменение термического сопротивления снежного покрова при уплотнении (критерий β) с учетом (кривые 2 и 4) и без учета (кривые 1 и 3) изменения плотности по глубине: 3, 4 – при линейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности; 1-2 – при квадратичной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности (k) /

Fig. 1. Change in thermal resistance of compressed snow cover (β criterion) accounting for (curves 2 and 4) and not accounting for (curves 1 and 3) change in density over depth: 3, 4 when the dependence of thermal conductivity coefficient on density is linear; 1-2 quadratic dependence of thermal conductivity coefficient on density (k)

Сравнение графиков на рисунке показывает, что выбор вида функциональной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега оказывает существенное влияние на конечный результат – определение величины изменения термического сопротивления снежного покрова при трамбовании (критерий β). Причем, чем больше значение коэффициента уплотнения, тем разница в результатах расчетов больше. Эта закономерность наблюдается как для случая квадратичной, так и линейной функциональной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега. Сравнение областей, выделенных голубым и зеленым цветом, позволяет сделать вывод, что, чем больше уровень нелинейности рассматриваемой функции (чем выше показатель степени n в зависимости $\lambda = c\rho^n$), тем уровень разногласия результатов расчета терми-

ческого сопротивления как при учете изменения плотности снега по толщине слоя, так и без учета этого фактора, также будет больше. При этом с ростом коэффициента уплотнения степень разногласия результатов расчета будет увеличиваться в обоих случаях. Например, при коэффициенте уплотнения, равном 1,5, параметр β для случая линейной зависимости ($n = 1$) при учете неравномерной плотности снежного покрова по глубине составляет 2,25, а без учета – 1,88, то есть изменяется в 1,2 раза. При коэффициенте уплотнения 2,0 параметр β увеличивается с 3,0 до 4,0, т. е. в 1,3 раза. Аналогично, для случая квадратичной зависимости ($n = 2$) при коэффициенте уплотнения 1,5 значения составят – 2,3 и 3,4 (критерий β увеличивается в 1,5 раза), при коэффициенте уплотнения, равном 2,0 – 4,5 и 8,0 (увеличение в 1,8 раза).

Причем абсолютные значения критерия β при использовании квадратичной зависимости, как при учете изменения плотности снега по глубине слоя, так и без учета этого фактора почти в 2 раза превышают показатели критерия β , вычисленного при показателе степени, равном единице.

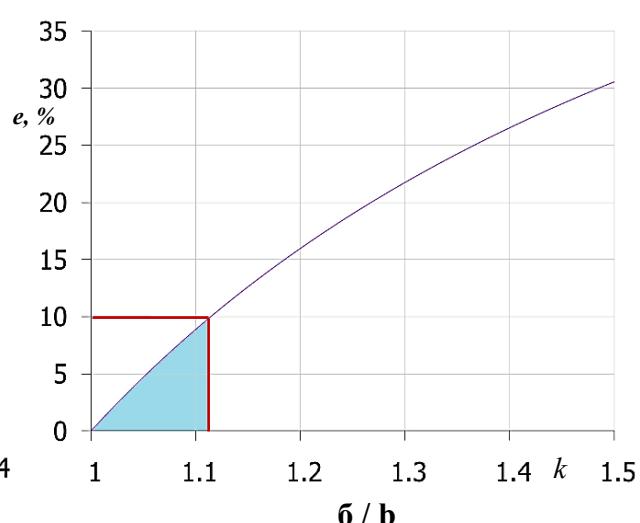
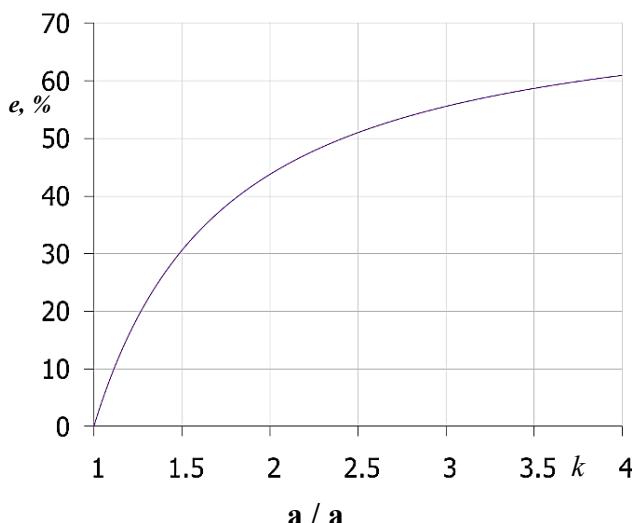


Рис. 2. Степень разногласия расчетов термического сопротивления снежного покрова при уплотнении ($e, \%$) с учетом и без учета изменения плотности по глубине при квадратичной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности: а) при изменении коэффициента уплотнения (k) от 1,0 до 4,0; б) область допустимых значений степени разногласия результатов в зависимости от коэффициента уплотнения /

Fig. 2. Degree of discrepancy in calculations of thermal resistance of compressed snow cover ($e, \%$) accounting for and not accounting for change in density over depth with a quadratic dependence of thermal conductivity coefficient on depth: a) by the change in thermal conductivity coefficient (k) from 1.0 to 4.0; b) area of permissible discrepancy of results depending on compression coefficient

Цветом на рисунке выделена область допустимой погрешности (степени разногласия) в расчетах по формулам (2) и (8), предельным значением которой является коэффициент уплотнения, равный 1,11. Как видно из графиков на рисунке, степень разногласия результатов повышается с увеличением коэффициента уплотнения и может достигать значений в разы, превышающий допустимый (10,0 %) в инженерной практике уровень. Например, при коэффициенте уплотнения, равном 2,0, степень разногласия составляет почти 45 % и повышается до 60 % при увеличении коэффициента уплотнения в 2 раза. Область же допустимых значений достаточно мала и ограничена коэффициентом уплотнения – 1,11. То есть можно говорить о том, что во всех, практически значимых случаях, при частичном трамбовании снежного покрова необходимо учитывать изменение плотности по глубине утрамбованного слоя.

На рисунке 2 приведены графики, характеризующие процентную степень разногласия результатов расчета термического сопротивления при уплотнении с учетом и без учета изменения плотности по глубине снежного покрова при квадратичной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности.

На рисунке 3 приведены аналогичные (рис. 2) кривые для случая линейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега.

Сравнение кривых на рисунках 2 и 3 показывает, что в случае линейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега степень разногласия в среднем в 1,5 меньше, чем при квадратичной зависимости. Доверительный диапазон расчетов термического сопротивления в этом случае увеличивается и составляет 1,25 по значению коэффициента уплотнения. Для обобщенной характеристики уровня процентного разногласия в расчетах термического сопротивления при полном и частичном трамбовании построен трехмерный график зависимости параметра e от коэффициента уплотнения k и показателя степени аппроксимирующей зависимости n , который представлен на рисунке 4.

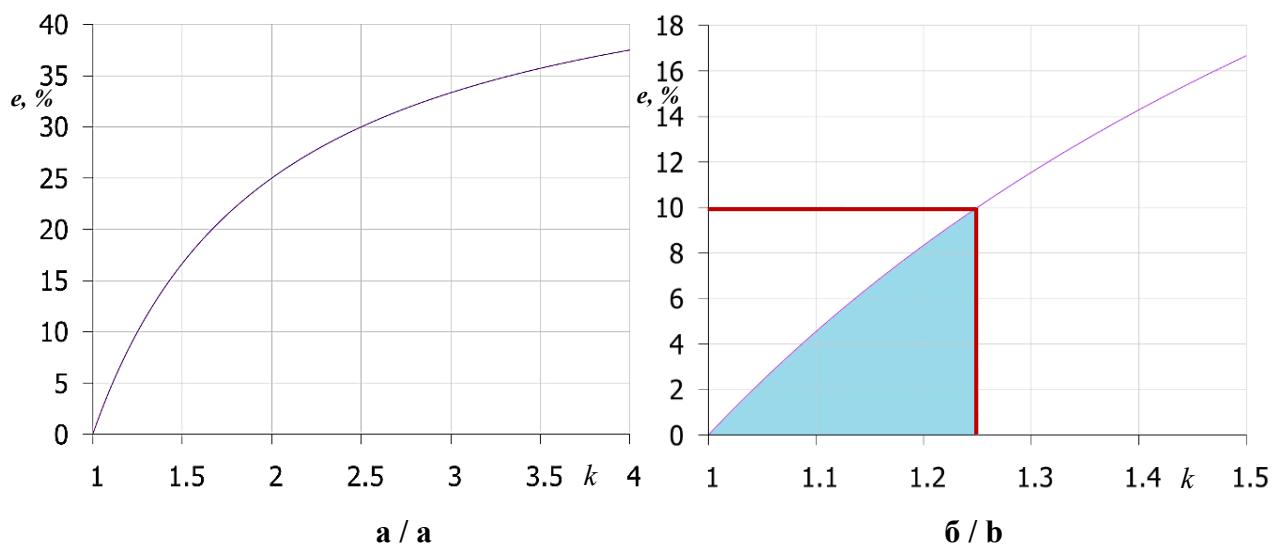


Рис. 3. Степень разногласия расчетов термического сопротивления снежного покрова при уплотнении ($e, \%$) с учетом и без учета изменения плотности по глубине при линейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности: а) при изменении коэффициента уплотнения (k) от 1,0 до 4,0; б) область допустимого значения степени разногласия результатов в зависимости от коэффициента уплотнения /

Fig. 3. The degree of disagreement in calculations of thermal resistance of snow cover during compaction ($e, \%$) taking into account and without taking into account changes in density over depth with a linear dependence of the coefficient of thermal conductivity on density: a) when the coefficient of compaction (k) changes from 1.0 to 4.0; b) the range of acceptable values of the degree of disagreement of the results depending on the coefficient of compaction

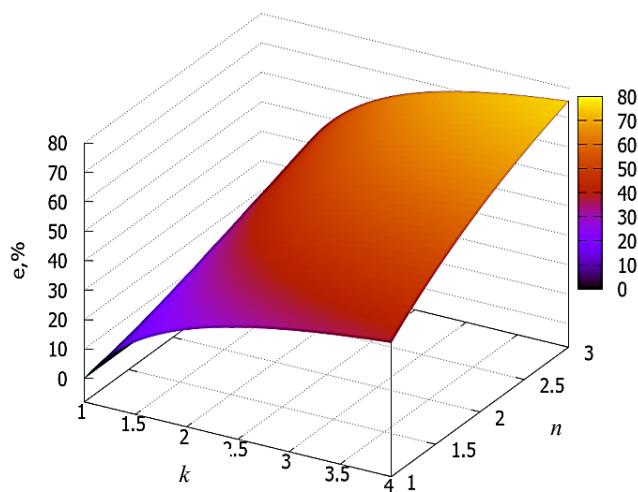


Рис. 4. Степень разногласия результатов расчетов e термического сопротивления снежного покрова при уплотнении k , с учетом и без учета изменения плотности по глубине, при изменении показателя степени n нелинейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега /

Fig. 4. The degree of disagreement between the results of calculations e of the thermal resistance of the snow cover during compaction k , taking into account and without taking into account the change in density in depth, with a change in the index of degree n of nonlinear dependence of the coefficient of thermal conductivity on the density of snow

Анализ цветовой дифференциации плоскости на рисунке 4 наглядно подтверждает ранее сделанные выводы о существенной зависимости расчета термического сопротивления как от вида трамбования (полное или частичное), так и от вида функциональной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега. Очевиден также и тот

факт, что доверительная область составляет незначительную часть (менее 1,25 по коэффициенту уплотнения) и не может служить основанием применения формул для расчета термического сопротивления при полном трамбовании снежного покрова и термического сопротивления уплотненного слоя при его частичном трамбовании.

Заключение. Исследовано влияние частичного и полного трамбования снежного покрова на изменение его термического сопротивления при проведении мелиоративных работ. Получены простые аналитические зависимости, позволяющие сравнить степень изменения термического сопротивления снежного покрова при полном и частичном трамбовании с учетом вида функциональной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега. В частности, установлено, что вид функциональной зависимости играет существенную роль при оценке эффективности снежной мелиорации трамбованием. При этом результаты расчетов термического сопротивления могут отличаться на величину, кратно превышающую допустимую в инженерной практике. Так, в случае выбора линейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега степень разногласия результатов расчетов в среднем в 1,5 меньше, чем при выборе квадратичной

зависимости. Показано, что существует область, ограниченная значением коэффициента уплотнения, когда результаты расчетов термического сопротивления мало зависят от вида трамбования при снежной мелиорации. При линейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега эта область ограничена значением коэффициента уплотнения 1,25, а при квадратичной – 1,11. Обоснован вывод о нецелесообразности применения формул для расчета термического сопротивления при полном трамбовании снежного покрова и термического сопротивления уплотненного слоя при его частичном трамбовании.

Дальнейшие исследования в данной области целесообразно направить на изучение влияния частичного и полного трамбования снежного покрова на температурный режим и изменение скорости промерзания-оттаивания деятельного слоя грунта.

Список литературы

1. Шульгин А. М. Снежная мелиорация и климат почвы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 70 с.
2. Шульгин А. М. Снежный покров и его использование в сельском хозяйстве. Л.: Гидрометеоиздат, 1962. 84 с.
3. Железняк И. И., Сакисян Р. М. Методы управления сезонным промерзанием грунтов в Забайкалье. Новосибирск: Наука, 1987. 128 с.
4. Котляков В. М., Сосновский А. В. Оценка термического сопротивления снежного покрова по температуре грунта. Лёд и Снег. 2021;61(2):195–205. DOI: <https://doi.org/10.31857/S2076673421020081> EDN: XPBXXL
5. Новоприезжая В. А., Федоров А. Н. Реконструкция палеотемператур грунтов ледового комплекса Центральной Якутии в голоцене. Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024;29(2):224–234. DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-224-234> EDN: PIEXUU
6. Fedorov A. N., Novopriezzhaya V. A., Fedorov N. A., Konstantinov P. Y., Samsonova V. V. Retrospective Analysis of Permafrost Landscape Evolution in Yakutia during the Holocene Warm Intervals. Land. 2020;9(11):463. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9110463>
7. Жирков А. Ф., Сивцев М. А. Оценка возможности восстановления защитного слоя в условиях Центральной Якутии. Мониторинг в криолитозоне: сб. докл. Шестой конф. геокриологов России с участ. российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. М.: изд-во "КДУ", "Добросвет", 2022. С. 444–450.
8. Zhirkov A., Sivtsev M., Lytkin V., Séjourné A., Wen Z. An Assessment of the Possibility of Restoration and Protection of Territories Disturbed by Thermokarst in Central Yakutia, Eastern Siberia. Land. 2023;12(1):197. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12010197>
9. Осокин Н. И., Сосновский А. В., Чернов Р. А. Влияние стратиграфии снежного покрова на его термическое сопротивление. Лёд и Снег. 2013;53(3):63–70. DOI: <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-3-63-70> EDN: RFLXDZ
10. Кириллин А. Р., Железняк М. Н., Жирков А. Ф., Мисайлов И. Е., Верхотуров А. Г., Сивцев М. А. Особенности снегонакопления и параметры снежного покрова на Эльконском горном массиве. Вестник Забайкальского государственного университета. 2020;26(7):62–76. DOI: <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2020-26-7-62-76> EDN: FOCISC
11. Галкин А. Ф. Эквивалентное термическое сопротивление дорожной одежды. Арктика и Антарктика. 2022;3(129–138. Режим доступа: https://www.nbpublish.com/library_read_article.php?id=38777
12. Галкин А. Ф., Панков В. Ю., Васильева М. Р. Коэффициент теплопроводности снежного покрова. Строительные материалы. 2024;10(10):62–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-829-10-62-67> EDN: QLQRFF
13. Fierz C., Armstrong R. L., Durand Y., Etchevers P., Green E., McClung D. M. 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. 80 p.
URL: https://www.geobotany.org/library/pubs/FierzeC2009_snow_classif_UNESCO.pdf

14. Fukusako S. Thermophysical properties of ice, snow, and sea ice. *International Journal of Thermophysics*. 1990;11(2):353–372. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01133567>
15. Calonne N., Milliancourt L., Burr A., Philip A., Martin C. L., Flin F., Geindreau C. Thermal conductivity of snow, firn, and porous ice from 3-D image-based computations. *Geophysical Research Letters*. 2019;46(22):13079–13089. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GL085228>
16. Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow. *Journal of Glaciology*. 1997;43(143):26–41. DOI: <https://doi.org/10.3189/S0022143000002781>
17. Yen Y.-C. Review of the thermal properties of snow, ice and sea ice. NH: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981. 27 p. URL: <https://books.google.com.au/books?id=fh8xryamPxIC>
18. Shapiro L. H., Johnson J. B., Sturm M., Blaisdell G. L. *Snow Mechanics Review of the State of Knowledge and Applications*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, 1997. 126 p. URL: <https://www.inscc.utah.edu/~campbell/snowdynamics/reading/Shapiro.pdf>
19. Борисов В. А., Акинин Д. В., Паюл А. Д. Изменения плотности снега при сжимающей нагрузке. *Resources and Technology*. 2021;18(3):77–91. DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5843> EDN: LMQJYF
20. Кручинин И. Н. Формирование снежного наката с заданными свойствами на лесовозных автомобильных дорогах. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2012;(1(325)):38–41.
- Режим доступа: https://lesnoizhurnal.ru/issuesarchive/?ELEMENT_ID=34565

References

1. Shul'gin A. M. *Snow reclamation and soil climate*. Leningrad: *Gidrometeoizdat*, 1986. 70 p.
2. Shul'gin A. M. *Snow cover and its use in agriculture*. Leningrad: *Gidrometeoizdat*, 1962. 84 p.
3. Zheleznyak I. I., Sakisyan R. M. *Methods of managing seasonal soil freezing in Transbaikalia*. Novosibirsk: *Nauka*, 1987. 128 p.
4. Kotlyakov V. M., Sosnovskiy. A. V. Estimation of the thermal resistance of snow cover based on the ground temperature. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2021;61(2):195–205. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S2076673421020081>
5. Novopriesshaya V. A., Fedorov A. N. Reconstruction of the paleotemperature of the Central Yakutia Ice Complex during the Holocene period. *Prirodnie resursi Arktiki i Subarktiki = Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(2):224–234. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-2-224-234>
6. Fedorov A. N., Novopriesshaya V. A., Fedorov N. A., Konstantinov P. Y., Samsonova V. V. Retrospective Analysis of Permafrost Landscape Evolution in Yakutia during the Holocene Warm Intervals. *Land*. 2020;9(11):463. DOI: <https://doi.org/10.3390/land9110463>
7. Zhirkov A. F., Sivtsev M. A. Assessment of the possibility of restoring the protective layer in the conditions of Central Yakutia. Monitoring in the cryolithozone: collection of reports of the sixth conference of geocryologists of Russia with participation of Russian and foreign scientists, engineers and specialists. Moscow: *izd-vo "KDU"*, "Dobrosvet", 2022. pp. 444–450.
8. Zhirkov A., Sivtsev M., Lytkin V., Séjourné A., Wen Z. An Assessment of the Possibility of Restoration and Protection of Territories Disturbed by Thermokarst in Central Yakutia, Eastern Siberia. *Land*. 2023;12(1):197. DOI: <https://doi.org/10.3390/land12010197>
9. Osokin N. I., Sosnovsky A. V., Chernov R. A. Influence of snow cover stratigraphy on its thermal resistance. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2013;53(3):63–70. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-3-63-70>
10. Kirillin A. R., Zheleznyak M. N., Zhirkov A. F., Misaylov I. E., Verkhoturov A. G., Sivtsev M. A. Features of snow accumulation and snow cover parameters on the Elkon mountain range. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta = Transbaikal State University Journal*. 2020;26(7):62–76. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2020-26-7-62-76>
11. Galkin A. F. Equivalent thermal resistance of the road surface. *Arktika i Antarktika = Arctic and Antarctica*. 2022;(3):129–138. (In Russ.). URL: https://www.nbpublish.com/library_read_article.php?id=38777
12. Galkin A. F., Pankov V. Yu., Vasileva M. R. Thermal conductivity of snow cover. *Stroitelnie materiali = Construction materials*. 2024;(10):62–67. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-829-10-62-67>
13. Fierz C., Armstrong R. L., Durand Y., Etchevers P., Green E., McClung D. M. 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. 80 p. URL: https://www.geobotany.org/library/pubs/FierzC2009_snow_classif_UNESCO.pdf
14. Fukusako S. Thermophysical properties of ice, snow, and sea ice. *International Journal of Thermophysics*. 1990;11(2):353–372. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01133567>
15. Calonne N., Milliancourt L., Burr A., Philip A., Martin C. L., Flin F., Geindreau C. Thermal conductivity of snow, firn, and porous ice from 3-D image-based computations. *Geophysical Research Letters*. 2019;46(22):13079–13089. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GL085228>

16. Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow. *Journal of Glaciology*. 1997;43(143):26–41. DOI: <https://doi.org/10.3189/S0022143000002781>
17. Yen Y.-C. Review of the thermal properties of snow, ice and sea ice. NH: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981. 27 p. URL: <https://books.google.com.au/books?id=fh8xryamPxIC>
18. Shapiro L. H., Johnson J. B., Sturm M., Blaisdell G. L. Snow Mechanics Review of the State of Knowledge and Applications. Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, 1997. 126 p. URL: <https://www.inscc.utah.edu/~campbell/snowdynamics/reading/Shapiro.pdf>
19. Borisov V. A., Akinin D. V., Payul A. D. Some issues of changing snow density under compressive load. *Resources and Technology*. 2021;18(3):77–91. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5843>
20. Kruchinin I. N. Formation of Predesigned Packed Snow Surface of Logging Roads. *Izvestiya vissishikh uchebnikh zavedeniy. Lesnoy zhurnal* = Bulletin of Higher Educational Institutions. Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). 2012;(1(325)):38–41 (In Russ.). URL: https://lesnoizhurnal.ru/issuesarchive/?ELEMENT_ID=34565

Сведения об авторах

✉ Галкин Александр Фёдорович, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геотермии криолитозоны, ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Мерзлотная, д. 36, г. Якутск, Российская Федерация, 677010, e-mail: mpi@ysn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5924-876X>, e-mail: afgalkin@mail.ru

Железняк Михаил Николаевич, доктор геол.-минерал. наук, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник лаборатории геотермии криолитозоны, ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Мерзлотная, 36, г. Якутск, Российская Федерация, 677010, e-mail: mpi@ysn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>

Жирков Александр Федотович, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геотермии криолитозоны, ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Мерзлотная, 36, г. Якутск, Российская Федерация, 677010, e-mail: mpi@ysn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6721-5338>

Information about the authors

✉ Aleksandr F. Galkin, DSc in Engineering, professor, chief researcher, the Laboratory of Cryolithozone Geothermy, Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36, Permafrost Str., Yakutsk, Russian Federation, 677010, e-mail: mpi@ysn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5924-876X>, e-mail: afgalkin@mail.ru

Mikhail N. Zheleznyak, DSc of Geological and Mineralogical Science, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, chief researcher, the Laboratory of Cryolithozone Geothermy, Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36, Permafrost Str., Yakutsk, Russian Federation, 677010, e-mail: mpi@ysn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4124-6579>

Aleksandr F. Zhirkov, PhD in Engineering, leading researcher, the Laboratory of Cryolithozone Geothermy, Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36, Permafrost Str., Yakutsk, Russian Federation, 677010, e-mail: mpi@ysn.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6721-5338>

✉ – Для контактов / Corresponding author