

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Панков В.Ю., Давыдов Д.Г. Теплопроводность двухслойного снежного покрова // Арктика и Антарктика. 2025. № 4. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.4.75626 EDN: JGHJWM URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=75626

Теплопроводность двухслойного снежного покрова

Галкин Александр Фёдорович

ORCID: 0000-0002-5924-876X

доктор технических наук

Главный научный сотрудник; лаборатория геотермии криолитозоны; Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

677010, Россия, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36, ИМЗ СО РАН. Лаборатория геотермии криолитозоны

✉ afgalkin@yandex.ru



Жирков Александр Федотович

кандидат технических наук

Ведущий научный сотрудник; лаборатория геотермии криолитозоны; Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

677010, Россия, респ. Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36

✉ zhirkov_af@mail.ru



Панков Владимир Юрьевич

кандидат геолого-минералогических наук

доцент; кафедра Строительства дорог и аэродромов; Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

677027, Россия, республика Саха(Якутия), г. Якутск, ул. Белинского, 58

✉ pankov1956@gmail.ru



Давыдов Денис Георгиевич

ORCID: 0009-0000-1795-1521

магистр; Автодорожный факультет; Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

677000, Россия, респ. Саха (Якутия), г. Якутск, ул.Белинского,58

✉ davydov@denis14.ru



[Статья из рубрики "Природные ресурсы Арктики и Антарктики"](#)

DOI:

10.7256/2453-8922.2025.4.75626

EDN:

JGHJWM

Дата направления статьи в редакцию:

24-08-2025

Дата публикации:

03-11-2025

Аннотация: Предметом исследований являлась функциональная связь коэффициента теплопроводности снега и его плотности при слоистой структуре снежного покрова с различными видами снега. Цель исследований: определение области возможного усреднения значений коэффициента теплопроводности двухслойного снежного покрова, включающего зернистый снег и изморозь. Для достижения цели сделана сравнительная оценка точности формул для определения коэффициента теплопроводности зернистого снега и изморози, которые при одинаковой плотности отличаются по теплофизическим характеристикам за счет различной структуры. Для сравнения использованы известные линейные формулы Павлова, Сулаквелидзе и Чернова для изморози и зернистого снега. Влияние температуры на свойства снега не учитывалось. Двухслойный снежный покров рассмотрен как среда с произвольно изменяющимися по высоте слоями, теплопроводность каждого из которых, определяется по различным формулам. Для получения среднего значения коэффициента теплопроводности использовалось понятие средневзвешенного параметра. В данном случае это сумма произведений коэффициента теплопроводности слоя на его толщину, отнесенная к толщине всего снежного покрова. При этом общая формула включает произвольное соотношение слоев в снежном покрове. В результате анализа вариантных расчетов установлены следующие закономерности, возникающие при усреднении коэффициента теплопроводности двухслойного снежного покрова. При игнорировании наличия слоев в снежном покрове и расчете его теплопроводности только по формуле, характерной для зернистого снега, максимальная абсолютная ошибка (в зависимости от соотношения толщин слоев) не превышает 50%. При расчете по формуле, характерной для изморози, максимальная абсолютная ошибка приблизительно в 2 раза больше и составляет почти 100%. Научная новизна исследований заключается в установлении общей количественной закономерности изменения ошибки расчета коэффициента теплопроводности слоистого снежного покрова при использовании формул, полученным для зернистого снега, или только по формулам, характерным для изморози. Результаты вариантных расчетов возникающих ошибок при не учете слоистой структуры снежного покрова и при учете слоистости с помощью средневзвешенного коэффициента теплопроводности представлены в виде 2D и 3D графиков, позволяющих наглядно убедиться в достоверности проведенных исследований и сделанных выводов.

Ключевые слова:

снег, изморозь, плотность, теплопроводность, слой, толщина, формула, расчет, ошибка, температура

Введение. Снег, обладающий уникальными физико-механическими свойствами, издавна используется в качестве строительного материала в различных областях, включая

дорожное строительство, жилищное и сельское хозяйство. Его применение и управление параметрами снежного покрова являются предметом изучения гляциологии, где данный феномен получил название «снеговедение». Снежный покров в северных регионах России сохраняется до 8–10 месяцев и характеризуется значительным разнообразием физических свойств, обусловленных множеством переменных факторов, таких как климатические условия региона, тип местности (лес, степь, городская зона), условия формирования, степень метаморфизма и другие. Снежный покров играет важную роль в формировании климата криолитозоны и в хозяйственной деятельности человека [1,2], Например, снежная мелиорация определяет урожайность в сельском хозяйстве [3]. В работе [4] показано, что снежная мелиорация может эффективно использоваться для восстановления сельскохозяйственных земель, поврежденных термокарстом. Управление свойствами снежного покрова позволяют повысить производительность и экономическую эффективность труда в горной промышленности при открытой разработке месторождений полезных ископаемых в криолитозоне [5,6,7]. Особое значение имеет снежный покров в автодорожной отрасли, при строительстве сухопутных зимников в криолитозоне, обеспечивающих коммуникацию между населенными пунктами, при отсутствии обычных автомобильных дорог [8,9]. Тепловые расчёты при проектировании зимников в криолитозоне включают в себя определение температурных режимов грунта, анализ теплообмена между дорожным покрытием и окружающей средой, а также оценку влияния температурных условий на устойчивость и надёжность дорожного полотна. Тепловые расчёты позволяют определить оптимальные параметры дорожного полотна, которые обеспечат его надёжную эксплуатацию в условиях криолитозоны. Это включает в себя выбор материалов, расчёт толщины слоёв и разработку конструктивных решений, способствующих минимизации деформаций и повреждений дороги из-за суточных и декадных температурных колебаний наружного воздуха. Для выполнения тепловых расчётов используются различные методы и модели, включая численное моделирование с помощью специализированного программного обеспечения. Например, программный комплекс «Фрост-3Д». Точность прогноза при моделировании во многом определяется правильным выбором исходных параметров. При этом, как отмечается в работах [10,11] излишнее усложнение модели, путем введения дополнительных функциональных зависимостей не повышает, а снижает надёжность прогноза при использовании программных комплексов. Зачастую, более простые модели, дают более надёжный прогноз. Одним из определяющих параметров тепловых расчетов взаимодействия атмосферы с грунтом при наличии снежного покрова является коэффициент теплопроводности снега, вариативность и неоднозначность определения которого отмечена во многих работах [12,13,14]. В работе [15] нами было показано, что если слои снега отличаются по плотности, то существует оптимальное соотношение толщин слоев, при которых допустимо усреднение плотности по всей толщине снежного покрова. При этом, известно, что различные виды снега, имея одинаковую плотность, различаются по структуре и имеют разные теплофизические свойства, например, изморозь и зернистый снег [14,16]

Целью исследований являлось определение среднего значения коэффициента теплопроводности двухслойного снежного покрова, включающего зернистый снег и изморозь одинаковой плотности, при различном соотношении толщин отдельных слоев.

Метод. Для достижения цели воспользуемся формулами для расчета коэффициента теплопроводности снега в зависимости от его плотности и вида снега. В настоящее время существует большое количество формул, связывающих теплопроводность снега с

его плотностью. Краткий обзор существующих формул для определения коэффициента теплопроводности снега содержится, например, в работах [12,13,17]. В основном, все математические формулы для расчета коэффициента теплопроводности от плотности снега представлены либо полиномом, либо линейной функцией. В работах [18,19], показано, что в практических целях, с достаточной для инженерных расчетов точностью, можно пользоваться линейными формулами. Поэтому в настоящей работе нами использованы для расчетов зернистого снега формула А.В. Павлова [20], а для изморози формулы Р.А. Чернова [21] и Г.К. Сулаквелидзе [22,23], которые имеют следующий вид, соответственно:

$$\lambda = 1,0 \cdot 10^{-3} \rho \dots\dots\dots(1)$$

$$\lambda = -0,023 + 0,636 \cdot 10^{-3} \rho \dots\dots\dots(2)$$

$$\lambda = 0,51 \cdot 10^{-3} \rho \dots\dots\dots(3)$$

Здесь: λ – коэффициент теплопроводности снега, Вт/мК; ρ – плотность снега, кг/м³.

По данным, приведенным в работе [21] изморозь занимает, в среднем, до 60-70% общей высоты слоя снежного покрова. Это соотношение не является постоянным значением и изменяется в зависимости от региона и периода наблюдений за формированием снежного покрова [24,25].

В общем виде, все три формулы, для двухслойного снежного покрова, можно записать так

$$\lambda_i = k_i \cdot \rho / 1000, \quad i = 1, 2 \dots\dots\dots(4)$$

Здесь и далее будем считать, что индекс единица относится к зернистому снегу, а индекс двойка к изморози. Среднее значение коэффициента теплопроводности снежного покрова найдем по формуле поиска средневзвешенной величины, которая учитывает неравенство толщин отдельных слоев

$$\lambda_0 = (\lambda_1 h_1 + \lambda_2 h_2) / h_0, \quad h_0 = h_1 + h_2 \dots\dots\dots(5)$$

Здесь принято, что h_0 , h_1 и h_2 – толщина снежного покрова, толщина слоя зернистого снега и толщина слоя изморози, соответственно, м.

Примем произвольное соотношение толщин слоев в снежном покрове, то есть

$$h_2 = m h_0 \quad \text{и} \quad h_1 = (m - 1) h_0 \dots\dots\dots(6)$$

Здесь m – показатель (коэффициент) долевого участия толщины изморози в общей толщине снежного покрова ($0 \leq m \leq 1$): если $m = 1$, то весь снежный покров состоит из изморози; если $m = 0$, то весь снежный покров состоит из зернистого снега.

Подставляя соотношения (4) и (6) в формулу (5) получим следующее выражение для определения среднего значения коэффициента теплопроводности двухслойного снежного покрова

$$\lambda_0 = \{(k_1 + m(k_2 - k_1))\rho / 1000 \dots\dots\dots(7)$$

Представляет практический интерес оценка ошибки, которую мы допускаем, если не учитываем слоистость снежного покрова и проводим расчет коэффициента теплопроводности только по формуле (1) характерной для зернистого снега, либо по формулам (2) и (3), характерным для изморози. Такую ошибку можно оценить по формуле, аналогичной приведенной в работе [26]:

$$e = 100 \left(1 - \frac{\lambda_i}{\lambda_0} \right), \% \quad \dots\dots\dots(8)$$

Результаты и обсуждение. Для расчета среднего коэффициента теплопроводности снежного покрова по формуле (7) целесообразно объединить формулы (2) и (3), представив их в виде (4). На рис.1 приведены графики, построенные по результатам вариантных расчетов формулам (2) и (3).

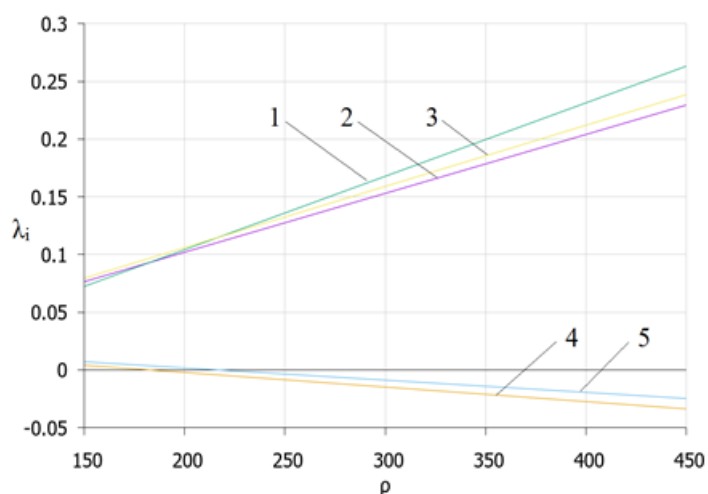


Рис.1. Изменение коэффициента теплопроводности изморози в зависимости от плотности снега при расчете по различным формулам ; 1- Чернова; 2- Сулаквелидзе; 3- усредненной для изморози; 4- невязка расчетов по формулам Чернова и Сулаквелидзе; 5- невязка расчетов по формуле Чернова и усредненной для изморози.

Как видим, несмотря на то, что обе формулы применимы к одному виду снега – изморози, расчеты по ним не совпадают. Поэтому, будем считать, что наиболее рациональным является получение новой зависимости, которая отражала бы среднюю величину коэффициента теплопроводности, вычисленную по указанным формулам Чернова и Сулаквелидзе. Такая линия, обозначена на рисунке номером 3 и соответствует коэффициенту в формуле (4), равному 0,53. Линии 4 и 5 на рисунке соответствуют разности расчетов, выполненных по новой формуле для определения зависимости коэффициента теплопроводности от плотности изморози и исходными формулами Чернова и Сулаквелидзе. Как видно из графиков на рис.1, расхождение результатов расчетов (невязка) по известным формулам и новой формулой незначительны. Наиболее наглядное подтверждение объективности применения новой формулы приведено на рис.2, где в графической форме представлена процентная невязка расчетов по анализируемым формулам.

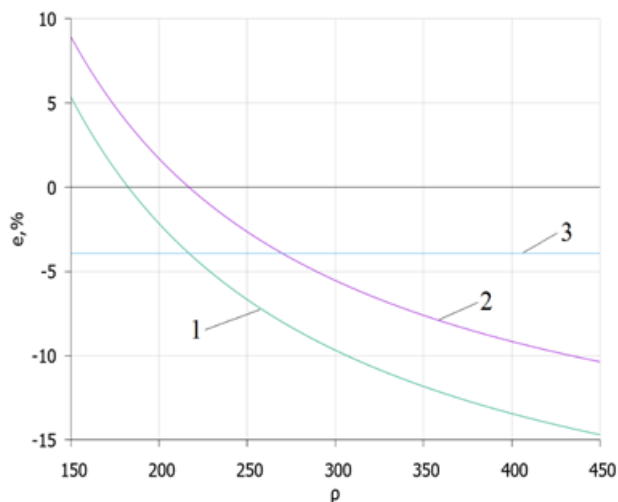


Рис.2. Относительная ошибка (процентная невязка) расчетов коэффициента теплопроводности изморози в зависимости от плотности снега при расчете по различным формулам ; 1- Чернова и Сулаквелидзе; 2 – Чернова и усредненной для изморози;

3 - Сулаквелидзе и усредненной для изморози.

Как видно из графиков, применение новой формулы позволяет значительно сократить ошибку, возникающую при использовании любой из формул. Так, максимальная невязка между формулами Чернова и Сулаквелидзе (кривая 1) составляет 15% , а между новой формулой и формулой Чернова (крива 2) 10%; между новой формулой и формулой Сулаквелидзе (линия 3) всего 4%. То есть, уровень невязки полностью укладывается в диапазон погрешности ($\pm 10,0\%$), допустимый в инженерной практике. Основываясь на данном заключении, в дальнейших расчетах среднего коэффициента теплопроводности по формуле (7) будем использовать при определения коэффициента теплопроводности изморози формулу (4) с коэффициентом $k_2 = 0,53$. На рис.3 приведены в графической форме результаты расчета среднего коэффициента теплопроводности двухслойного снежного покрова при различном соотношении толщин слоев изморози и зернистого снега.

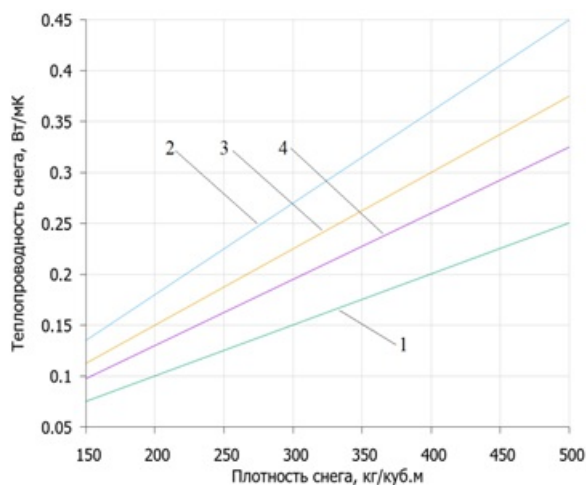


Рис.3. Изменение коэффициента теплопроводности снежного покрова в зависимости от плотности снега при разном долевым участии (m) разных видов снега по высоте;

1 – $m = 1,0$; 2 – $m = 0,2$; 3 – $m = 0,5$; 4 – $m = 0,7$.

Если долевое участие равно $m = 1$, то считается по высоте снежного покрова один вид снега – изморозь (линия 1 на рисунке). Как видно из графиков, при увеличении плотности снега, расхождение результатов расчетов при разном значении параметра « m » увеличивается. Причем, степень увеличения тем больше, чем меньше слой изморози в снежном покрове. Так, если слой изморози составляет 20%, то градиент изменения коэффициента теплопроводности от плотности снега составляет $0,89 \text{ (Вт/мК)/(кг/м}^3\text{)}$, а при увеличении толщины слоя изморози до 70%, градиент уменьшается до $0,63 \text{ (Вт/мК)/(кг/м}^3\text{)}$. То есть почти в 1,4 раза меньше. Визуально это хорошо видно на рисунке, если сравнить степень наклона линий 2 и 4. На рис.4 приведены значения абсолютных ошибок, возникающих при не учете слоистости снежного покрова при различной доле разных видов снега.

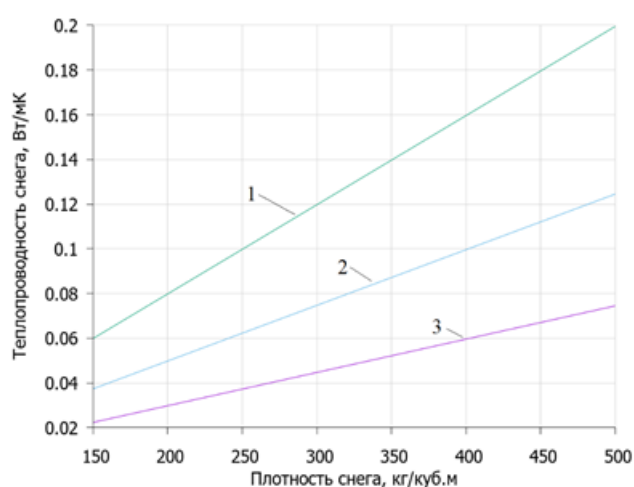


Рис.4. Абсолютная ошибка расчета коэффициента теплопроводности снежного покрова в зависимости от плотности снега при разном долевом участии (m) изморози по высоте;

1 – $m = 0,2$; 2 – $m = 0,5$; 3 – $m = 0,7$.

Если долевое участие равно $m=1$, то считается по высоте снежного покрова один вид снега – изморозь и ошибка равна нулю. Здесь наблюдается та же закономерность, которая установлена при анализе графиков на предыдущем рисунке: градиент изменения абсолютной ошибки увеличивается с уменьшением доли изморози в снежном покрове. С увеличением плотности снежного покрова значение абсолютной ошибки возрастает во всем рассматриваемом диапазоне плотности снега. На рис.3 и 4 мы рассматривали изменение теплопроводности слоистого снежного покрова по сравнению с однородным покровом, состоящим только из изморози. На рис.5 представлен 3D график, характеризующий коэффициент теплопроводности снежного покрова в зависимости от плотности снега при разном долевом участии (m) изморози по высоте; 1 – при расчете теплопроводности снежного покрова как зернистого снега; 2 – при расчете теплопроводности снежного покрова как слоистой среды из изморози и зернистого снега.

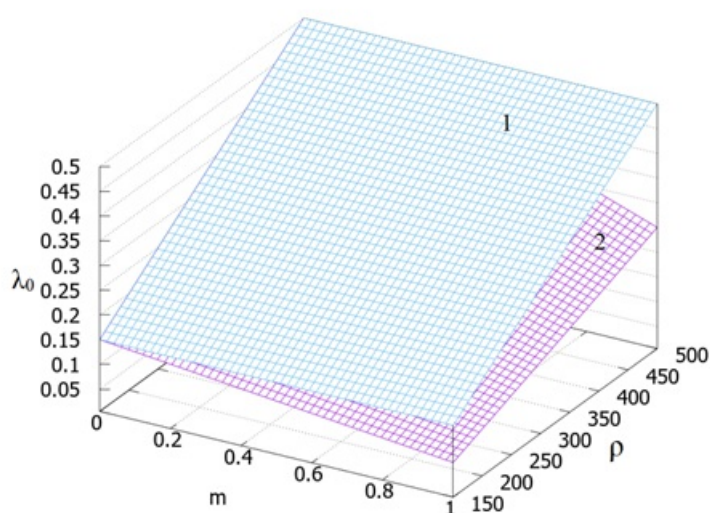


Рис.5. Коэффициент теплопроводности снежного покрова в зависимости от плотности снега при разном доленом участии (m) изморози по высоте; 1 - при расчете теплопроводности снежного покрова как зернистого снега; 2 - при расчете теплопроводности снежного покрова как слоистой среды из изморози и зернистого снега.

Если доленое участие равно $m=1$, то считается по высоте снежного покрова один вид снега – изморозь. Если доленое участие равно $m=0$, то считается по высоте снежного покрова один вид снега – зернистый. Как видно из графика две плоскости на рисунке существенно отстоят друг от друга. Это означает, что без учета слоистости (считая, что весь снежный покров состоит из изморози) можно допустить существенную ошибку в определении коэффициента теплопроводности снежного покрова. Это подтверждается графиком на рисунке 6, где приведены результаты расчетов коэффициента теплопроводности снежного покрова в зависимости от плотности снега при разном доленом участии изморози по высоте и возникающая при этом абсолютная ошибка не учета слоистости. То есть, представление снежного покрова, как сплошной среды, состоящей из зернистого снега.

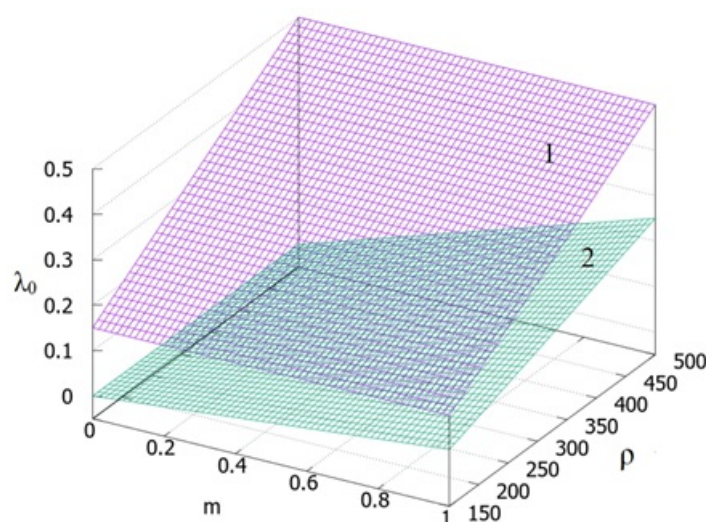


Рис.6. Коэффициент теплопроводности снежного покрова в зависимости от плотности снега при разном доленом участии (m) изморози по высоте; 1 - при расчете теплопроводности снежного покрова как зернистого снега; 2 – абсолютная ошибка при расчете теплопроводности снежного покрова как слоистой среды из изморози и зернистого снега по сравнению с только зернистым снегом.

Если доленое участие равно $m=1$, то считается по высоте снежного покрова один вид снега – изморозь. Если доленое участие равно $m=0$, то считается по высоте снежного покрова один вид снега – зернистый.

На рис.7 приведены результаты расчетов в виде 3Д графика относительной ошибки расчета коэффициент теплопроводности снежного покрова в зависимости от плотности снега при разном доленом участии (m) изморози по высоте при расчете теплопроводности снежного покрова как слоистой среды из изморози и зернистого снега: А) по сравнению с только изморозью по сравнению с только зернистым снегом; Б) по сравнению с только зернистым снегом.

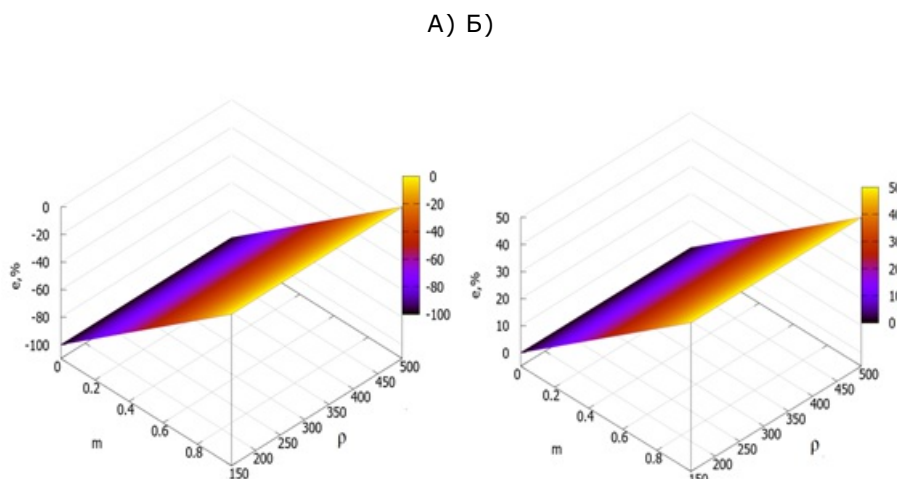


Рис.7. Относительная ошибка расчета коэффициент теплопроводности снежного покрова в зависимости от плотности снега при разном доленом участии (m) изморози по высоте при расчете теплопроводности снежного покрова как слоистой среды из изморози и зернистого снега: А) по сравнению с расчетом по формуле для изморози; Б) по сравнению с расчетом по формуле для зернистого снега.

Из сравнения графиков на рисунке следует важный вывод, что для большинства характерных случаев, имеющих место на практике [\[21,24,25\]](#), не учет слоистости снежного покрова и вида снега в отдельных слоях, может приводить к существенным ошибкам в расчетах коэффициента теплопроводности снежного покрова и, соответственно, его термического сопротивления. При этом, как при моделировании снежного покрова однородным зернистым снегом, так и представлении его однородной изморозью, относительная ошибка в расчетах кратно превышает ошибку, допустимую в инженерной практике.

Заключение. Исследована функциональная связь коэффициента теплопроводности снега и его плотности при слоистой структуре снежного покрова с различными видами снега: изморозью и зернистым снегом, которые при одинаковой плотности отличаются по

теплофизическим характеристикам за счет различной структуры. Двухслойный снежный покров рассмотрен как среда с произвольно изменяющимися по высоте слоями, теплопроводность каждого из которых, определяется по различным формулам. Сделана сравнительная оценка согласованности формул Сулаквелидзе и Чернова для определения коэффициента теплопроводности изморози, Получена новая формула для определения функциональной связи коэффициента теплопроводности изморози с ее плотностью. На основе понятия средневзвешенной величины получена зависимость для определения коэффициента теплопроводности двухслойного снежного покрова с разными видами снега. Общая расчетная формула включает произвольное соотношение толщин слоев в снежном покрове. В результате анализа вариантных расчетов установлены следующие закономерности, возникающие при усреднении коэффициента теплопроводности двухслойного снежного покрова. При игнорировании наличия слоев в снежном покрове и расчете его теплопроводности только по формуле, характерной для зернистого снега, максимальная абсолютная ошибка (в зависимости от соотношения толщин слоев) не превышает 50%. При расчете по формуле, характерной для изморози, максимальная абсолютная ошибка почти в 2 раза больше и составляет почти 100%. Без учета вида снега в отдельных слоях, ошибка в расчетах коэффициента теплопроводности снежного покрова и, соответственно, его термического сопротивления может быть значительной. При этом, как при моделировании снежного покрова однородным зернистым снегом, так и представлении его однородной изморозью, относительная ошибка в расчетах кратно превышает ошибку, допустимую в инженерной практике. Результаты вариантных расчетов возникающих ошибок при не учете слоистой структуры снежного покрова и при учете слоистости с помощью средневзвешенного коэффициента теплопроводности представлены в виде 2D и 3D графиков, позволяющих наглядно убедиться в достоверности проведенных исследований и сделанных выводов.

Дальнейшие исследования в необходимо направить на получение функциональных связей между теплофизическими характеристиками снежного покрова и коэффициентом уплотнения, при полном и частичном уплотнении многослойного снежного покрова. Статья имеет как научное, так и прикладное значение и может быть полезна специалистам в области гляциологии (снеговедение) и инженерного мерзлотоведения, а также студентам, обучающимся по направлению «Строительство дорог и аэродромов».

Работа выполнена по государственному заданию по теме «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика» (**№ 122011800062-5**).

Библиография

1. Park H., Fedorov A.N., Zheleznyak M.N., Konstantinov P.N., Walsh J.E. Effect of snow cover on pan-Arctic permafrost thermal regimes // *Climate Dynamics*. 2015. Vol. 44. P. 2873–2895. doi: 10.1007/s00382-014-2356-5 EDN: UFQFIF.
2. Рихтер Г.Д. Роль снежного покрова в физико-географическом процессе. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1948. 171 с.
3. Шульгин А.М. Снежная мелиорация и климат почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 70 с.
4. 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. Vol. 12, No. 1. P. 197. DOI: 10.3390/land12010197 EDN: CSHWRO.
5. Перльштейн Г.З. Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.
6. Рашкин А.В., Авдеев П.Б., Субботин Ю.В. Тепловая и водная подготовка горных пород

- при разработке мерзлых россыпей. М.: "Горная книга", 2007. 355 с. EDN: RAYORR.
7. Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Панков В.Ю., Плотников Н.А. Анализ результатов исследований теплового режима природных и техногенных курумов криолитозоны // Арктика и Антарктика. 2024. № 4. С. 1-12. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.4.71939 EDN: MQQKHP URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=71939
8. Асанкожоев Е.Ж., Караев Э.С., Третьяков П.Ю., Ничипорук Л.С. Оптимизация технологии строительства зимних дорог // Инженерный вестник Дона. 2022. No. 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7632 EDN: HXWLIJ.
9. Мерданов Ш.М., Спиричев М.Ю., Шаруха А.В., Егоров А.Л. Технология строительства снеголедовых дорог // Современные проблемы науки и образования. 2013. No. 5. DOI: <https://doi.org/10.17513/spno.2013.5.111-10427> EDN: RRJRBX.
10. Menard C., Essery R., Turkov D. et al. Scientific and human errors in a snow model intercomparison // Bulletin of the American Meteorological Society. 2021. Vol. 201, No. 1. P. E61-E79. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0329.1> EDN: MSKHVJ.
11. Krinner G., Derksen C., Richard E. et al. ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks // Geosci. Model Dev. 2018. Vol. 11. P. 5027–5049. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-5027-2018>. EDN: JSWCOD.
12. Yen Y.-C. Review of the thermal properties of snow, ice and sea ice. Tech. Rep. No. 81-10. Hanover, NH: Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981.
13. 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. Vol. 46. P. 13,079-13,089. <https://doi.org/10.1029/2019GL085228> EDN: KUPOST.
14. Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K. The thermal conductivity of seasonal snow // Journal of Glaciology. 1997. Vol. 43, No. 143. P. 26-41.
15. Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Васильева М.Р. Коэффициент теплопроводности снежного покрова // Строительные материалы. 2024. No. 10. P. 62-67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-829-10-62-67> EDN: QLQRFF.
16. Фирц Ш., Армстронг Р.Л., Дюран И., Этхеви П., Грин И., МакКланг Д.М., Нишимура К., Сатьявали П.К., Сократов С.А. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова). Русское издание // МГИ. 2012. No. 2. 80 с.
17. Поздняков С.П., Гриневский С.О., Дедюлина Е.А., Кореко Е.С. Чувствительность результатов моделирования сезонного промерзания к выбору параметризации теплопроводности снежного покрова // Лед и снег. 2019. Т. 59, No. 1. P. 67-80. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-67-80 EDN: ZAGNET.
18. Галкин А.Ф., Плотников Н.А. Расчет коэффициента теплопроводности снежного покрова // Арктика и Антарктика. 2023. № 3. С. 16-23. DOI: 10.7256/2453-8922.2023.3.43733 EDN: VMDOVA URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=43733
19. Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Панков В.Ю. Ошибки линеаризации зависимости коэффициента теплопроводности снега от плотности // Арктика и Антарктика. 2025. № 2. С. 141-149. DOI: 10.7256/2453-8922.2025.2.74710 EDN: RJJDIG URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=74710
20. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: ГЕО, 2008. 230 с.
21. Чернов Р.А. Экспериментальное определение эффективной теплопроводности глубинной изморози // Лед и снег. 2013. No. 3 (123). P. 71-77. EDN: RFLXEJ.
22. Куваева Г.М., Сулаквелидзе Г.К. Физические свойства снежного покрова Большого Кавказа. М.: Наука, 1967. 193 с.
23. Sulakvelidze G.K. Thermo-conductivity equation for vapor diffusivity of naturally

compacted snow // Bulletin of the Academy of Sciences USSR. Geophysical Series. 1959. P. 186-188.

24. 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. Т. 26. No. 7. P. 62-76. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-62-76 EDN: FOCISC.

25. Осокин Н.И., Сосновский А.В. Экспериментальные исследования коэффициента эффективной теплопроводности снежного покрова на Западном Шпицбергене // Лед и снег. 2014. Т. 54, No. 3. P. 50-58. EDN: QXIPZK.

26. Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Адамов А.А. Сравнительный анализ формул для определения плотности снежного покрова // Строительные материалы. 2024. No. 11. P. 73-78. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-830-11-73-78> EDN: HCOQAG.

Результаты процедуры рецензирования статьи

Рецензия выполнена специалистами [Национального Института Научного Рецензирования](#) по заказу ООО "НБ-Медиа".

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов можно ознакомиться [здесь](#).

Предметом статьи является изучение вопроса теплопроводности двухслойного снежного покрова в криолитозоне.

Актуальность исследования автором отражена достаточно. В статье отмечено, что снежный покров играет важную роль в формировании климата криолитозоны и в хозяйственной деятельности человека. Управление свойствами снежного покрова позволяет повысить производительность и экономическую эффективность труда в горной промышленности при открытой разработке месторождений полезных ископаемых в криолитозоне. Особое значение имеет снежный покров в автодорожной отрасли, при строительстве сухопутных зимников в криолитозоне, обеспечивающих коммуникацию между населенными пунктами, при отсутствии обычных автомобильных дорог. Тепловые расчёты позволяют определить оптимальные параметры дорожного полотна, которые обеспечат его надёжную эксплуатацию в условиях криолитозоны. Одним из определяющих параметров тепловых расчетов взаимодействия атмосферы с грунтом при наличии снежного покрова является коэффициент теплопроводности снега, вариативность и неоднозначность определения которого отмечена во многих работах. В связи с этим, целью исследования являлось определение среднего значения коэффициента теплопроводности двухслойного снежного покрова, включающего зернистый снег и изморозь одинаковой плотности, при различном соотношении толщин отдельных слоев.

Методология исследования основана на применении метода математических формул для расчета коэффициента теплопроводности от плотности снега.

Научная новизна исследований в статье заключается в том, что авторы предлагают применять новую формулу, выведенную ими впервые, для расчета теплопроводности двухслойного снежного покрова, что позволяет значительно сократить ошибку при расчетах.

Стиль статьи – научный, с элементами теоретической математики. Стиль статьи, ее структура и объём соответствуют требованиям журнала «Арктика и Антарктика». Результаты исследований широко представлены в графиках, формулах и рисунках. Автор утверждает, что если не проводить учет слоистости снежного покрова и вида снега в отдельных слоях, то это может приводить к существенным ошибкам в расчетах

коэффициента теплопроводности снежного покрова и, соответственно, его термического сопротивления. При этом, как при моделировании снежного покрова однородным зернистым снегом, так и представлении его однородной изморозью, относительная ошибка в расчетах кратно превышает ошибку, допустимую в инженерной практике.

Библиография статьи включает в себя 26 литературных источников, в том числе 8 -на иностранном языке. В качестве замечания следует отметить, что в списке цитируемой литературы 37 % (7 наименований) старых источников периода 1948-1997 гг. Желательно процитировать более современные источники по данной теме исследования. Выводы в статье достаточно обоснованы. Автором на основе понятия средневзвешенной величины получена зависимость для определения коэффициента теплопроводности двухслойного снежного покрова с разными видами снега. Общая расчетная формула включает произвольное соотношение толщин слоев в снежном покрове. Сделана сравнительная оценка согласованности формул Сулаквелидзе и Чернова для определения коэффициента теплопроводности изморози, Получена новая формула для определения функциональной связи коэффициента теплопроводности изморози с ее плотностью.

Однако, хочется пожелать, чтобы выводы в научной статье были более конкретными, а обсуждения в них не включались. Автору также необходимо более четко выделять практическую значимость полученных результатов исследования.

Данная статья может быть полезна широкому кругу читателей: специалистам в области гляциологии и инженерного мерзлотоведения. Рецензируемая статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» после устранения замечаний.