

Арктика и Антарктика

Правильная ссылка на статью:

Галкин А.Ф., Панков В.Ю. Сравнение методов оценки термического сопротивления слоистого снежного покрова // Арктика и Антарктика. 2025. № 4. С. 196-207. DOI: 10.7256/2453-8922.2026.1.76960 EDN: ETNCDW URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=76960](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=76960)

## Сравнение методов оценки термического сопротивления слоистого 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](mailto:afgalkin@yandex.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](mailto:pankov1956@gmail.ru)



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

### DOI:

10.7256/2453-8922.2026.1.76960

### EDN:

ETNCDW

### Дата направления статьи в редакцию:

24-11-2025

### Дата публикации:

01-12-2025

**Аннотация:** Предметом исследования является снежный покров, состоящий из произвольного количества слоев разной толщины с различной плотностью снега.

Исследовано термическое сопротивление такого покрова. Одним из основных параметров при исследовании взаимодействия инженерных сооружений различного назначения со снегом, является термическое сопротивление снежного покрова. Целью работы являлась оценка точности расчета термического сопротивления слоистого снежного покрова при усреднении плотности снега по глубине. Рассмотрены два подхода в определении термического сопротивления снежного покрова: как слоистой структуры и как эквивалентной однородной структуры, имеющей постоянную среднюю плотность, рассчитываемую как средневзвешенная величина. Для расчетов термического сопротивления использовались классические формулы определения коэффициента теплопроводности от плотности снежного покрова – формулы Г.П. Абельса и Н.И.Осокина. Выполнено сравнение двух расчетных способов вычисления термического сопротивления снежного покрова: как суммы термических сопротивлений слоев и как однослойную структуру со средневзвешенной плотностью. Научная новизна работы заключается в установлении количественных закономерностей точности определения термического сопротивления слоистого снежного покрова. В частности установлено, что при нелинейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега ошибка возрастает с увеличением коэффициента уплотнения одного из слоев. Например, при увеличении плотности слоя в 2 раза относительная ошибка расчета изменяется от 20 до 30,0% и зависит от соотношения толщин отдельных слоев. Установлено, что при уплотнении одного из слоев, менее чем в 1,6 раза, применение понятия «средней плотности снежного покрова» в тепловых расчетах по определению термического сопротивления снежного покрова, является вполне приемлемым. При увеличении степени уплотнения, необходимо рассчитывать общее термическое сопротивление снежного покрова, как сумму термических сопротивлений отдельных слоев, как это принято в строительной теплофизике при определении термического сопротивления ограждающих конструкций. Дальнейшие исследования целесообразно направить на определение точности расчета термического сопротивления при зависимости плотности снега от толщины слоя, а также при учете влияния структуры снега при постоянной плотности на коэффициент теплопроводности.

**Ключевые слова:**

снег, термическое сопротивление, теплопроводность, слоистость, плотность, расчет, ошибка, точность, прогноз, толщина слоя

**Введение.** Снег в качестве строительного материала используется с давних времен и в различных областях строительства: дорожном, жилищном, сельском и др. [\[1, 2, 3\]](#). Использование и управление параметрами снежного покрова является частью науки гляциологии и в академической среде носит название «снеговедение» [\[4, 5\]](#). Снежный покров на территории нашей страны во многих северных регионах держится до 8-10 месяцев и отличается большим разнообразием физических свойств, которые зависят от огромного количества переменных параметров: климата региона, вида местности (лес, степь, селитебная зона), условий формирования, степени метаморфизма, и т.д. [\[6,7,8,9\]](#). Подробный анализ формирования свойств снежного покрова содержится в фундаментальных работах [\[3,5,6\]](#). С теплофизической точки зрения наиболее востребованным параметром при прогнозных инженерных расчетах является термическое сопротивление снежного покрова, которое напрямую зависит от коэффициента теплопроводности снега [\[4,7,8\]](#). Как правило, ввиду многообразия

строения и структуры снежного покрова, при определении расчетного значения коэффициента теплопроводности, используется его зависимость от плотности снега, которая считается некоторой усредненной величиной для конкретного объекта исследований [8,10,11]. Этот прием часто используется, при решении прикладных задач инженерного мерзлотоведения, когда снежный покров рассматривается как термическое сопротивление (т.е. используются граничные условия третьего рода). Для определения термического сопротивления необходимо знать коэффициент теплопроводности снежного покрова, который зависит от плотности снега [12,13,14]. В современных расчетных комплексах, реализующих математические модели «атмосфера - снежный покров - грунт», снежный покров обычно рассматривают как сложную многофункциональную структуру, свойства которой зависят от множества взаимосвязанных параметров. Однако, как отмечено в работе [15], посвященной комплексному анализу таких моделей, в большинстве случаев, такое усложнение модели и введение в нее дополнительно большого число факторов, трудно определяемых теоретически и имеющих большую вариативность в реальных условиях, не приводит к повышению точности прогноза. Более того, надежность таких моделей, как правило, уменьшается при попытках ввести в них новые, частные закономерности и функциональные зависимости между исходными параметрами. Большинство исследователей, сходятся во мнении, что для инженерных целей вполне пригодным является рассмотрение снежного покрова в качестве термического сопротивления между атмосферой и грунтом [16,17,18]. Существует огромное количество формул, определяющих функциональную связь между коэффициентом теплопроводности и плотностью снега, Сравнительный анализ отдельных, наиболее популярных формул, с данными экспериментальных исследований приведен, например, в работе [8]. В работах сотрудников института географии РАН [12,13] сделана попытка получить обобщенную формулу (на основании анализа 20 наиболее популярных формул), которую авторы представили в виде параболической зависимости. В этом, практически, сходятся все авторы расчетных формул, полученных на основе экспериментальных исследований снежного покрова в различных регионах мира: зависимость коэффициента теплопроводности от плотности имеет, как правило, степенной вид или может быть линейной для отдельных, частных случаев. Например, для температуры воздуха ниже  $-20,0^{\circ}\text{C}$  [10]. Обычно, при вычислении коэффициента теплопроводности используется понятие «средняя плотность снега» в снежном покрове. Это справедливо, по всей вероятности, только, если плотность слоев несущественно отличается друг от друга. В то же время, многие исследователи отмечают, что в реальности более-менее однородных слоев снега в снежном покрове, практически, не встречается [6,8,9,10,12]. Особенно этот эффект ярко проявляется при снежной мелиорации (трамбовании) снежного покрова [19,20]. Когда на утрамбованный снег, выпадает свежий. В этом случае образуется двухслойная структура снежного покрова, где плотность отдельных слоев может изменяться кратно. Соответственно и коэффициенты теплопроводности каждого слоя будут различны. Поэтому представляет практический интерес найти ответ на вопрос: «Какую ошибку мы совершаем, если расчет термического сопротивления двухслойного покрова проводим напрямую по средней плотности, а не определяем как сумму термических сопротивлений отдельных слоев?». Ответ на этот вопрос даст возможность обоснованно рассчитывать термическое сопротивление неоднородного снежного покрова и с достаточной степенью надежности выполнять тепловые расчеты взаимодействия снежного покрова с инженерными сооружениями.

**Цель работы.** Определить точность вычисления термического сопротивления слоистого

снежного покрова при усреднении плотности снега по глубине.

**Метод.** Рассмотрим слоистый снежный покров высотой « $H$ », в котором произвольное количество слоев « $n$ » имеют разную толщину « $h_i$ » и плотность « $\rho_i$ ». В этом случае, для достижения цели необходимо сравнить два расчетных способа вычисления термического сопротивления снежного покрова.

$$R_{e1} = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n [h_i / \lambda(\rho_i)] \dots\dots\dots (1)$$

$$R_{e2} = (\sum_{i=1}^n h_i) / \lambda(\rho_m) = H / \lambda(\rho_m) \dots\dots\dots (2)$$

$$\rho_m = [\sum_{i=1}^n (h_i \rho_i)] / H \dots\dots\dots (3)$$

Здесь  $\rho_m$  – среднее значение плотности многослойного снежного покрова, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_i$  – плотность отдельного слоя снежного покрова, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda(\rho_i), \lambda(\rho_m)$  – коэффициент теплопроводности отдельного слоя и всего снежного покрова, Вт/мК;  $h_i, H$  – толщина отдельного слоя и высота всего снежного покрова, м.

Степень разногласия результатов (относительную процентную ошибку) расчета термического сопротивления по формулам (1) и (2) можно определить, используя известную зависимость [24]:

$$e = 100 * (1 - R_{e2} / R_{e1}) = 100 * (1 - q) \dots\dots\dots (4)$$

Анализ приведенных выше формул показывает, что основное влияние на точность расчета коэффициента теплопроводности оказывает модельное представление зависимости коэффициента теплопроводности от плотности.

Для нахождения коэффициента теплопроводности как функции плотности снега воспользуемся классической формулой Абельса [22,23]. В работе [23], отмечается, что «одно из первых определений тепловых и прочностных характеристик снега, не потерявших значения до настоящего времени, было выполнено Г. П. Абельсом в 1893 г. в Свердловске. Абельс определил коэффициенты тепло- и температуропроводности снега на площадке обсерватории по ежечасным наблюдениям за температурой снега, выполненным на глубинах 5 и 10 см.» [23]. Зависимость между коэффициентом теплопроводности и плотностью снега, полученную Г.П. Абельсом в результате обработки данных экспериментальных исследований, можно записать в следующем виде:

$$\lambda = 2.85j^2/100, \quad j = \rho/100 \dots\dots\dots (5)$$

В работе [12,13] получена обобщенная формула (на основании анализа 20 наиболее известных расчетных формул), которую с учетом анализа, выполненного в работе [14], можно записать так:

$$\lambda = (9 - 4j + 3j^2)/100, \quad j = \rho/100 \dots\dots\dots (6)$$

Недостатком этой формулы является то, что она справедлива, по данным авторов, в ограниченном диапазоне изменения параметра « $j$ » ( $2,0 \leq j \leq 4,0$ ). Формула Г.П.Абельса является более универсальной. Поэтому нами в работе [25] проведено сравнение точности определения коэффициентов теплопроводности двух формул в данном диапазоне. Показано, что формулы Г.П. Абельса (5) и обобщенная формула Н.И. Осокина (6) дают результаты, находящиеся в допустимом в инженерной практике

диапазоне разногласия и можно считать применение формулы Г.П. Абельса достаточно надежным и обоснованным. Далее в обсуждении мы приведем более подробные выдержки и графики их этой статьи.

Для наглядности и численного анализа рассмотрим двухслойный снежный покров. В этом случае, с учетом того, что  $h_2 = n \cdot h_1$  и  $\rho_2 = k \cdot \rho_1$ , после несложных преобразований, используя формулы (1)-(3), получим следующие зависимости

$$R_{e1} = \sum_{i=1}^2 R_i = P(1 + n/k^2) \dots\dots\dots (7)$$

$$R_{e2} = (\sum_{i=1}^2 h_i) / \lambda(\rho_m) = P[(n+1)^3 / (1+nk)^2] \dots\dots\dots (8)$$

Где:  $P = h_1 / (2,85 \rho_1^2)$

Параметр «q», входящий в формулу (4) найдем из выражения

$$q = (1 + n/k^2) / [(n+1)^3 / (1+nk)^2] \dots\dots\dots (9)$$

**Результаты и обсуждение.** Отметим, что все дальнейшие рассуждения действительны только для нелинейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности. Если зависимость коэффициента теплопроводности принять линейной от плотности [\[4,8,10\]](#), то, несложно показать, что параметр «e» всегда равен нулю. Как при равной, так и не равной толщине слоев снежного покрова.

То есть, в случае линейной зависимости коэффициента теплопроводности снежного покрова от плотности, выбор модели для расчета термического сопротивления слоистой структуры снежного покрова не имеет значения.

Для объективности использования базовых расчетных зависимостей, оценим степень разногласия результатов расчетов при использовании формул Абельса и Осокина.

На графиках рис.1 приведены результаты сравнения расчетов по формулам Абельса (5) и Осокина (6) [\[25\]](#).

А)..... Б)

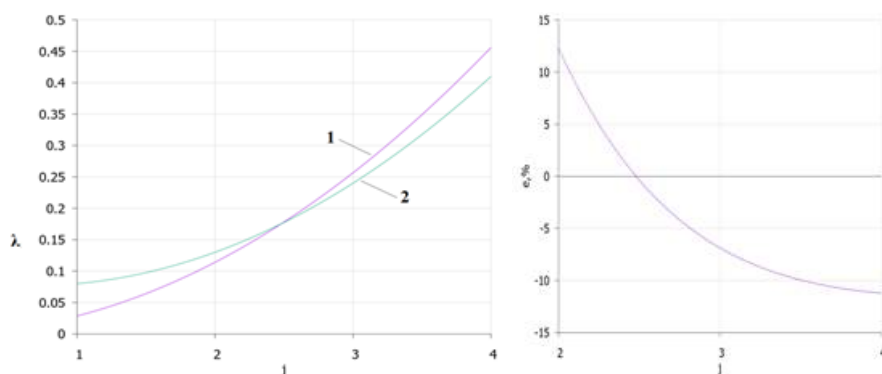


Рис.1. Сравнение расчетных значений коэффициента теплопроводности:

А) по формулам Абельса (кривая 1) и Осокина (кривая 2)

Б) процентная степень «несогласия» формул

На рис.1-А показано изменение коэффициента теплопроводности снежного покрова в

зависимости от плотности снега. Как видно из графиков, результаты достаточно близки, во все рассмотренном диапазоне изменения плотности снега. На рис. 1- Б показан график, подтверждающий, визуальную оценку: процентное расхождение результатов расчета по формулам не превышает значений, допустимых в инженерной практике. Необходимо также учесть, что все экспериментальные формулы имеют определенный интервал точности. Многообразие видов снега и структуры снежного покрова, позволяют использовать расчетные формулы, только как оценочные, реальные результаты которых являются допустимыми в некоторых пределах. То есть,  $\lambda = \lambda_f \pm (\mu \lambda_f)$ . Где  $\lambda_f$  - значение коэффициента теплопроводности, вычисленное по математической формуле, Вт/мК;  $\mu$  - параметр, определяющий допустимую точность определения искомой величины, д.е. В технических инженерных расчетах допустимой величиной, обычно, считается значение  $\mu \leq 0.1$ , или  $\pm 10\%$ . В нашем случае, как следует из сравнения экспериментальных и расчетных данных по термическому сопротивлению снежного покрова на различных территориях [16], вполне допустимым является изменение значения параметра « $\mu$ » в пределах 0.1- 0.25. Об этом же свидетельствуют и данные сравнения расчетных формул для определения коэффициента теплопроводности снега, полученных разными авторами, приведенные в работах [8,17]. На рис. 2 приведены результаты сравнительных расчетов по формуле Абельса в диапазоне  $\pm 10\%$  с результатами расчетов по формуле Осокина.

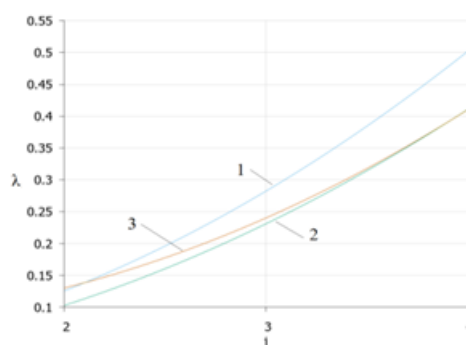


Рис.2. Расчетный коэффициент теплопроводности по формулам Осокина (кривая 3) и 10%.

диапазон изменения значений коэффициента теплопроводности  
по формуле Абельса ( кривые 1и 2)

Как видно из графиков, кривая 3 (расчет по обобщенной формуле Осокина) на рисунке попадает в десятипроцентный диапазон колебаний расчетных значений, полученных по формуле Абельса ( кривые 1 и 2). То есть, учитывая степень вариативности исходных значений, в принципе, не имеет значения по какой формуле проводить расчеты. Далее нами в расчетах использовалась формула Абельса, которую можно считать классической и универсальной для обобщенного анализа.

На рис.3 приведен график допускаемой ошибки при расчете термического сопротивления двухслойного снежного покрова с использованием понятия «средней плотности снежного покрова» в зависимости от степени изменения плотности одного из слоев при их различной толщине.

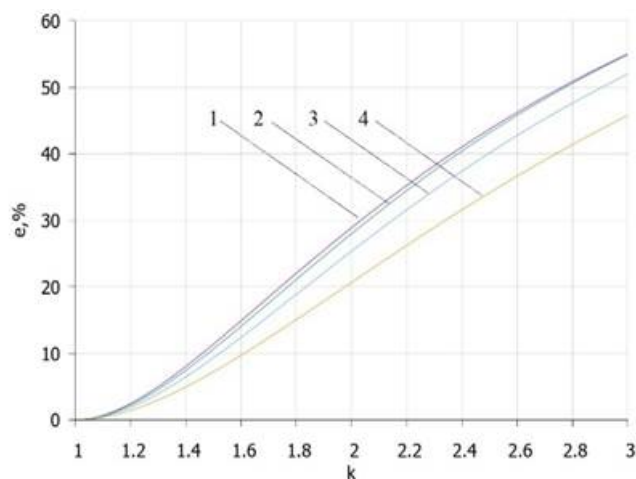


Рис.3. Процентное расхождение результатов расчета термического сопротивления двухслойного снежного покрова, в зависимости от коэффициента изменения плотности « $k$ » второго слоя по отношению к первому слою при разной толщине слоев ( $h_2=n \cdot h_1$ ):

1 -  $n=1$ ; 2-  $n=2$ ; 3-  $n=3$ ; 4 -  $n=5$ .

Как видно из графика на рисунке, с увеличением коэффициента уплотнения одного из слоев, расхождение результатов расчета термического сопротивления двухслойного снежного покрова, по формулам (1) и (2), увеличивается. Например, при увеличении плотности в 2 раза ( $k=2$ ) относительная ошибка расчета изменяется от 20 до 30,0%. В зависимости от соотношения толщин отдельных слоев. Причем, чем больше соотношение, тем меньше относительная процентная ошибка расчета. Анализ графиков на рисунке также показывает, что для любых соотношений толщин слоев с увеличением коэффициента изменения плотности процентная ошибка возрастает. В этой связи представляет интерес определить при каких значениях параметров « $n$ » и « $k$ », то есть степени изменения плотности и толщины отдельных слоев расчетная ошибка не превысит значений, допустимой в инженерной практике ( $e \leq 10\%$ ). На рис.4 представлен график, позволяющий определить такой диапазон изменения значений параметров « $n$ » и « $k$ ».

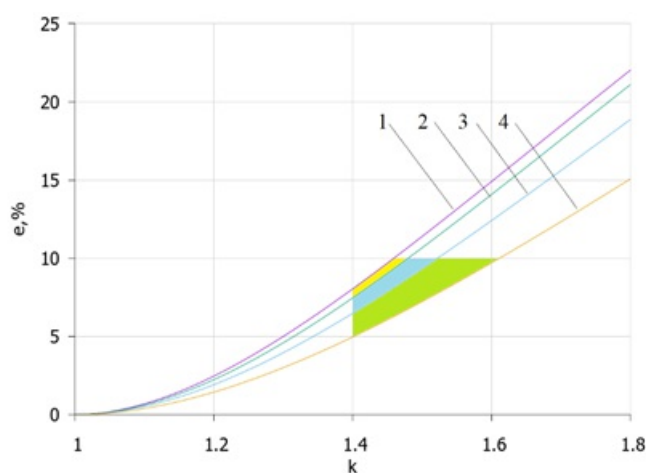


Рис.4. Процентное расхождение результатов расчета термического сопротивления двухслойного снежного покрова, в зависимости от коэффициента изменения плотности « $k$ » слоёв при их разной толщине ( $h_2=n \cdot h_1$ ): 1 -  $n=1$ ; 2-  $n=2$ ; 3-  $n=3$ ; 4 -  $n=5$ .

Цветом на рисунке выделена область допустимой в инженерной практике ошибки в расчетах. Как видно из графиков при широком диапазоне изменении толщин отдельных слоев (от 1 до 5) допустимый коэффициент изменения плотности составляет не более 15% (от 1,4 до 1,6). В то же время известно, что даже за счет естественного уплотнения нового снега, эта величина, как правило, значительно больше [7,8]. А, при снежной мелиорации может изменяться кратно [26]. Это свидетельствует о том, что термическое сопротивление слоистого снежного покрова целесообразно определять как суммарное термическое сопротивление отдельных слоев, как это принято в строительной теплофизике при расчетах термического сопротивления многослойных конструкций [27]. На рис.5 приведен обобщающий 3D график изменения относительной ошибки расчета термического сопротивления при представлении снежного покрова как однородной среды с усредненной плотностью, по сравнению со слоистой моделью снежного покрова, который наглядно подтверждает данный вывод.

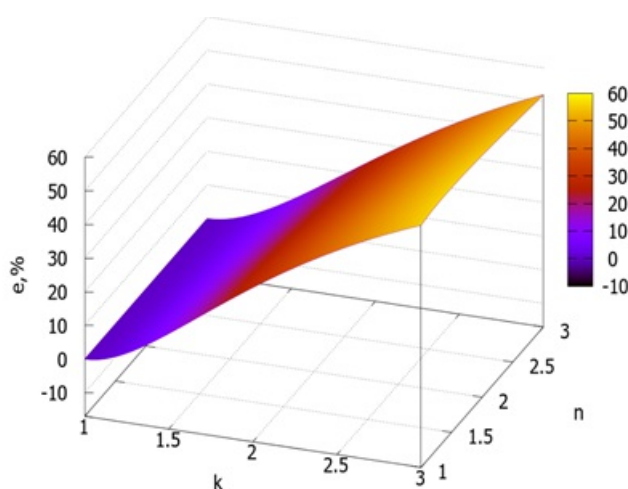


Рис.5. Процентное расхождение результатов расчета термического сопротивления двухслойного снежного покрова, в зависимости от коэффициентов изменения плотности « $k$ » и толщин « $n$ » отдельных слоёв

Цветовая дифференциация плоскости на графике наглядно показывает, что ошибки в расчетах термического сопротивления слоистого снежного покрова, при представлении его однородной структурой с некоторой средней плотностью, могут быть значительными и кратно превосходить допустимую в инженерной практике величину. Причем, чем больше расхождения плотности отдельных слоев, тем больше ошибка. Если плотности слоев изменяются не более, чем в 1,6 раза, то независимо от соотношения толщин слоев слоистость снежного покрова при расчетах термического сопротивления можно не учитывать. Анализ позволяет сделать вывод, что при уплотнении одного из слоев, менее чем в 1,6 раза применение понятия «средней плотности снежного покрова» в тепловых расчетах по определению термического сопротивления снежного покрова, является вполне допустимым. При увеличении степени уплотнения, необходимо рассчитывать общее термическое сопротивление снежного покрова, как сумму термических сопротивлений отдельных слоев.

**Заключение.** Рассмотрены два подхода при определении термического сопротивления снежного покрова при его моделировании как слоистой структуры и как эквивалентной



однородной структуры, имеющей постоянную среднюю плотность. Получены зависимости для определения ошибки результатов расчетов термического сопротивления, при использовании понятия «средняя плотность снежного покрова» для слоистого покрова с произвольным количеством слоев разной плотности и толщины. Научная новизна работы заключается в установлении количественных закономерностей точности определения термического сопротивления слоистого снежного покрова при различных способах моделирования. Например, показано, что при линейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега, выбор того или иного способа расчета термического сопротивления снежного покрова, значения не имеет: ошибка в расчетах всегда будет рана нулю. При нелинейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега (формула Г.П. Абельса), ошибка возрастает с увеличением коэффициента уплотнения одного из слоев. Например, при увеличении плотности в 2 раза относительная ошибка расчета изменяется от 20 до 30,0% и зависит от соотношения толщин отдельных слоев. Причем, чем больше соотношение, тем меньше относительная процентная ошибка расчета. Анализ результатов вариантных расчетов позволяет сделать вывод, что при уплотнении одного из слоев, менее чем в 1,6 раза, применение понятия «средней плотности снежного покрова» в тепловых расчетах по определению термического сопротивления снежного покрова, является вполне допустимым. При увеличении степени уплотнения, необходимо рассчитывать общее термическое сопротивление снежного покрова, как сумму термических сопротивлений отдельных слоев. Дальнейшие исследования целесообразно направить на сравнение имеющихся аналитических зависимостей по определению плотности снега на различной глубине снежного покрова, а также сравнение теоретических результатов с данными натурных наблюдений.

## Библиография

1. Рихтер Г. Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.: Изд-во АН СССР, 1945. 120 с.
2. Войтковский К. Ф. Расчет сооружений из льда и снега. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 136 с.
3. Шульгин А. М. Снежный покров и его использование в сельском хозяйстве. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 84 с.
4. Павлов А. В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: ГЕО, 2008. 230 с.
5. Дюнин А. К. В царстве снега. М.: URSS, 2021. 168 с.
6. Кузьмин П. П. Физические свойства снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 179 с.
7. Осокин Н. И., Сосновский А. В., Чернов Р. А. Влияние стратиграфии снежного покрова на его термическое сопротивление // Лёд и Снег. 2013. № 3 (123). С. 63-70. EDN: RFLXDZ.
8. 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 ЗабГУ. 2020. Т. 26, № 7. С. 62-76. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-7-62-76. EDN: FOCISC.
9. Казакова Е. Н., Лобкина В. А. Зависимость плотности отложенного снега от его структуры и текстуры // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII, № 6. С. 64-71. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-6(64-71). EDN: YPXLNJ.
10. Павлов А. В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 286 с.
11. Котляков В. М., Сосновский А. В. Оценка термического сопротивления снежного покрова по температуре грунта // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 2. С. 195-205. DOI:

10.31857/S2076673421020081. EDN: XPBXXL.

12. Осокин Н. И., Сосновский А. В., Чернов Р. А. Термическое сопротивление снежного покрова и его изменчивость // Криосфера Земли. 2017. Т. XX. № 3. С. 60-68. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(60-68). EDN: YPTHAJ.

13. Осокин Н. И., Сосновский А. В., Чернов Р. А., Накалов П. Р. Термическое сопротивление снежного покрова и его изменчивость // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII. № 4. С. 70-77. EDN: SZHBXP.

14. 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](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=43733)

15. Menard C., Essery R., Turkov D. et al. Scientific and human errors in a snow model intercomparison // Bulletin of the American Meteorological Society. 2021. 201(1): E61-E79. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0329.1>. EDN: MSKHVJ.

16. Осокин Н. И., Сосновский А. В. Влияние термического сопротивления снежного покрова на устойчивость многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 3. С. 105-112. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-3(105-112). EDN: WTHOLB.

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. № 1. С. 67-80. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-1-67-80. EDN: ZAGNET.

18. Перльштейн Г. З. Теплообмен деятельного слоя с атмосферой: теоретические и прикладные аспекты // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 1. С. 25-29.

19. 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: 10.3390/land12010197. EDN: CSHWRO.

20. Патент РФ 2813665. Способ мелиорации земель в криолитозоне / Галкин А. Ф., Жирков А. Ф., Железняк М. Н., Сивцев М. А., Плотников Н. А. Заявл. 22.04.2023. Опубл. 14.02.2024. Бюл. № 5.

21. Олейников А. И., Скачков М. Н. Модель уплотняемых сыпучих тел и некоторые ее приложения // Моделирование систем. 2011. № 4(30). С. 48-57. EDN: OJOJCL.

22. Винников С. Д., Викторова Н. В. Физика вод суши. СПб.: РГГМУ, 2009. 430 с. EDN: YRJVGP.

23. Борисов В. А., Акинин Д. В., Паюл А. Д. Изменения плотности снега при сжимающей нагрузке // Resources and Technology. 2021. 18(3): 77-91. DOI: 10.15393/j2.art.2021.5843. EDN: LMQJYF.

24. Галкин А. Ф., Панков В. Ю., Жиркова Е. О. Расчет термического сопротивления дорожной одежды // Строительные материалы. 2022. № 11. С. 70-75. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-808-11-70-75>. EDN: OGCM SV.

25. Галкин А. Ф., Панков В. Ю., Васильева М. Р. Коэффициент теплопроводности снежного покрова // Строительные материалы. 2024. № 10. С. 62-67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-829-10-62-67>. EDN: QLQRFF.

26. Галкин А. Ф., Железняк М. Н., Жирков А. Ф., Плотников Н. А. Анализ эффективности снежной мелиорации земель // Мелиорация и гидротехника. 2025. Т. 15, № 2. С. 245-269. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2025-15-2-245-269>. EDN: LQRDMP.

27. Малявина Е. Г. Теплотери здания: справочное пособие. М.: АВОК-ПРЕСС, 2007. 144 с.

## 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 оценка термического сопротивления снежного покрова.

Термическое сопротивление снежного покрова в криолитозоне играет важную роль в определении температурного режима промерзающего основания. Это комплексный параметр, который характеризует теплоизоляционные свойства снежного покрова. Термическое сопротивление, как отношение толщины снега к его коэффициенту теплопроводности, оказывает на промерзание грунта влияние, сравнимое с влиянием средней температуры холодного периода. Что очень важно для криолитозоны. Глубина промерзания сезонномёрзлого грунта лучше коррелирует с величиной термического сопротивления снежного покрова, чем с его высотой. В связи с этим, тема данного исследования достаточно актуальна. Однако во введении статьи авторы четко не обозначили актуальность изучаемого вопроса, а ограничились теоретическим анализом изучаемой проблемы.

Авторами определена цель работы - определить точность вычисления термического сопротивления слоистого снежного покрова при усреднении плотности снега по глубине. В связи с этим, предлагаем конкретизировать название статьи, например «Оценка термического сопротивления слоистого снежного покрова в зависимости от коэффициента изменения плотности слоёв» или «Сравнение методов оценки термического сопротивления слоистого снежного покрова». Заявленная тема статьи носит очень обобщенный характер и не отражает ее сути.

Методология исследования основана на математических методах расчёта термического сопротивления снежного покрова, анализе и сравнении полученных результатов, вычислении процентного расхождения результатов расчета. Авторы приводят расчеты по обобщенной формуле Осокина и расчетные значения, полученные по формуле Абельса. Используются графические методы изображения допускаемой ошибки.

Авторам следует описать научную новизну проводимых исследований, которая, видимо, заключается в новейшем авторском подходе к решению данной проблемы.

Стиль статьи – научно-теоретический, объём статьи соответствует требованиям журнала. Статья содержит достаточно теоретического материала, формул и 3D графиков.

Авторами в ходе исследования установлено, что с увеличением коэффициента уплотнения одного из слоев снега, расхождение результатов расчета термического сопротивления двухслойного снежного покрова, по формулам Осокина и Абельса увеличивается. Например, при нелинейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега увеличение плотности в 2 раза ( $k=2$ ), относительная ошибка расчета изменяется от 20 до 30,0% в зависимости от соотношения толщин отдельных слоев. Причем, чем больше соотношение, тем меньше относительная процентная ошибка расчета. Это свидетельствует о том, что термическое сопротивление слоистого снежного покрова целесообразно определять как суммарное термическое сопротивление отдельных слоев, как это принято в строительной теплофизике при расчетах термического сопротивления многослойных конструкций. При увеличении степени уплотнения, необходимо рассчитывать общее термическое сопротивление снежного покрова, как сумму термических сопротивлений отдельных слоев.

Библиография статьи включает в себя 27 литературных источников, 2 из которых – на иностранных языках.

Выводы в статье достаточно аргументированы и обоснованы. Авторы отмечают, что при линейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега, выбор того

*или иного способа расчета термического сопротивления снежного покрова, значения не имеет: ошибка в расчетах всегда будет рана нулю. При нелинейной зависимости коэффициента теплопроводности от плотности снега (формула Г.П. Абельса), ошибка возрастает с увеличением коэффициента уплотнения одного из слоев.*

*Статья имеет важное научно-теоретическое и практическое значение для специалистов в области теплофизики, инженеров и ученых, проектирующих строительство и обеспечивающих надежность строительных объектов в криолитозоне.*

*Авторам статьи необходимо более четко отразить возможное практическое применение полученных результатов исследования.*

*В целом, рецензируемая статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» после устранения замечаний.*