

## Арктика и Антарктика

*Правильная ссылка на статью:*

Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Панков В.Ю., Плотников Н.А. Глубина зоны теплового влияния поверхности в снежном покрове // Арктика и Антарктика. 2024. № 4. С. 129-141. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.4.72541 EDN: TEFUTJ URL: [https://nbpublish.com/library\\_read\\_article.php?id=72541](https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=72541)

## Глубина зоны теплового влияния поверхности в снежном покрове

**Галкин Александр Фёдорович**

ORCID: 0000-0002-5924-876X

доктор технических наук

Главный научный сотрудник; 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)**Жирков Александр Федотович**

кандидат технических наук

Заведующий лабораторией; Лаборатория геотермии криолитозоны; Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

677010, Россия, РС(Я) область, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36

✉ [zhirkov\\_af@mail.ru](mailto:zhirkov_af@mail.ru)**Панков Владимир Юрьевич**

кандидат геолого-минералогических наук

доцент, кафедра "Автомобильные дороги и аэродромы", 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)**Плотников Николай Афанасьевич**

ORCID: 0000-0001-6013-931X

аспирант; Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН

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

✉ [plotnikov-nikolay96@mail.ru](mailto:plotnikov-nikolay96@mail.ru)

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

**DOI:**

10.7256/2453-8922.2024.4.72541

**EDN:**

TEFUTJ

**Дата направления статьи в редакцию:**

30-11-2024

**Дата публикации:**

07-12-2024

**Аннотация:** Предметом исследования является снежный покров, который определяет формирование теплового режима грунтов в зимний период года. Целью работы является определение глубины зоны теплового влияния поверхности в снежном покрове. То есть, определение зоны колебаний температуры (суточных, декадных) в снежном покрове при изменении температуры атмосферного воздуха. Определение глубины этой зоны важно как для учета формирования свойств самого снежного покрова, так и для выбора метода моделирования процесса теплового взаимодействия атмосферы с грунтом при наличии снежного покрова. В частности, возможности учета снежного покрова в качестве термического сопротивления при моделировании тепловых процессов. Для оценки глубины теплового влияния использовалась известная формула Гудмена, полученная при решении соответствующей задачи теплопроводности интегральным методом и представляющая собой зависимость глубины зоны изменения температуры в твердом теле при скачкообразном изменении температуры на поверхности от времени и температуропроводности материала (в данном случае снега определенной плотности). Для определения температуропроводности использовались формулы Абельса и Осокина для определения коэффициента теплопроводности снега в зависимости от плотности. При этом учитывалось, что плотность снежного покрова является переменной по глубине величиной, определяемой по линеаризованной формуле Абэ. Как вариант, рассмотрен снежный покров с плотностью, равной средней интегральной плотности по глубине. Получены зависимости для определения длительности периода затухания колебаний температуры поверхности на определенной глубине снежного покрова. Предложен показатель изменения глубины затухания колебаний (глубины теплового влияния). Для оценки влияния снежной мелиорации предложена формула, позволяющая определить степень изменения длительности периода полного затухания температуры по глубине при уплотнении снежного покрова в зависимости от коэффициента уплотнения. Получена зависимость, связывающая глубину зоны теплового влияния с длительностью периода суточных колебаний температуры на поверхности снежного покрова и его плотностью. Сравнение расчетных данных по полученным формулам с данными, по глубине затухания суточных колебаний температуры в снежном покрове с различной плотностью снега, приведенными в литературных источниках, показали хорошую сходимость. Это позволяет рекомендовать полученные формулы для практического использования при оценках процесса формирования теплового режима снежного покрова.

**Ключевые слова:**

снег, свойства, плотность, теплопроводность, диффузия, теплоемкость, температура, амплитуда, глубина, поверхность

**Введение.** Снежный покров играет важную роль в формировании теплового режима деятельного слоя пород гелиотермозоны. Искусственный интеллект (нейросеть Яндекса), например, так (в популярной форме) описывает влияние снежного покрова на температурный режим грунта. «Снежный покров оказывает значительное влияние на температуру мёрзлого грунта. Он выполняет несколько функций, которые помогают поддерживать более стабильную и более высокую температуру грунта по сравнению с открытыми участками поверхности. 1. Теплоизоляция. Снег является хорошим теплоизолятором, который препятствует быстрому охлаждению грунта. Он задерживает тепло, излучаемое поверхностью земли, и предотвращает его потерю в атмосферу. Это особенно важно в условиях холодного климата, где температура может опускаться до очень низких значений. 2. Защита от ветра. Снег также защищает грунт от воздействия ветра, который может усиливать охлаждение поверхности. Он создаёт барьер, который снижает скорость ветра и уменьшает его охлаждающий эффект. 3. Распределение тепла. Снег равномерно распределяет тепло по поверхности грунта, предотвращая образование локальных горячих или холодных точек. Это способствует более равномерному распределению температуры в грунте и снижает вероятность образования трещин и деформаций. 4. Увлажнение грунта. Таяние снега может привести к увлажнению грунта, что также может повлиять на его температуру. Вода обладает высокой теплоёмкостью, что означает, что она может поглощать и отдавать большое количество тепла без значительного изменения температуры. Это может привести к охлаждению или нагреванию грунта в зависимости от условий окружающей среды. Важно отметить, что влияние снежного покрова на температуру мёрзлого грунта может зависеть от множества факторов, таких как толщина снежного покрова, его плотность, влажность грунта и климатические условия. Однако в целом можно сказать, что снег оказывает положительное влияние на температуру мёрзлого грунта, помогая поддерживать более стабильные условия и предотвращая быстрое охлаждение поверхности».

Изучению процессов формирования и свойств снежного покрова уделяется большое внимание в научном и инженерном сообществе [\[1-6\]](#). Важным направлением в гляциологии является изучение теплофизических свойств снега и их вариативности в снежном покрове различной степени метаморфизма, которые активно изучаются начиная еще с 19 века [\[7-9\]](#). Одним из показателей тепловой эффективности является показатель затухания (ослабления) колебаний температуры воздуха в снежном покрове, так как он определяет степень влияния снежного покрова на температурный режим подстилающего грунта [\[10-15\]](#). Если снова обратиться к нейросети, то получим следующее заключение искусственного интеллекта, которое в отличие от приведенного выше, уже более похоже на научное изложение. «Затухание колебаний температуры в снежном покрове — это процесс постепенного снижения амплитуды температурных колебаний внутри снежной массы с течением времени. Этот процесс обусловлен несколькими факторами. 1. Теплопроводность снега. Снег обладает низкой теплопроводностью, что означает, что он плохо проводит тепло. Это приводит к тому, что колебания температуры внутри снежного покрова затухают быстрее, чем в других материалах. 2. Изоляционные свойства. Снег является хорошим изолятором, что означает, что он препятствует проникновению тепла извне и выходу тепла изнутри. Это также способствует затуханию температурных колебаний. 3. Диффузия тепла. Тепло внутри снежного покрова может распространяться за счёт диффузии, то есть перемещения молекул. Этот процесс также способствует затуханию колебаний температуры. 4. Кондукция тепла. Кондукция — это передача тепла через непосредственный контакт молекул. В снежном покрове этот процесс происходит медленно, что также способствует затуханию температурных колебаний. 5. Теплоёмкость снега. Снег обладает большой теплоёмкостью, то есть для

нагрева или охлаждения снежной массы требуется большое количество энергии. Это также замедляет процесс изменения температуры внутри снежного покрова. Таким образом, затухание колебаний температуры в снежном покрове — это сложный процесс, который зависит от множества факторов. Изучение этого процесса важно для понимания климатических изменений и их влияния на окружающую среду».

Одной из частных задач, решение которой мы не обнаружили при аналитическом обзоре литературных источников, является определение глубины, на которой амплитуду колебаний температуры в снежном покрове можно считать равной нулю.

**Целью** работы является определение глубины зоны теплового влияния поверхности в снежном покрове. То есть, определение зоны затухания колебаний температуры (суточных, декадных) в снежном покрове при изменении температуры атмосферного воздуха.

#### **Метод.**

Глубина зоны теплового влияния поверхности в твердом теле может быть определена по формуле Т. Гудмена [\[16\]](#)

$$H = \sqrt{12aT} \quad (1)$$

$H$  – глубина зоны теплового влияния, м;  $a$  – температуропроводность материала,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $T$  – время, с.

Глубину зоны теплового влияния в переводной литературе еще иногда называют «глубиной проникновения».

Коэффициент температуропроводности материала (в данном случае снега) определяется по известной формуле, полученной из уравнения теплопроводности Фурье

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

Здесь и далее принято, что:  $C$  – удельная теплоемкость снега,  $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности снега,  $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ ;  $\rho$  – плотность снега,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Коэффициент температуропроводности снега (коэффициент тепловой диффузии) определяет скорость прохождения и ослабления колебаний температуры с глубиной снежного покрова [\[10\]](#).

При известной толщине снежного покрова ( $H$ ) из формулы (1) легко определить время, в течение которого происходит полное затухание колебаний температуры

$$T = H^2 / 12a = 0,083H^2 / a \quad (3)$$

Для определения значения коэффициента тепловой диффузии (температуропроводности), необходимо определить значения коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости, входящие в формулу (2). Исследованию коэффициента теплопроводности снега и его изменчивости от различных параметров уделялось большое внимание в научном сообществе. Обобщенным мнением которого является постулат о невозможности установить единый закон для определения данного коэффициента, ввиду неограниченного (огромного) количества параметров, от которых он зависит (географическое положение местности, климат, время года, температура воздуха, влажность, скорость ветра и т.д.). Неким общепризнанным универсальным параметром, по которому можно определить коэффициент теплопроводности снега, не прибегая к

прямым измерениям, является плотность снега. Существует большое количество формул для определения значения коэффициента теплопроводности в зависимости от плотности снежного покрова [10,17,18,19]. В работе [17] сделана попытка обобщить данные формулы и получить некую универсальную зависимость, которая, согласно исследованиям [20] можно записать в виде следующей параболической функции

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

Недостатком этой формулы является то, что она справедлива, по данным авторов, в ограниченном диапазоне изменения параметра «j» ( $2,0 \leq j \leq 4,0$ ). Поэтому, для нахождения коэффициента теплопроводности как функции плотности снега воспользуемся классической формулой Абельса [8,9], которая является более универсальной. Зависимость между коэффициентом теплопроводности и плотностью снега, полученную Г.Ф. Абельсом в результате обработки данных экспериментальных исследований, можно записать в следующем виде:

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

Г.Ф. Абельс также получил зависимость коэффициента тепловой диффузии (температуропроводности) снега от плотности, которая имеет линейный вид и, учитывая принятые нами обозначения, может быть записана как

$$a = (0,13)10^{-6} \quad (6)$$

Удельная теплоемкость снега также является функцией плотности снега и может быть приближенно определена по формул

$$C = C_a + K_i(C_a - C_i) \quad (7)$$

Здесь индекс «i» относится ко льду, а индекс «a» к воздуху; параметр  $K_i$  - это концентрация льда в снежном покрове, которое равно отношению  $\frac{m_i}{m_i + m_a}$ . Параметры:  $m_i, m_a$  - это масса льда и воздуха в единице объема, кг.

Учитывая, что масса льда в объеме значительно больше массы воздуха ( $\frac{m_i}{m_a}$ ), можно считать, что параметр  $K_i \approx 1,0$ . В этом случае, как это принято в гляциологии, удельная теплоемкость снега равна удельной теплоемкости льда [7, 8, 10]. Естественно, что подобное утверждение не может относиться к периоду оттаивания снега. В этом случае, в уравнении (7) должен быть добавлен член, учитывающий теплоемкость воды, концентрация которой в этот период может достигать 22-25 % по объему [7]. В нашем случае, также как Г.Ф. Абельс, будем считать, что удельная теплоемкость снега равна удельной теплоемкости льда - 2,1 КДж/кгК.

Полученные формулы не учитывают зависимость плотности снега от толщины снежного покрова. В работе [21] проведено сравнение различных расчетных формул для определения плотности как функции толщины и сделан вывод, что все рассмотренные формулы, дают приблизительно одинаковые результаты и в практических расчетах можно пользоваться любой из них. Воспользуемся классической формулой Абэ, которую запишем в следующем виде

$$j \approx 1,8 + 3,2H \quad (8)$$

Среднее значение плотности снежного покрова заданной толщины определим как

среднее интегральное значение плотности, т.е.

$$j \approx 1,8 + 1,6H \quad (9)$$

Используя полученные зависимости (4), (5), (6) и (9), из (2) получим формулы для определения количественных значений коэффициента температуропроводности снежного покрова различной толщины. Если нас интересует изменение коэффициента температуропроводности по глубине снежного покрова, то вместо формулы (9) следует в (2) использовать формулу (8).

Формула (4) не очень удобна в расчетах. Целесообразно ее представить в виде  $\lambda = \frac{p}{C_i \rho}$ , где  $p$  – коэффициент аппроксимации зависимости (4). Выполненные оценочные расчеты показывают, что с достаточной для инженерных расчетов точностью данный коэффициент может быть принят, равным 0,025. Легко показать, что максимальное расхождение результатов расчетов коэффициента теплопроводности снега по формуле Абельса и аппроксимирующей формуле Осокина не превышает 14%, а, в среднем, укладывается в диапазон  $[-10,0 \leq (e, \%) \leq +10,0]$ . То есть, для достижения нашей цели можно пользоваться любой из них. Детальный анализ степени разногласия результатов расчета коэффициента теплопроводности снега по формулам Осокина и Абельса приведен в работе [19]. Общая формула для расчета коэффициента температуропроводности снежного покрова, будет иметь вид

$$a = \frac{p\rho^2}{C_i \rho} = 100 \left( \frac{p}{C_i} \right) j \approx (0,12j) \cdot 10^{-6} \quad (10)$$

Где параметр « $j$ » определяется по формуле (8). Сравнивая формулы (10) и формулу (6), видим, что при постоянном значении плотности снежного покрова расхождение результатов не превышает 8%, что является вполне допустимым в инженерной практике.

Степень расхождения результатов (относительную процентную ошибку) расчета коэффициента температуропроводности при использовании формул (4) и (5) можно определить, используя известную зависимость [22]:

$$e = 100(1 - a_1/a_2) \quad (11)$$

С учетом сделанных упрощений и дополнений, расчетная формула для определения времени полного затухания амплитуды температурных колебаний в снежном покрове на глубине « $H$ » будет иметь вид

$$T = \frac{0,083H^2}{a} = \frac{0,7H \cdot 10^6}{(1,6 + 1,8/H)} = \frac{0,083H^2 \cdot 10^6}{0,12(1,8 + 1,6H)} \approx \frac{0,7H^2 \cdot 10^6}{(1,8 + 1,6H)} \approx \frac{H \cdot 10^6}{(2,3 + 2,6/H)} \quad (12)$$

Если использовать в качестве оценки время в часах (что более удобно) вместо секунд, то расчетная формула примет вид

$$T \approx \frac{194H}{(2,3 + 2,6/H)} \quad (13)$$

Представляет интерес определение степени расхождения результатов расчета времени затухания колебаний температуры на заданной глубине снежного покрова при неучете изменения плотности по глубине. В этом случае расчетная формула будет иметь вид

$$T \approx 193H^2/j \quad (14)$$

Здесь параметр «j» определяется по формуле (5). Из данной зависимости легко определить глубину зоны теплового влияния поверхности в снежном покрове (глубина на которой градиент температуры равен нулю)

$$H \approx 0,07(\sqrt{jT}) \quad (15)$$

Известно, что изменение плотности снежного покрова (снежная мелиорация) играет существенную роль при формировании теплового режима грунтов, так как при уплотнении термическое сопротивление уменьшается пропорционально квадрату коэффициента уплотнения. (Коэффициент уплотнения - это величина, численно равная отношению глубин снежного покрова до и после уплотнения). Свойство снежного покрова существенно изменять свое термическое сопротивление при уплотнении используется для управления тепловым и влажностным режимом деятельного слоя грунтов [2 - 6]. В частности, положено в основу новых способов борьбы с негативными проявления криогенеза и восстановления нарушенных криогенезом сельскохозяйственных земель в зоне многолетней мерзлоты [23-25].

Степень изменения времени достижения нулевой амплитуды на глубине «H» при уплотнении снежного покрова можно выразить формулой

$$q = \frac{T_2}{T_1} = \frac{H_2(2,3 + 2,6/H_1)}{H_1(2,3 + 2,6/H_2)} = \frac{(2,3 + 2,6/H_1)}{k(2,3 + 2,6k/H_1)} \quad (16)$$

Здесь k – коэффициент уплотнения, равный «H1/H2»; H1, H2 – глубина снежного покрова до и после уплотнения, м.

Если используем формулу (14), то

$$q = \frac{T_2}{T_1} = \frac{H_2^2 \cdot j_1}{H_1^2 \cdot j_2} = 1/k \quad (17)$$

Данное выражение означает, что длительность периода (время) достижения нулевой амплитуды температуры на заданной глубине, при уплотнении снежного покрова, обратно пропорциональна коэффициенту уплотнения. Эта закономерность позволяет оперативно, не прибегая к расчетам определить, например, необходимую степень уплотнения снежного покрова, исключая влияние колебаний температуры воздуха на тепловой режим грунта. Кроме того, данная закономерность представляет чисто научный интерес, так как получена впервые и ранее в известной авторам литературе, не встречалась.

**Результаты и обсуждение.** По полученным формулам были проведены многовариантные расчеты, результаты которых, для наглядности, приведены в виде 2Д и 3Д графиков. На рис.1 приведен график зависимости времени полного затухания амплитуды температуры на глубине в зависимости от коэффициента тепловой диффузии (коэффициента теплопроводности) снега.

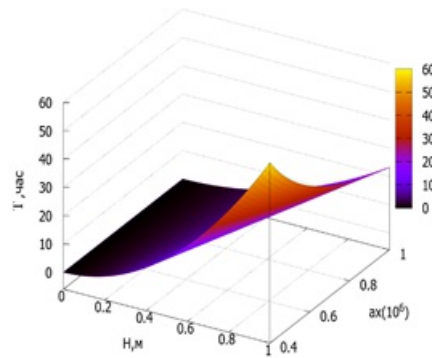


Рис.1. Длительность периода затухания температурной амплитуды по глубине снежного покрова в зависимости от значения коэффициента теплопроводности снега

Из графика следует, что чем ниже теплопроводность снега, тем больше требуется времени для достижения глубины, на которой температурный градиент равен нулю. На рис.2 показаны графики изменения длительности периода затухания температурной амплитуды по глубине при различной плотности снежного покрова, определенная по формуле (14) и формуле (13), которая учитывает изменение плотности по глубине.:

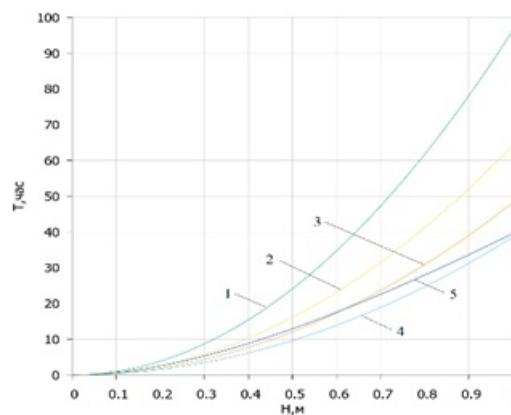


Рис.2. Длительность периода затухания температурной амплитуды по глубине при различной плотности снежного покрова, определенная по формуле (14):

1- при  $j=2$ ; 2- при  $j=3$ ; 3- при  $j=4$ ; 4- при  $j=5$ ; 5 - при расчете по формуле (13).

Анализ графиков на рисунке показывает, что, не учитывая изменение плотности снежного покрова по глубине, мы можем допускать существенную ошибку. Особенно для свежевыпавшего снега и снега после начального метаморфизма ( $j \leq 2,0$ ). Кроме того, разногласие результатов по двум формулам увеличивается с увеличением длительности рассматриваемого периода колебаний температуры. В то же время для плотного, сформировавшегося снежного покрова ( $j \geq 3,0$ ) результаты расчетов по двум формулам, особенно для периодов суточных колебаний хорошо согласуются.

Для наглядности, на рис.3 приведен 3D график в виде двух характерных плоскостей, отражающих зависимость длительность периода затухания температурной амплитуды по глубине при различной плотности снежного покрова, определенных по двум формулам.



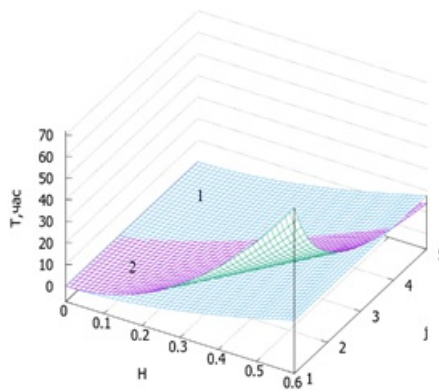


Рис.3. Длительность периода затухания температурной амплитуды по глубине при различной плотности снежного покрова:

1- при расчете по формуле (13); 2 - при расчете по формуле (14).

Как видно из графиков степень разногласия результатов существенно снижается при увеличении плотности снега. Отдельный интерес представляет исследование степени затухания суточных колебаний наружного воздуха. На рис.4 представлены графики, характеризующие изменение глубины зоны теплового влияния в зависимости от плотности снежного покрова при суточных колебаниях наружного воздуха. Голубым цветом выделена область наиболее характерных плотностей снежного покрова. Как следует из графиков, при увеличении плотности в два раза, например с 1 до 2, глубина зоны теплового влияния при суточных колебаниях с длительностью периода в 12 часов увеличивается, приблизительно, в 1,41 раза. При суточных колебаниях с длительностью периода в 6 часов эта цифра не изменяется, то есть, также увеличивается в 1,41 раза. Равно, как это отношение не изменяется и при увеличении плотности снега в те же два раза, но в диапазоне от 2,5 до 5,0. Можно сделать следующее заключение: степень изменения глубины зоны теплового влияния не зависит от диапазона изменения плотности снежного покрова и длительности периода суточных колебаний, при условии одинаковой (постоянной) кратности изменения плотности снега.

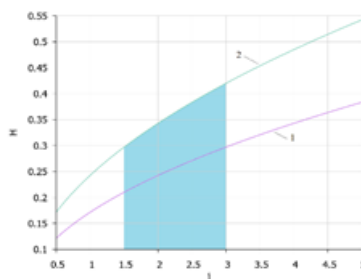


Рис.4. Глубина зоны теплового влияния в зависимости от плотности снежного покрова при суточных колебаниях температуры поверхности:

1-длительность период 6 часов; 2-длительность периода 12 часов.

Интересно отметить, что полученные данные хорошо совпадают с результатами исследований, приведенных в «Гляциологическом словаре» [Гляциологический словарь, с.455], где отмечается следующее. «В сухом свежеевыпавшем снеге суточные колебания температуры затухают на глубине 30-40 см, в более старом снеге при плотности 300 кг/м³ – на глубине 50 см». Как видно из графиков, расчетная величина глубины зоны суточных колебаний (выделено голубым цветом) для характерного диапазона изменения плотности снега, не превышает 43 см. Это подтверждает возможность использования полученных формул для оценки глубины зоны теплового влияния в снежном покрове

различной плотности.

На рис.5 приведен трехмерный график зависимости глубины зоны теплового влияния суточных колебаний температуры с различной длительностью периода колебаний для снежного покрова с приведенной плотностью от 0,5 (свежевыпавший, рыхлый снег) до 6,0 (слежавшийся, фирновый снег).

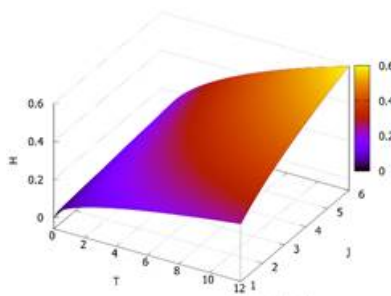


Рис.6. Глубина зоны теплового влияния в зависимости от плотности снежного покрова при различной длительности периода суточных колебаний температуры на поверхности.

Цветовая дифференциация плоскости на рисунке подтверждает сформулированные ранее количественные закономерности. При этом также становится очевидным, что с увеличением плотности снега, независимо от длительности периода суточных колебаний, глубина зоны теплового влияния увеличивается. И степень этого увеличения более сильная, чем степень увеличения глубины зоны теплового влияния от длительности периода суточных колебаний температуры.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение такого важного показателя тепловой эффективности снежного покрова как тепловая устойчивость. Зависимостей для определения данного показателя при анализе литературных источников нами не обнаружено.

### **Заключение.**

Получены формулы для определения длительности периода затухания колебаний температуры поверхности на определенной глубине снежного покрова в зависимости от плотности снега. Проведено сравнение двух расчетных формул: учитывающей и не учитывающей изменение плотности по глубине снежного покрова. Сравнение показало, что для инженерных расчетов можно пользоваться более простой формулой с постоянным значением плотности снега, равном среднему интегральному значению плотности по глубине. Для оценки влияния снежной мелиорации предложена формула, позволяющая определить степень изменения длительности периода полного затухания температуры по глубине при уплотнении снежного покрова в зависимости от коэффициента уплотнения. Впервые установлена закономерность: длительность периода (время) достижения нулевой амплитуды температуры на заданной глубине, при уплотнении снежного покрова, обратно пропорциональна коэффициенту уплотнения. Получена зависимость, связывающая глубину зоны теплового влияния с длительностью периода суточных колебаний температуры на поверхности снежного покрова и его плотностью. Показано, что с увеличением плотности снега, независимо от длительности периода суточных колебаний, глубина зоны теплового влияния в снежном покрове увеличивается. Так, например, для значения средней плотности снега, равного  $200 \text{ кг/м}^3$ , глубина полного затухания суточных колебаний составляет 33 см. А, при плотности снега в два раза выше ( $400 \text{ кг/м}^3$ ) – 48 см. Сравнение расчетных данных по полученным формулам с данными, по глубине затухания суточных колебаний

температуры в снежном покрове с различной плотностью снега, приведенными в литературных источниках, показали хорошую сходимость результатов. Например, по экспериментальным данным, приведенным в Гляциологическом словаре, глубина полного затухания суточных колебаний температуры при плотности снега  $300 \text{ кг/м}^3$  составляет не более 30-40 см. Расчет по полученным формулам дает значение, равное 43 см. Это позволяет рекомендовать полученные формулы для практического использования при оценках процесса формирования теплового режима снежного покрова.

## Библиография

1. Войтковский К.Ф. Расчет сооружений из льда и снега. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 136 с.
2. Шульгин А. М. Снежный покров и его использование в сельском хозяйстве. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 84 с.
3. Рихтер Г. Д. Снежный покров, его формирование и свойства. М.: Изд-во АН СССР, 1945. 120 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. Гляциологический словарь/под.ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 564 с.
8. Абельс Г.Ф. Суточный ход температуры снега и определение зависимости между теплопроводностью снега и его плотностью. Записки Академии наук. Т. 72, кн. I, прил. 12. СПб, 1893.
9. Абельс Г.Ф. О плотности снега в Екатеринбурге. Записки Академии наук по физ.-мат. отд., т. III, № 9. СПб, 1896.
10. Снег. Справочник / Под ред. Д.М. Грея, Д.Х. Мэйла; Пер. с англ. под ред. В.М. Котлякова. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 751 с.
11. Павлов А.В. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 286 с.
12. 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
13. 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)
14. 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.
15. Перльштейн Г.З. Теплообмен деятельного слоя с атмосферой: теоретические и прикладные аспекты // *Криосфера Земли*, 2002. Т. VI, № 1. С. 25-29.
16. Гудмен Т.Р. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена // Сборник статей: Проблемы теплообмена. М.: Атомиздат, 1967. С. 41-95.
17. Осокин Н.И., Сосновский А.В., Чернов Р.А. Коэффициент теплопроводности снега по и его изменчивость // *Криосфера Земли*, 2017, т. XXI, № 3, с. 60-68. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(60-68).
18. Олейников А.И., Скачков М.Н. Модель уплотняемых сыпучих тел и некоторые ее приложения// *Моделирование систем*. 2011. №4(30). С.48-57.
19. Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Васильева М.Р. Коэффициент теплопроводности снежного покрова// *Строительные материалы*. 2024. № 10. С. 62 - 67.

<https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-829-10-62-67>

20. 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://e-notabene.ru/arctic/article\\_43733.html](https://e-notabene.ru/arctic/article_43733.html)

21. Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Адамов А.А. Сравнительный анализ формул для определения плотности снежного покрова // *Строительные материалы*. 2024. № 11. С. 61 - 69. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-829-11-61-69>

22. 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>

23. 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

24. 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. Оpubл. 14.02.2024. Бюл. №5

25. Патент РФ № 2813326. Способ мелиорации нарушенных термокарстом земель / Галкин А.Ф., Жирков А.Ф., Железняк М.Н., Сивцев М.А., Плотников Н.А. Заявл. 22.04.2023. Оpubл. 12.02.2024. Бюл. №5

## Результаты процедуры рецензирования статьи

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

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

Предметом исследования в данной работе является изучение глубины зоны теплового влияния поверхности в снежном покрове гелиотермозоны.

Методология исследования основана на методах формализации (использования математических формул и зависимостей) и методах графического построения зависимостей периода затухания температурной амплитуды по глубине при различной плотности снежного покрова, различной длительности периода суточных колебаний температуры на поверхности, в зависимости от значения коэффициента теплопроводности снега.

Актуальность. Автор статьи отмечает, что снежный покров играет важную роль в формировании теплового режима деятельного слоя пород гелиотермозоны. В настоящее время, в связи с потеплением климата на планете, существует актуальная проблема поддержания мерзлого состояния грунтового массива в криолитозонах. Поэтому, данные исследования очень актуальны в плане изучения глубины зоны теплового влияния поверхности в снежном покрове гелиотермозоны. В связи с этим, целью работы является определение глубины зоны затухания колебаний температуры (суточных, декадных) в снежном покрове при изменении температуры атмосферного воздуха.

Во введении статьи автор прибегает к искусственному интеллекту нейросети Яндекса, чтобы описать влияние снежного покрова на температурный режим грунта и затухание колебаний температуры в снежном покрове. Считаем, что в статьях такого уровня наиболее уместно делать ссылки на исследования авторитетных ученых в данной области знаний, нежели цитировать искусственный интеллект.

Научная новизна исследований бесспорна и заключается в предложенном впервые показателе изменения глубины затухания колебаний (глубины теплового влияния). Автором для оценки влияния снежной мелиорации предложена формула, позволяющая определить степень изменения длительности периода полного затухания температуры по

глубине при уплотнении снежного покрова в зависимости от коэффициента уплотнения. Стиль статьи - научный, соответствует установленным требованиям журнала. Структура статьи включает в себя введение, результаты и обсуждение, заключение, библиографию. Объем текстовой части статьи соответствует требованиям журнала. В целом, содержание научной статьи раскрывает ее тему, выводы доказательны и обоснованы. Текст написан научным языком.

Библиография статьи включает в себя 12 источников, 9 из которых изданы в период с 1945 по 1986 годы, что не совсем отвечает требованиям журналов из списка ВАК. По мнению рецензента, следует немного расширить библиографический список, с целью внесения в него источников не более 10 летней давности. Следовательно, автору рекомендуется в этом аспекте доработать статью. В тексте нет ссылок на иностранных авторов.

Выводы в статье достаточной степени аргументированы и обоснованы.

Автором установлено, что длительность периода (время) достижения нулевой амплитуды температуры на заданной глубине при уплотнении снежного покрова обратно пропорциональна коэффициенту уплотнения. С увеличением плотности снега, независимо от длительности периода суточных колебаний, глубина зоны теплового влияния в снежном покрове увеличивается. Причем степень этого увеличения более сильная, чем степень увеличения глубины зоны теплового влияния от длительности периода суточных колебаний температуры.

Научная статья имеет важную практическую значимость, так как сравнение расчетных данных по полученным формулам с данными, по глубине затухания суточных колебаний температуры в снежном покрове с различной плотностью снега, приведенными в литературных источниках, показали хорошую сходимость результатов. Это позволяет рекомендовать полученные формулы для практического использования при оценках процесса формирования теплового режима снежного покрова.

Рецензируемая статья несомненно будет интересна и полезна грунтоведам и мерзлотоведам, ученым и аспирантам направления 1.6.7. «Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение».

Данная статья рекомендуется к опубликованию в журнале «Арктика и Антарктика» после устранения замечаний.