

УДК 551.578.46

Экспериментальные исследования коэффициента эффективной теплопроводности снежного покрова на Западном Шпицбергене

© 2014 г. Н.И. Осокин, А.В. Сосновский

Институт географии РАН, Москва
osokinn@mail.ru

Field investigation of efficient thermal conductivity of snow cover on Spitsbergen

N.I. Osokin, A.V. Sosnovsky

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow

Статья принята к печати 25 декабря 2013 г.

*Глубинная изморозь, коэффициент теплопроводности, плотность снега, термическое сопротивление снега.
Coefficient of heat conductivity, deep hoar, snow density, thermal resistance of a snow.*

Представлены результаты полевых исследований коэффициента эффективной теплопроводности снега разной структуры и плотности, выполненные весной 2013 г. в районе метеостанции Баренцбург. Их обработка с помощью уравнения Фурье позволила получить зависимости коэффициента теплопроводности от температуры снега в режимах охлаждения и нагревания поверхности снежного покрова. Установлено увеличение коэффициента эффективной теплопроводности снега с ростом его температуры в режиме охлаждения поверхности и уменьшение значений – в режиме нагревания поверхности. Возможно, это обусловлено тем, что при нагревании поверхности снежного покрова поток водяного пара направлен внутрь, поэтому с понижением температуры снега возрастает конденсация водяного пара. Это приводит к дополнительному повышению температуры и создаёт эффект роста коэффициента теплопроводности при более низких температурах снега. При охлаждении поверхности этот эффект отсутствует, а при понижении температуры снега вклад диффузии водяного пара в коэффициент эффективной теплопроводности снижается, что приводит к его уменьшению. Среднее значение коэффициента эффективной теплопроводности глубинной изморози плотностью 280 кг/м³ составляет 0,12 Вт/(м·К), что в 3–4 раза меньше, чем зернистого смёрзшегося снега плотностью 370–390 кг/м³.

This paper presents results of field investigations of coefficient of efficient thermal conductivity of snow with different structures and densities. Observations were performed in spring of 2013 in the vicinity of meteorological station Barentsburg. The data obtained were processed by means of the Fourier technique that allowed deriving relationship between thermal conductivity and snow temperature in regimes of cooling and warming of the snow cover surface.

Введение

Теплопроводность снега – важная теплофизическая характеристика, в значительной мере определяющая теплообмен в системе атмосфера – снежный покров – почвогрунт [2, 3, 11]. Она влияет на устойчивость мёрзлых пород, в том числе и на развитие склоновых процессов в горах [10]. Теплопроводность снега влияет на градиент температуры в снегу, который определяет метаморфизм снега и его структуру, а последняя, в свою очередь, обуславливает изменение теплопроводности. Такая циклическая зависимость дополняется многими другими факторами развития снежной толщи. Каждая компонента снега (ледяные кристаллы, водяной пар, воздух) влияет на его эффективную теплопроводность как самостоятельно, так и взаимодействуя друг с другом. Вклад этих составляющих в эффективную теплопроводность снега зависит от многих параметров – времени взаимодействия, температуры, градиента температуры, структурных особенностей. Эффективная теплопроводность всей снежной толщи зависит также от стратиграфии снежного покрова, суточных колебаний температуры воздуха, температуры основания. Однако при всём разнообразии факторов, опре-

деляющих эффективную теплопроводность снега, главным параметром остаётся плотность снега.

Первые зависимости эффективной теплопроводности снега от плотности получены ещё в конце XIX в. [14]. С тех пор появилось много формул для расчёта теплопроводности снега разной структуры. При этом зависимость эффективной теплопроводности снега от температуры отражает лишь небольшая часть формул. Эффективную теплопроводность снега определяют разными методами: с помощью игольчатых зондов, измерителей теплового потока, вычислительных методик, в том числе с учётом микротомографии [13]. Использование этих методов позволяет исследовать влияние суточных колебаний температуры на метаморфизм снежного покрова [12], оценить вклад температуры и градиента температуры в теплопроводность [9]. В последние годы определённое внимание уделяется анизотропии теплопроводности снега [13]. Отметим, что, несмотря на большой интерес к этому вопросу, проблема определения теплопроводности снега и её изменчивости в зависимости от разных факторов остаётся открытой. Одна из причин этого – большой разброс значений эффективной теплопроводности снега [8]. Именно поэтому

измерение эффективной теплопроводности снега в естественных условиях и анализ полученных результатов актуальны до настоящего времени.

Здесь и далее рассматривается коэффициент эффективной теплопроводности снега (который будем называть коэффициентом теплопроводности) – комплексный параметр, характеризующий все теплофизические процессы в снежном покрове: кондуктивную теплопроводность; диффузию водяного пара; сублимацию и конденсацию; теплообмен между ледяными кристаллами и воздухом. Цель нашего исследования – определить коэффициент теплопроводности снега разной структуры и температуры по данным полевых измерений температурного режима снежного покрова на Западном Шпицбергене весной 2013 г.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились с 12 по 21 апреля 2013 г. Толщина снежного покрова была более 1 м. Снег представлен слоями разной структуры и плотности. Температура воздуха во время экспериментальных исследований колебалась от -14 до -8 °С. Суточный перепад температуры – от 2 до 4 °С. На высоте 5 см над снежным покровом в утренние часы температура воздуха была на 1,5–2 °С ниже, чем по данным метеостанции Баренцбург.

Измерялась температура снега при помощи температурных логгеров iButtons DS1922L/DS1922T; точность измерения температуры термохроной составляла 0,0625 °С. Центры термохрон находились на расстоянии 5 см друг от друга. Диаметр активной части термохрона равен 12 мм при толщине 4 мм. Таким образом, измерялась средняя температура в слое снега глубиной (шириной) 1 см; микроколебания температуры на контактах ледяных кристаллов, размером 0,1–4 мм, с воздухом осреднялись. Интервал записи температур составлял 20 мин.

Измерения проводили как с горизонтальной дневной поверхности снежного покрова, так и в вертикальной стенке шурфа (рис. 1). При измерении распределения температуры в слое метелевого снега (через сутки после метели) датчики помещали в снежный покров с дневной поверхности на глубину 3, 8 и 13 см. С целью искусственного изменения температуры поверхности снежного покрова сверху на исследуемую поверхность помещали цилиндрический сосуд, наполненный водно-ледовой смесью. По окружности основания сосуда диаметром 20 см на глубине 20 см размещали теплоизолятор для предотвращения бокового оттока тепла.

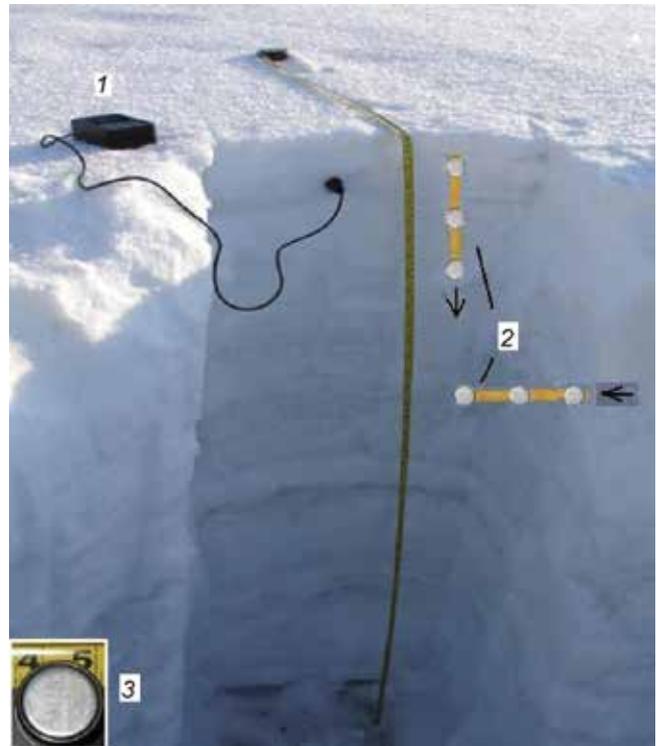


Рис. 1. Вид шурфа:

1 – температурный датчик Digitalthermometer, GTH 175/Pt; 2 – расположение температурных логгеров iButtons DS1922L/DS1922T; 3 – вид температурных логгеров iButtons DS1922L/DS1922T

Fig. 1. A view of the snow pit:

1 – temperature sensor Digitalthermometer, GTH 175/Pt; 2 – location of temperature logger iButtons DS1922L/DS1922T; 3 – view of temperature logger iButtons DS1922L/DS1922T

Температура определённого типа снега измерялась в стенке шурфа на глубине 5, 10 и 15 см. При измерении температурного режима в глубине вертикальной стенки шурфа датчики помещали в слой снега выбранной структуры. Температура снега в стенке шурфа изменялась вследствие суточного хода температуры воздуха. Наибольший перепад температур между крайними термохронами составлял 6 °С при средних значениях 2–4 °С, что соответствовало градиенту температуры 20–40 °С/м. В ряде случаев температура, полученная с помощью термохрон, контролировалась температурным датчиком (Digitalthermometer, GTH 175/Pt) с длиной иглы 10 см и диаметром 2 мм при точности измерения 0,1 °С. Различия температуры, измеренной с этим датчиком и с помощью термохрон в стенке шурфа на глубине 10 см, как правило, не превышало 0,2 °С.

Распределение температуры по глубине снежной толщи измеряли на разной глубине в стен-

ке шурфа (рис. 2). 13 апреля 2013 г. распределение температуры в стенке только что пройденного шурфа на глубине 10 и 20 см от его боковой поверхности, измеренное в течение часа, практически совпадало и представлено кривой 1 на рис. 2. Через сутки распределение температуры на глубинах 10 и 20 см изменилось (кривые 2 и 3 на рис. 2), тогда как на глубине 60 см оно было таким же, как на кривой 1 (см. рис. 2). Синусообразное поведение кривой 2 (точки на глубине 20 см от стенки шурфа) обусловлено слоистостью снежного покрова. Вершина синусоиды, направленная в сторону более низкой температуры, приурочена к слою наста повышенной по сравнению с окружающими слоями плотности. По этому слою идёт более интенсивный теплообмен.

В течение суток температура снега на глубине 10 см от стенки шурфа понизилась на 3–6 °С (кривые 1 и 3). При этом на глубинах 40–85 см от дневной поверхности температура стенки шурфа опустилась до -11 ÷ -12 °С (кривая 3 на рис. 2). Поэтому вертикальный поток тепла на глубине 10 см от поверхности стенки шурфа более чем на порядок меньше горизонтального. В основании шурфа температура резко повышается от -10 до -6 °С. Характеристика и плотность снежных слоёв приведены в табл. 1.

Коэффициент теплопроводности рассчитывался на основании уравнения теплопрово-

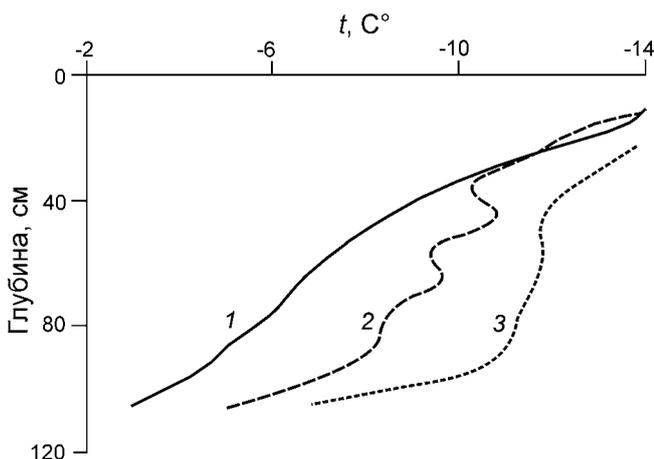


Рис. 2. Температура в стенке шурфа, полученная в разные дни исследований 2013 г.:

1 – 13 апреля; 2 и 3 – 14 апреля; кривые 1 и 3 построены по данным измерений в стенке шурфа на глубине 10 см; кривая 2 – на глубине 20 см

Fig. 2. Temperature in the wall of the pit, obtained in April 2013: 1 – 13 of April; 2 and 3 – 14 of April; curves 1 and 3 are constructed according to the measurement in the pit wall at depth of 10 cm; curve 2 – at depth of 20 cm

Таблица 1. Плотность и характеристика снега на разных глубинах от поверхности

Глубина, см	Плотность, кг/м ³	Характеристика снега
0–8	220	Метелевый
8–20	370	Мелкозернистый смёрзшийся
20–42	292	Мелкозернистый рыхлый
42–44	423	Наст толщиной 2 см, армированный ледяной прослойкой в 1 мм
44–55	283	Глубинная изморозь рыхлая
55–57	450	Наст толщиной 2 см, смёрзшиеся кристаллы, ледяная прослойка – 2 мм
57–75	393	Среднезернистый снег смёрзшийся
75–90	350	Чередование наста и смёрзшейся глубинной изморози
90–110*	308	Глубинная изморозь рыхлая

*Ниже 110 см – грунт.

дности Фурье для нестационарного одномерного температурного поля:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \tag{1}$$

где t – температура снега; τ – время; $a = \lambda/c\rho$ – коэффициент теплопроводности; λ – коэффициент теплопроводности снега; c – удельная теплоёмкость; ρ – плотность снега; z – координата по глубине снежной толщи.

Уравнение (1), записанное в конечных разностях, будет следующим:

$$\frac{t_1(\tau_2) - t_1(\tau_1)}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{a \left(\frac{t_2 - t_1}{\Delta z} - \frac{t_1 - t_0}{\Delta z} \right)}{\Delta z},$$

где t_0, t_1 и t_2 – температура снега в горизонтах $z - \Delta z, z$ и $z + \Delta z$ в момент времени τ_1 ; Δz – шаг по глубине; $t_1(\tau_1)$ и $t_1(\tau_2)$ – температура снега в горизонте z в моменты времени τ_1 и τ_2 соответственно.

Правая часть этого уравнения определяется по градиентам температуры в слоях $z - \Delta z$ и z, z и $z + \Delta z$ в момент времени τ_1 . Поэтому для оценки коэффициента теплопроводности a для данного типа снега необходимо измерить температуру в трёх горизонтах толщи и её изменение в горизонте z . При этом характер теплового процесса в период наблюдений должен отвечать условиям охлаждения или нагревания. В результате измерений и расчётов мы получили более 200 значений коэффициента теплопроводности и теплопроводности снега в режимах охлаждения и нагревания поверхности снежного покрова.

Результаты измерений

Динамика температуры метелевого снега плотностью 220 кг/м^3 на 18 апреля 2013 г. приведена на рис. 3, а. Горизонтальная площадку, на которой размещались термохроны, была теплоизоли-

рована с боков для предотвращения теплоточков с боковой поверхности. На этапе нагрева поддерживалась небольшая отрицательная температура поверхности. После повышения температуры снега на глубинах 3, 8 и 13 см был зафиксирован стационарный режим (см. рис. 3, а), свидетельствующий о надёжности теплоизоляции.

После снятия сосуда дневная поверхность снежного покрова начала охлаждаться под действием окружающей температуры воздуха до температуры снега $-11 \text{ }^\circ\text{C}$ на глубине 3 см. Результаты расчётов коэффициента теплопроводности метелевого снега приведены на рис. 3, б–г. Температура снега рассчитывалась как среднее значение по трём точкам. Верхний датчик зафиксировал рост температуры снега с -7 до $-3,5 \text{ }^\circ\text{C}$, а после снятия нагревателя температура верхнего датчика в течение трёх часов понизилась с $-3,5$ до $-11 \text{ }^\circ\text{C}$, у среднего датчика отмечался рост с $-5,1$ до $-8,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. рис. 3, а). Среднее значение коэффициента теплопроводности метелевого снега на этапе охлаждения составило в разные моменты времени значения 0,18 и 0,25 Вт/(м·К), а на этапе нагрева – 0,14 Вт/(м·К).

Результаты расчётов коэффициента теплопроводности глубинной изморози плотностью 283 кг/м^3 на глубине 50 см от горизонтальной дневной поверхности снежного покрова приведены на рис. 4. Естественный ход температуры в стенке шурфа на глубинах 5, 10 и 15 см дан на рис. 4, а. Среднее значение коэффициента теплопроводности глубинной изморози на этапе охлаждения составило 0,11 Вт/(м·К), а на этапе нагрева – 0,11 и 0,12 Вт/(м·К).

Результаты расчётов коэффициента теплопроводности мелкозернистого рыхлого снега плотностью 292 кг/м^3 на глубине 30 см от горизонтальной дневной поверхности приведены на рис. 5.

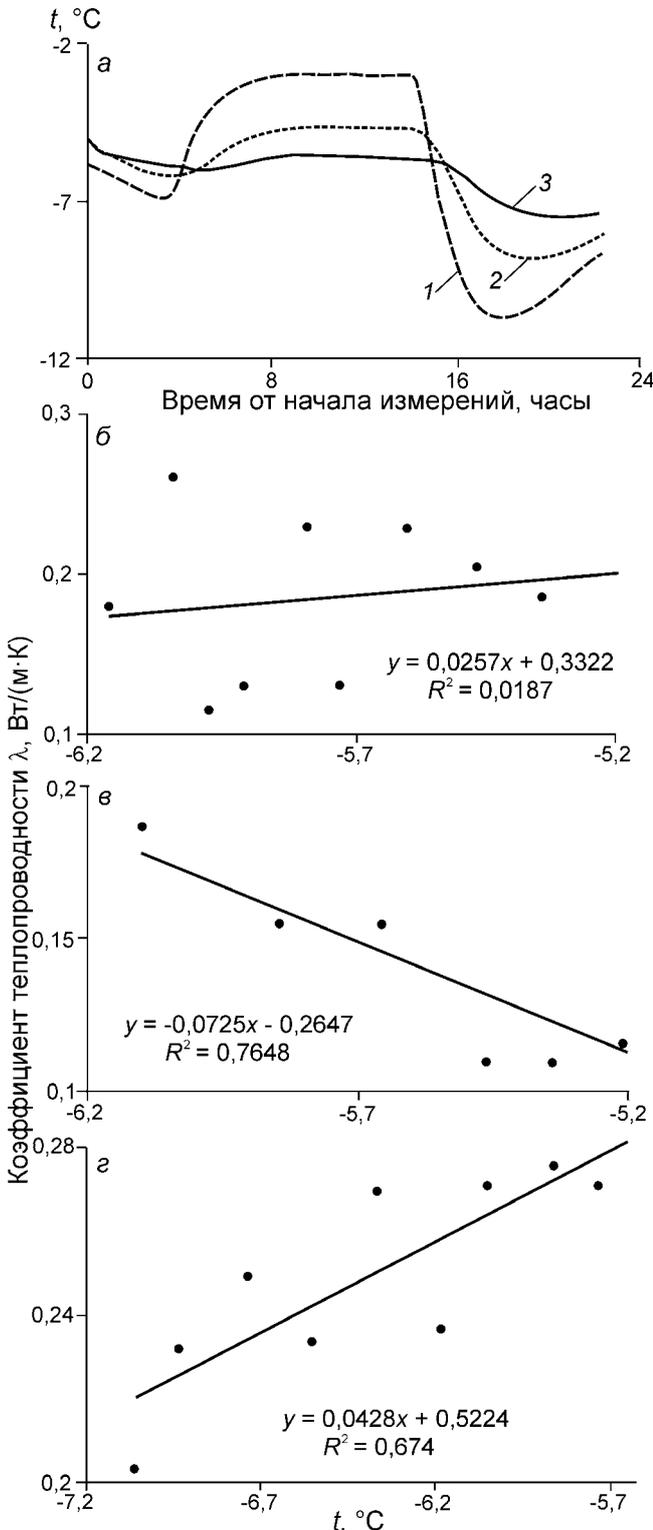


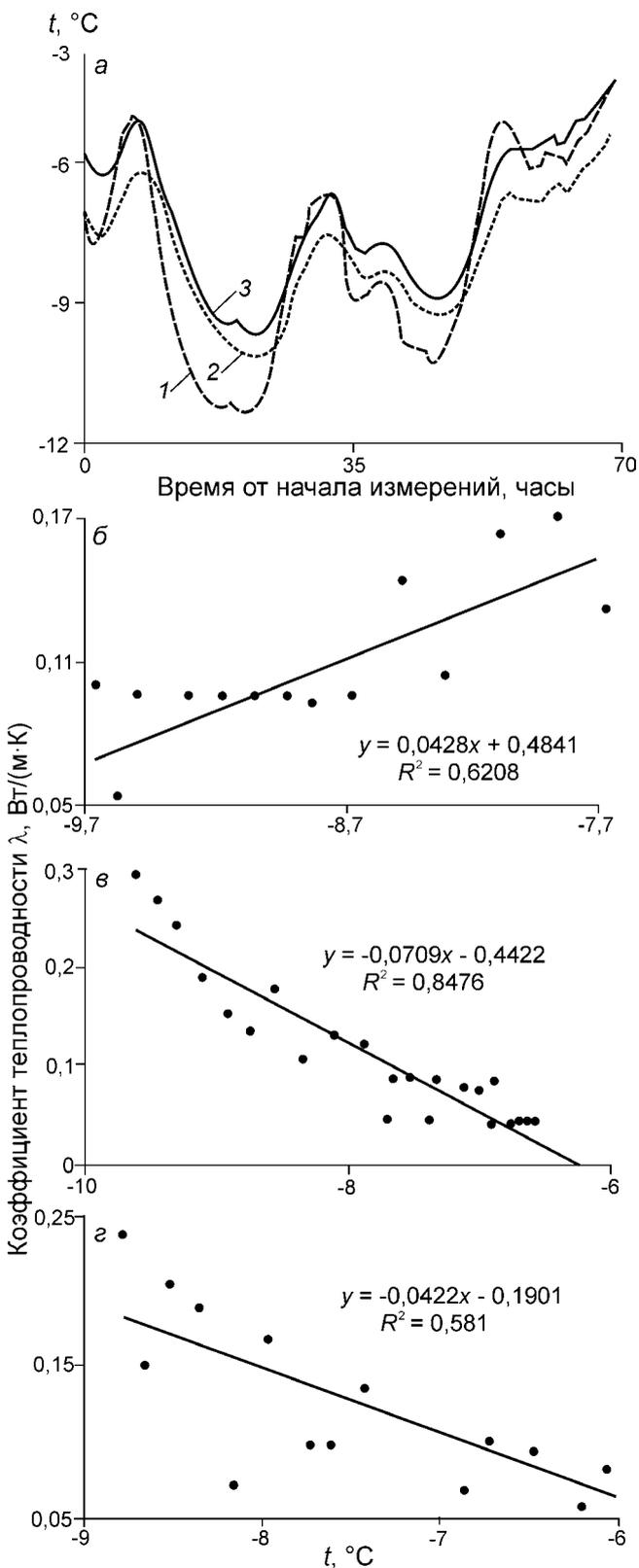
Рис. 3. Температура снежного покрова и коэффициент теплопроводности метелевого снега:

а – температура снега на глубине от дневной поверхности: 1 – 3 см; 2 – 8 см; 3 – 13 см; коэффициент теплопроводности метелевого снега плотностью 220 кг/м^3 : б – на этапе охлаждения (интервал времени от начала измерений 0–3 ч на рис. 3, а); в – на этапе нагрева (то же, 15–18 ч); г – на этапе охлаждения (то же, 4,5–6,5 ч).

Fig. 3. Snow temperature and coefficient of heat conductivity for snowdrift snow:

а – the temperature at depth from the snow surface: 1 – 3 cm; 2 – 8 cm; 3 – 13 cm; the heat conductivity of snowdrift snow with density 220 kg/m^3 : б – in cooling step (time interval from the measurement start 0–3 hours, in Fig. 3, а); в – in heating step (same as 15–18 hours); г – in cooling step (same as 4.5–6.5 hours)

Естественный ход температуры в стенке шурфа на разной глубине приведён на рис. 5, а. Среднее значение коэффициента теплопроводности глу-



бинной изморози на этапе охлаждения составило $0,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а на этапе нагрева в разные временные интервалы – $0,14$; $0,17$ и $0,16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Результаты расчётов коэффициента теплопроводности среднезернистого смёрзшегося снега плотностью $393 \text{ кг}/\text{м}^3$ на глубине 65 см от дневной горизонтальной поверхности приведены на рис. 6. Естественный ход температуры в стенке шурфа на разной глубине показан на рис. 6, а. Среднее значение коэффициента теплопроводности на этапе охлаждения составило $0,34 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а на этапе нагрева в разные временные интервалы – $0,40$; $0,43$ и $0,38 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Зависимость теплопроводности снега от градиента температуры дана на рис. 7, а. При этом за основу брались значения коэффициента теплопроводности для случая, представленного на рис. 6, д. Из рис. 7, а видно, что с ростом градиента температуры теплопроводность снижается. Такой же характер зависимости наблюдался во всех ранее рассмотренных нами случаях (см. рис. 3–6). Это обусловлено зависимостью градиента температуры от температуры, которая для случая рис. 6, д дана на рис. 7, б. С изменением температуры поверхности увеличивается её отличие от температуры лежащих ниже слоёв и в результате градиент температуры растёт. Результаты расчётов, выполненных на основе измерений температурного режима для снега разного типа, приведены в табл. 2.

Анализ результатов

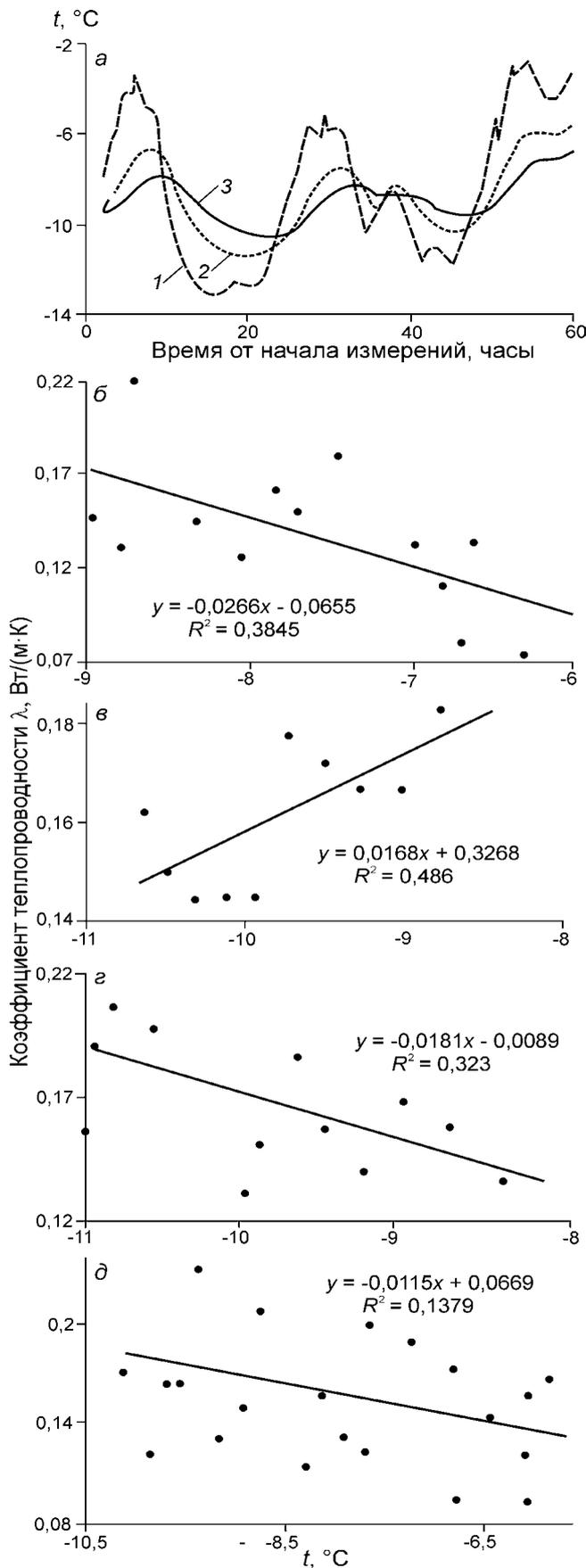
Результаты измерений и расчётов показали, что в режиме нагревания тренд значений коэффициента теплопроводности показывает более высокие значения для снега с низкой температурой. Это противоречит известному мнению о росте теплопроводности снега с ростом температуры

Рис. 4. Температура снежного покрова и коэффициент теплопроводности глубинной изморози:

а – температура стенки шурфа на глубине: 1 – 5 см; 2 – 10 см; 3 – 15 см; коэффициент теплопроводности глубинной изморози плотностью $283 \text{ кг}/\text{м}^3$: б – на этапе охлаждения (интервал времени от начала измерений 12–17 ч на рис. 4, а); в – на этапе нагрева (то же, 24–32 ч); г – на этапе нагрева (то же, 48–53 ч)

Fig. 4. Snow temperature and coefficient of heat conductivity for depth hoar:

а – the temperature at depth in the pit wall: 1 – 5 cm; 2 – 10 cm; 3 – 15 cm; the coefficient of heat conductivity of depth hoar with density of $283 \text{ kg}/\text{m}^3$: б – in cooling step (time interval from the measurement start 12–17 hours, in Fig. 4, а); в – in heating step (same as 24–32 hours); г – in heating step (same as 48–53 hours)



за счёт диффузии водяного пара [7, 13]. Возможно, это обусловлено тем, что при нагревании поверхности поток пара направлен в глубь снежной толщи и чем холоднее снег, тем больше конденсация пара и тепловыделение, т.е. создаётся эффект увеличения теплопроводности.

В режиме охлаждения поток водяного пара направлен к поверхности снега. При этом значительную роль играет диффузия водяного пара, которая растёт с повышением температуры, что вызывает рост теплопроводности снега. Для проверки этого предположения были выполнены расчёты по математической модели тепло- и массообмена в снежном покрове с учётом диффузии водяного пара и сублимации–конденсации [1]. В результате был получен ход температуры снега на разной глубине от дневной поверхности при суточных колебаниях температуры воздуха. Обработка этих значений температуры снега по формуле (1) также показала наличие вышеуказанного эффекта.

Согласно результатам исследований, коэффициент теплопроводности рыхлого мелкозернистого снега в 2–3 раза меньше, чем смёрзшегося мелко- и среднезернистого снега. Это, вероятно, обусловлено слабым контактом между кристаллами рыхлого снега по сравнению со смёрзшимся снегом, что снижает кондуктивную теплопроводность. Для плотного снега теплопередача за счёт кондуктивной теплопроводности превышает перенос тепла в результате диффузии водяного пара [5, 6]. Значения коэффициента теплопроводности глубинной изморози в 3–4 раза меньше, чем смёрзшегося зернистого снега, и в 1,5 раза ниже, чем у рыхлого мелкозернистого снега.

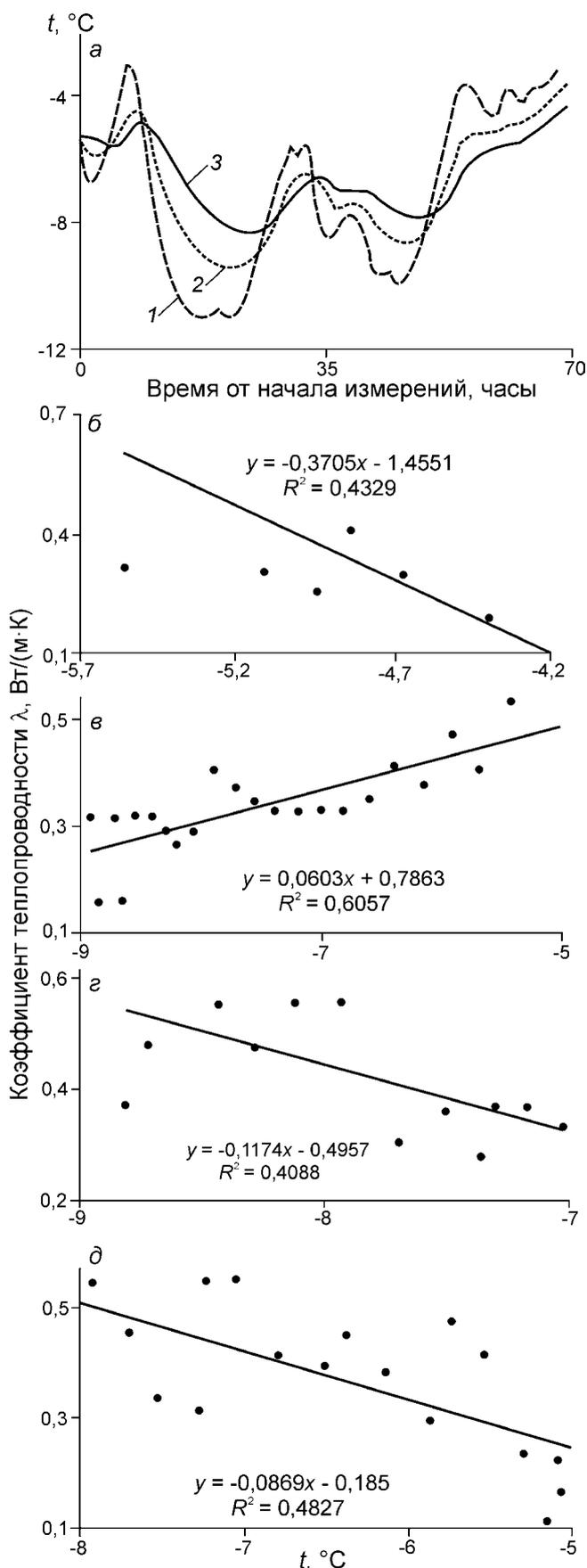
Сравним полученные нами значения коэффициента теплопроводности снега с данными других авторов. В настоящее время известно много зави-

Рис. 5. Температура снежного покрова и коэффициент теплопроводности рыхлого мелкозернистого снега:

a – температура стенки шурфа на глубине, см: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; коэффициент теплопроводности мелкозернистого рыхлого снега плотностью 292 кг/м³: *б* – на этапе нагрева (интервал времени от начала измерений 3–6 ч на рис. 5, *a*); *в* – на этапе нагрева (то же, 25–29 ч); *г* – на этапе нагрева (то же, 48–55 ч); *д* – на этапе охлаждения (то же, 9–16 ч)

Fig. 5. Snow temperature and coefficient of heat conductivity of fine-grained loose snow:

a – the temperature at depth in the pit wall: 1 – 5 cm; 2 – 10 cm; 3 – 15 cm; the coefficient of heat conductivity of fine-grained loose snow with density of 292 kg/m³: *б* – in heating step (time interval from the measurement start 3–6 hours, in Fig. 5, *a*); *в* – in heating step (same as 25–29 hours); *г* – in heating step (same as 48–55 hours); *д* – in cooling step (same as 9–16 hours)



симостей коэффициента теплопроводности снега от его плотности [4, 7]. Рассмотрим зависимости, полученные с использованием большого объёма фактического материала и широко применяемые на практике. Так, А.В. Паловым предложена следующая простая зависимость [7]:

$$\lambda = \kappa \rho, \text{ Вт/(м·К)}. \quad (2)$$

Здесь $\kappa = 10^{-3}$ – коэффициент размерности, который автор рекомендует применять при температуре снега $-10 \div -20$ $^{\circ}\text{C}$.

При более высокой (или низкой) температуре снега значение λ следует увеличить (или уменьшить) на 0,04 Вт/(м·К). Такая коррекция в определённой степени учитывает влияние температуры снега на величину λ . На основе анализа экспериментальных данных в работе [14] предложена следующая зависимость для определения коэффициента теплопроводности глубинной изморози λ_{dh} :

$$\lambda_{dh} = \lambda_{fs} + 51,8 / ((t - 27,8)^2 + 211,2), \quad (3)$$

где $\lambda_{fs} = 0,06$ Вт/(м·К) – теплопроводность свежего сухого снега; t – температура снега.

Для метелевого снега в режиме охлаждения поверхности и для смёрзшегося мелко- и среднезернистого снега в режиме нагревания (см. табл. 2) значения коэффициента теплопроводности приблизительно соответствуют расчётам по формуле (2). Полученные значения коэффициента теплопроводности глубинной изморози (см. табл. 2) несколько больше, чем значения, рассчитанные по формуле (3), и лучше соответствуют значениям, полученным в Подмосковье [6].

Одно из важнейших практических приложений коэффициента теплопроводности – учёт теплоизолирующей роли снежного покрова при расчётах промерзания грунта. Для учёта влияния снежного

Рис. 6. Температура снежного покрова и коэффициент теплопроводности смёрзшегося среднезернистого снега: *a* – температура стенки шурфа на глубине, см: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; коэффициент теплопроводности смёрзшегося среднезернистого снега плотностью 370 кг/м³: *б* – на этапе нагрева (интервал времени от начала измерений 3–6 ч на рис. 6, *a*); *в* – на этапе охлаждения (то же, 9–16 ч); *г* – на этапе нагрева (то же, 25–29 ч); *д* – на этапе нагрева (то же, 48–55 ч)

Fig. 6. Snow temperature and coefficient of heat conductivity of frozen medium-grained snow: *a* – the temperature at depth in the pit wall: 1 – 5 cm; 2 – 10 cm; 3 – 15 cm; the coefficient of heat conductivity of frozen medium-grained snow with density of 370 kg/m³: *б* – in heating step (time interval from the measurement start 3–6 hours, in Fig. 6, *a*); *в* – in cooling step (same as 9–16 hours); *г* – in heating step (same as 25–29 hours); *д* – in heating step (same as 48–55 hours)

Таблица 2. Коэффициент теплопроводности снега в режиме нагрева и охлаждения поверхности, Вт/(м·К)

Характеристика снега	Нагрев поверхности	Охлаждение поверхности
Метелевый снег плотностью 220 кг/м ³	0,14	0,18–0,25
Глубинная изморозь плотностью 283 кг/м ³	0,11–0,12	0,11
Мелкозернистый смёрзшийся снег на глубине 13 см плотностью 370 кг/м ³	0,45	0,55
Мелкозернистый рыхлый снег на глубине 30 см плотностью 292 кг/м ³	0,14–0,16	0,16
Среднезернистый смёрзшийся снег на глубине 65 см плотностью 393 кг/м ³	0,38–0,43	0,34

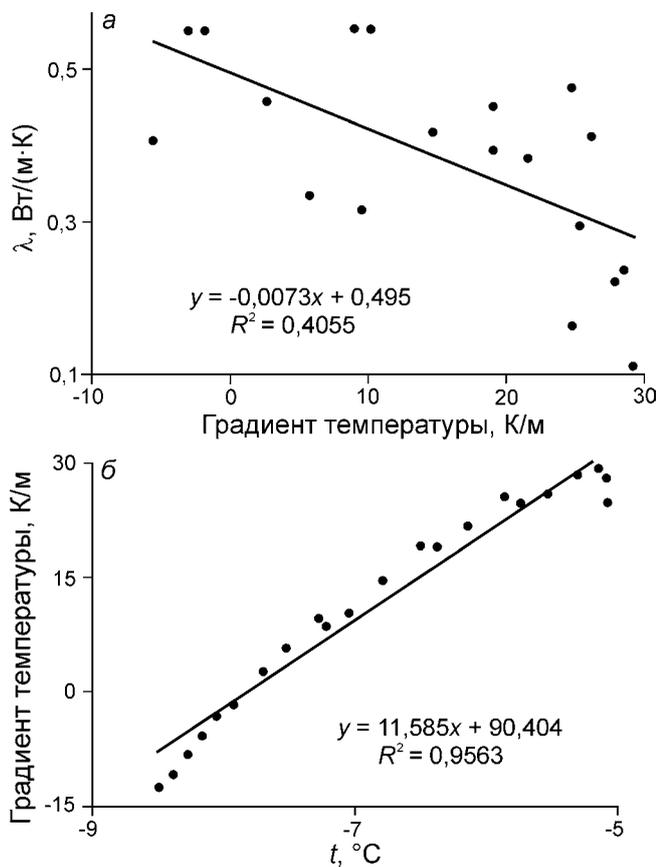


Рис. 7. Зависимость теплопроводности снега от градиента температуры снежной толщи (а) и градиента температуры в снеге от температуры снега (б)

Fig. 7. The dependence of snow heat conductivity on the snow temperature gradient (а) and the snow temperature gradient from the snow temperature (б)

покрова при расчётах промерзания грунта обычно применяют уравнение типа Фурье. Поэтому обработка результатов экспериментов по уравнению (1), в отличие от применения моделей теплообмена с учётом диффузии водяного пара и сублимации–конденсации [1], позволяет получать значения коэффициента теплопроводности снега, которые

можно применить в практических расчётах. Отметим, что в пределах одного цикла измерений и расчётов на всех рисунках наблюдаются большой разброс значений коэффициента теплопроводности и значительная его изменчивость в небольшом диапазоне температур снега. Чтобы объяснить это, требуются дальнейшие исследования.

Заключение

Результаты измерений и расчётов показали, что значения коэффициента теплопроводности зависят как от структуры и температуры снега, так и от режимов нагревания и охлаждения. Так, в режиме нагревания поверхности коэффициент теплопроводности снега выше для снега с низкой температурой. Возможно, это обусловлено тем, что при нагревании поверхности поток пара перемещается от поверхности в глубину и чем холоднее снег, тем больше конденсация пара и тепловыделение, т.е. создаётся эффект увеличения теплопроводности. В режиме охлаждения поток водяного пара направлен к поверхности снега. При этом значительную роль играет диффузия водяного пара, которая растёт с повышением температуры, что повышает теплопроводность снега. Полученные значения коэффициента теплопроводности рыхлого мелкозернистого снега и глубинной изморози снега оказались в 2–4 раза меньше, чем смёрзшегося мелко- и среднезернистого снега.

Экспериментальные исследования в полевых условиях проведены в рамках выполнения бюджетной темы Рег. № 01201352476. Обработка и анализ данных выполнены при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН № 12.

Литература

1. Котляков В.М., Осокин Н.И., Сосновский А.В. Математическое моделирование тепломассообмена в снежном покрове при таянии // Криосфера Земли. 2004. Т. VIII. № 1. С. 78–83.

2. *Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В., Сократов С.А.* О роли некоторых природных факторов в промерзании грунтов // МГИ. 2000. № 88. С. 41–45.
3. *Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В.* Оценка влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата // Изв. РАН. Сер. геогр. 2006. № 4. С. 40–46.
4. *Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В., Жидков В.А., Китаев Л.М., Чернов Р.А.* Влияние снежного покрова на теплообмен с подстилающей поверхностью // Оледенение Северной Евразии в недавнем прошлом и ближайшем будущем / Под ред. В.М. Котлякова. М.: Наука, 2007. С. 15–54.
5. *Осокин Н.И., Сосновский А.В., Шевченко А.В.* Влияние температуры и плотности снега на массоперенос в снежном покрове // МГИ. 2012. № 1. С. 3–8.
6. *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.
7. *Павлов А.В.* Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: ГЕО, 2008. 230 с.
8. *Calonne N., Flin F., Morin S., Lesaffre B., du Roscoat S.R., Geindreau C.* Numerical and experimental investigations of the effective thermal conductivity of snow // Geophys. Research Letters. V. 38. L23501. doi: 10.1029/2011GL049234. 2011.
9. *Kamata Y., Sokratov S.A., Sato A.* Temperature and temperature gradient dependence of snow recrystallization in depth hoar snow // Advances in Cold Regions Thermal Engineering and Sciences / Eds. K. Hutter, Y. Wang, H. Beer. Verlag: Springer, 1999. P. 395–402.
10. *Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Desinov L.V., Osokin N.I.* Causes and consequences of the catastrophic advance of the Kolka surging glacier in the Central Caucasus // Doklady Earth Sciences. 2003. T. 389. № 3 P. 447–451.
11. *Osokin N.I., Samoylov R.S., Sosnovskiy A.V., Sokratov S.A., Zhidkov V.A.* Model of the influence of snow cover on soil freezing // Annals of Glaciology. 2000. T. 31. P. 417–421.
12. *Pinzer B.R., Schneebeli M.* Snow metamorphism under alternating temperature gradients: Morphology and recrystallization in surface snow // Geophys. Research Letters. V. 36. L23503. doi: 10.1029/2009GL039618 2009.
13. *Riche F., Schneebeli M.* Thermal conductivity of snow measured by three independent methods and anisotropy considerations // The Cryosphere. 2013. № 7. P. 217–227.
14. *Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K.* The thermal conductivity of seasonal snow // Journ. of Glaciology. 1997. V. 43. № 143. P. 26–41.

Summary

This paper presents results of field investigations of coefficient of efficient thermal conductivity of snow with different structures and densities. Observations were performed in spring of 2013 in the vicinity of meteorological station Barentsburg. The data obtained were processed by means of the Fourier technique that allowed deriving relationship between thermal conductivity and snow temperature in regimes of cooling and warming of the snow cover surface. It was found that coefficient of efficient thermal conductivity increases with rising of the snow temperature in the regime of the snow surface cooling, and it does decrease under regime of warming. This can be possibly caused by the following: under the snow surface warming a water vapor flux moves inward, and when the snow temperature drops the water vapor condensation grows. That results in additional temperature rise and creates effect of growth of thermal conductivity at the lower temperature. When the snow surface cools down this effect is absent, and when the snow temperature drops a contribution of water vapor diffusion into thermal conductivity also decreases, and as a result, the coefficient drops too. Average value of coefficient of efficient thermal conductivity of the depth hoar with density of 280 kg/m³ is 0.12 W/(mK) that in 3–4 times smaller than the same coefficient of granular and frozen together snow with density of 370–390 kg/m³.