

Метаморфизм и термические свойства свежеснежавшего снега (по исследованиям в Подмоскowie)

© 2016 г. Р.А. Чернов

Институт географии РАН, Москва
rob31@mail.ru

Metamorphism and thermal properties of fresh snow (study in the Moscow region)

R.A. Chernov

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
rob31@mail.ru

Article accepted for publication on February 18, 2016

Keywords: *coefficient of snow thermal conductivity, new snow, rounded snow particles, temperature gradient snow metamorphism.*

Summary

As a result of laboratory tests were obtained values of the coefficient thermal conductivity (K_{eff}) of new snow for different types of the solid precipitation: plates, needles, stellars, graupels. Snow samples were collected during a snowfall and placed in the freezer. For all types of sediment thermal conductivity of snow is equal to 0.03–0.04 W/m·°C. Transformation of new snow occurs within 10 days at average temperature -10 °C and the gradient temperature of 50–60 °C/m. Under these conditions, the metamorphism leads to an increase the density of snow, size of grains and rounded snow particles. At the beginning of the experiment, the thermal conductivity of snow is linearly increased in proportion to the density of the snow. However, after 3–5 days K_{eff} stabilized at about 0.08–0.09 W/m·°C, although the density of the snow and size of grains continued to increase. This effect occurs with the appearance of faceted crystals and loosening of snow. In the future, while maintaining a negative temperature coefficient of thermal conductivity remained unchanged. Thus, the temperature gradient metamorphism affect to the thermal conductivity snow, which plays an important role in maintaining the thermal insulation properties of snow cover. The article describes the formula to calculate the thermal conductivity of the snow conditions in the temperature gradient metamorphism. Such conditions are characteristic of the vast expanses of the north and northeast of the European part of Russia. On the basis of long-term observations in Moscow shows the average minimum and maximum values for the density of the snow woods and fields on the basis of which can be calculated for the thermal properties of the snow.

Статья принята к печати 18 февраля 2016 г.

Ключевые слова: *зернистый снег, коэффициент теплопроводности снега, свежеснежавший снег, термоградиентный метаморфизм снега.*

Рассмотрены процессы метаморфизма свежеснежавшего снега (оседание и перекристаллизация) при отрицательных температурах и наличии градиента температуры в снегу. Исследованы образцы свежеснежавшего снега, отобранные при выпадении основных типов твёрдых осадков, характерных для Подмоскowie: звёздочек, игл, пластинок и снежной крупы. Экспериментально показано влияние процессов метаморфизма снега на его теплопроводность. Установлено, что при оседании и перекристаллизации свежеснежавшего снега его теплопроводность возрастает нелинейно: увеличивается в первые дни после снегопада и стабилизируется на уровне 0,09 Вт/м·°C через 3–5 дней при появлении признаков конструктивного метаморфизма. Таким образом, метаморфизм снега влияет на его термические свойства и это можно оценить количественно.

Введение

Снежный покров — естественное препятствие для проникновения холода из атмосферы в почву, что обусловлено его пористой структурой и малой плотностью. Эти качества наиболее выражены в рыхлых слоях свежеснежавшего снега, отложенного при слабом ветре или штиле. В таком слое кристаллы снега образуют чрезвычайно пористую структуру, особенно когда твёрдые осадки выпадают в виде ле-

дяных игл, пластинок и звёздочек. В средней полосе России в зимний период среди твёрдых осадков наиболее распространены иглы и звёздочки (шестиугольные дендриты), хотя часто встречаются и пластинки, и снежная крупа. Возникновение определённого типа снежинок зависит от температуры и влажности в нижнем слое атмосферы [3, 5]. Пространственная форма снежинок препятствует компактной упаковке кристаллов, что обеспечивает большую пористость слоя снега и незначительную начальную

плотность. По многочисленным наблюдениям, в Подмоскowie плотность свежеснежавшего снега в первые сутки после снегопада составляет 0,06–0,09 г/см³. В последующие дни при безветрии (такие условия характерны для леса) снег уплотняется до 0,13–0,15 г/см³. В холодные периоды слой свежеснежавшего снега некоторое время сохраняет характерные признаки кристаллического строения. Контакты между кристаллами свежеснежавшего снега вытянуты, а их толщина не превышает 0,1 мм. Это создаёт ажурную кристаллическую структуру, в которой процессы кондуктивной передачи тепла затруднены. Именно поэтому свежеснежавший снег имеет очень низкую теплопроводность, которая сравнима с теплопроводностью воздуха [1].

Кристаллическое строение свежеснежавшего снега нарушается процессами естественного уплотнения и сублимационного округления. При сублимационном округлении разрушаются тонкие связи между кристаллами снега. В естественных условиях залегания снежного покрова этот процесс длится от нескольких часов до нескольких суток в зависимости от интенсивности процессов перекристаллизации, что, в конечном счёте, определяется температурой снега и его массой [14]. Уплотнение снежного покрова и пространственные преобразования его структуры приводят к изменчивости его термических свойств. Ранее неоднократно отмечалось влияние плотности и температуры снега на его теплопроводность [1, 6, 10]. Кроме того, установлено, что структура снега связана с процессами теплопередачи, но численные оценки этой связи получены сравнительно недавно [9, 13, 15]. Определения теплопроводности свежеснежавшего снега в научной литературе встречаются крайне редко, а влияние структуры снега на этот параметр практически не исследовано. Во многих регионах России, где наблюдаются частые снегопады, свежеснежавший снег представляет собой постоянно возобновляемый слой, толщина которого сравнима с толщиной всей снежной толщи, особенно в первой половине зимы. Термические свойства этого слоя могут быть значимы в теплофизических расчётах при оценке промерзания глубины грунтов и температурного режима верхнего слоя почвы [6–8]. А для южной и юго-западной частей средней полосы России теплофизиче-

ские свойства слоёв снежного покрова определяют эффективность земледелия.

В первые дни после снегопада характеристики свежеснежавшего снега претерпевают значительные изменения: плотность снега увеличивается в 1,5–2 раза; в 2–4 раза укрупняются зёрна снега, изменяется и их форма. Маловероятно, что в этот период теплопроводность снега остаётся на прежнем уровне. В настоящей работе выполнены экспериментальные оценки теплопроводности свежеснежавшего снега на первой стадии его метаморфизма и при дальнейшей его перекристаллизации в случае отрицательных температур, определены также начальные значения коэффициента теплопроводности. Показаны различия в изменчивости теплопроводности свежеснежавшего снега разного типа, они указывают на особенности процессов его сублимационной перекристаллизации.

Методика исследований

Исследования теплофизических свойств свежеснежавшего снега предусматривали полевые наблюдения, отбор образцов снега, а также лабораторные методы измерения его теплопроводности. Полевые наблюдения, выполненные автором, позволили установить, что на юге Подмоскowie снежный покров имеет выраженную слоистость, которая определена перерывами в снегонакоплении и частыми зимними оттепелями. Во второй половине зимы снежная толща представлена двумя основными горизонтами: верхний горизонт состоит из свежеснежавшего, мелко- и среднезернистого снега, а нижний – из слоёв глубинной изморози. Плотность снежного покрова, как правило, увеличивается сверху вниз. Однако частые оттепели несколько усложняют стратиграфию снежного покрова, что отражается в чередовании рыхлых и уплотнённых слоёв снега, а также в скачкообразном изменении их плотности. В верхнем горизонте снежного покрова плотность изменяется от 0,06 до 0,18 г/см³, отдельные слои снега, сформированные во время оттепели, имеют плотность до 0,25 г/см³. В нижнем горизонте вариации плотности снега более равномерны: здесь плотность изменяется от 0,20 до 0,35 г/см³. В таблице представлены данные о средней плотности

Средняя плотность слоёв снега (от минимальных значений до максимальных) на юге Подмосковья, г/см³

Вид снега	Пастбище	Смешанный лес
Свежевыпавший (наблюдаются первичные формы атмосферных кристаллов)	0,10–0,19	0,05–0,12
Мелкозернистый (кристаллы снега имеют огранку)	0,12–0,21	0,11–0,14
Среднезернистый, плотный (бесформенные зёрна, спаянные оттепелью)	0,17–0,40	0,16–0,28
Перекристаллизованный снег (глубинная изморозь)	0,22–0,36	0,15–0,27

слоёв снега в зимний период, полученные автором с 2001 по 2015 г. на юге Подмосковья. Наблюдения велись на постоянном снегомерном профиле, охватывающем различные элементы ландшафта. Значения средней плотности снежного покрова даны для пастбища и смешанного леса (берёза и ель).

Как уже отмечалось, теплопроводность снега в значительной степени зависит от его плотности, поэтому наилучшие теплозащитные свойства характерны для рыхлого снега, имеющего большую пористость и наименьшую плотность. Начальная плотность свежевыпавшего снега не превышает 0,06–0,08 г/см³. При естественном оседании снега в зависимости от условий погоды она увеличивается до 0,12–0,15 г/см³. Слой свежевыпавшего снега препятствует проникновению холода с поверхности. На юге Подмосковья средняя толщина свежевыпавшего снега составляет 10–15% всей толщины снежного покрова, она равна 3–6 см. Полевые наблюдения показали, что даже в периоды похолоданий структура свежевыпавшего снега изменяется достаточно быстро – в течение 5–7 дней формируются рыхлые слои мелкозернистого снега, состоящие из бесформенных и частично огранённых кристаллов размером менее 0,5 мм.

Поскольку рыхлый снег отличается хорошими теплозащитными свойствами, то по мере его снегонакопления именно свежевыпавший и мелкозернистый снег становятся важными элементами в теплообмене между почвой и атмосферой. На это указывают непосредственные полевые измерения тепловых потоков в снеге. В дневные часы при среднем градиенте темпе-

ратуры около 40 °С/м значения теплового потока в верхнем слое снежного покрова составляли около 3 Вт/м², в нижнем слое достигали 5 Вт/м², а в отдельные часы – 7 Вт/м². Наблюдаемые различия, вероятно, обусловлены неодинаковой интенсивностью процессов сублимации и испарения водяного пара в слоях снега. Полевые измерения показали, что верхний слой снега служит барьером для интенсивного теплообмена через снежную толщу. Количественные характеристики этого процесса ещё слабо изучены. По ряду технических причин непрерывные измерения теплового потока и плотности свежевыпавшего снега в естественных условиях провести довольно трудно, поэтому мы выполнили лабораторные испытания, которые предусматривали определение теплопроводности свежевыпавшего снега, его плотности, размера зёрен и их формы.

Наблюдения проводились в течение 10 дней, начиная с момента отбора слоя снега во время снегопада. Взятые образцы снега помещали в морозильник для обеспечения постоянных термических условий в слое. Образцы отбирали с сохранением горизонтального положения слоёв свежевыпавшего пушистого снега во время разновременных снегопадов. Кристаллический состав снега был различным: отобраны образцы, которые состояли преимущественно из снежинок в форме пластин и их фрагментов, а также из дендритов (звёздочек), игл и снежной крупы.

Прямоугольный блок свежевыпавшего снега с размерами сторон 30 × 30 см и толщиной до 20 см помещался в морозильник в толстостенном контейнере. Температура в морозильнике была задана постоянной и составляла $-17,5 \pm 1,0$ °С. В основании образца снега поддерживалась температура от $-6,0$ до $-9,0$ °С, стенки контейнера, в котором хранился образец, были теплоизолированы от морозильника. Перепад температуры между основанием и поверхностью образца обеспечивал градиент температуры 50 ± 10 °С/м. В центре образца были установлены основной и резервный датчики теплового потока с разрешением 0,1 и 0,5 Вт/м² соответственно. Температура снега сверху и снизу образца и тепловой поток в его центре контролировались дистанционно вне морозильника. Измерения проводились автором в Институте географии РАН в январе – марте 2015 г. и в

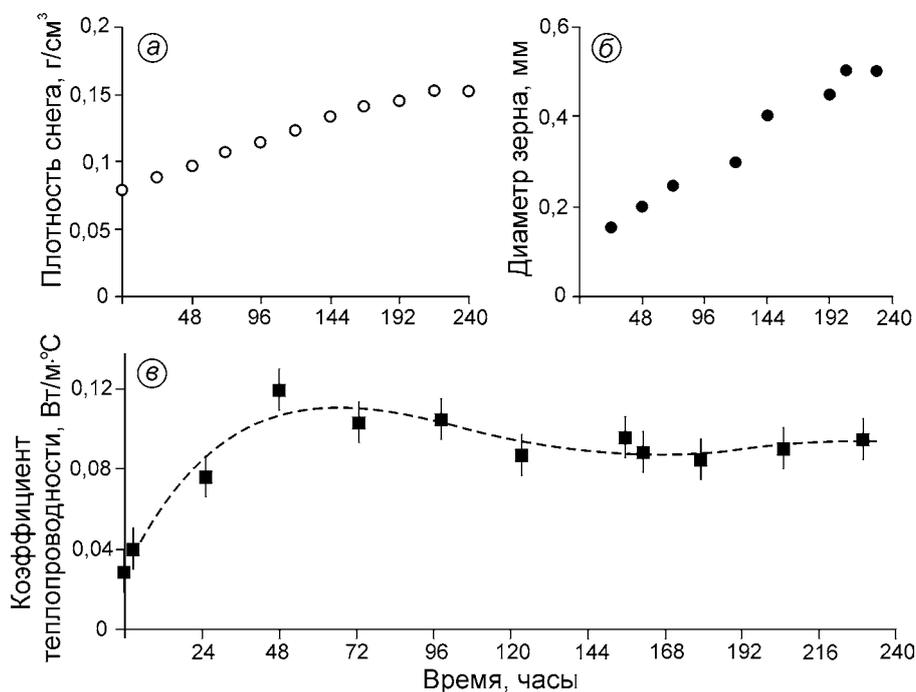


Рис. 1. Характеристики свежеснеговывпавшего снега в течение 10 суток после снегопада:

a – плотность снега; *б* – средний размер кристаллов; *в* – коэффициент теплопроводности

Fig. 1. Characteristics of new snow within 10 days after the snowfall:

a – snow density; *б* – average grain size; *в* – thermal conductivity coefficient

январе 2016 г., подробное описание применяемого метода анализа и устройство экспериментальной установки приведены в работе [13].

Результаты исследований

Начальная плотность свежеснеговывпавшего снега, состоящего из снежинок в форме пластинок, составила 0,08 г/см³. После отбора образца и помещения его в контейнер плотность увеличилась до 0,09 г/см³. В процессе опыта плотность снега рассчитывалась по величине его оседания в контейнере. График изменения плотности снега приведён на рис. 1, *a*. По окончании опыта, через 10 дней, проводились контрольные измерения плотности снега в образце с помощью весов. Конечная плотность снега оказалась равной 0,18 г/см³. С помощью макросъёмки при отборе небольших проб снега исследовались структурные изменения снега и определялись размеры зёрен. На рис. 1, *б* представлен график изменения среднего размера зёрен снега в процессе опыта.

Коэффициент теплопроводности снега рассчитан по уравнению Фурье как отношение величины теплового потока к величине градиента температуры, которые измерялись в процессе опыта каждые три часа. Полученные значения коэффициента теплопроводности свежеснеговывпав-

шего снега даны на рис. 1, *в*. Максимальные погрешности, равные $\pm 0,01$ Вт/м·°С, показаны вертикальными линиями на экспериментальных точках (см. рис. 1, *в*). Как видно из рис. 1, в отличие от плотности снега и размера его зёрен, коэффициент теплопроводности свежеснеговывпавшего снега со временем увеличивается нелинейно. Сначала, в течение двух–трёх суток, он растёт линейно, а затем стабилизируется. Макросъёмка структуры снега показала, что в первые дни после снегопада происходит интенсивное округление зёрен, при этом первичные кристаллографические формы снежинок исчезают. В последующие дни свежеснеговывпавший снег в образце полностью трансформировался в мелкозернистый, при этом появились признаки конструктивного метаморфизма снега: на поверхности кристаллов возникла огранка, масса снега легко разделялась на отдельные короткие цепочки кристаллов в отличие от комковатого зернистого снега (рис. 2).

Эксперимент показал, что структурные преобразования свежеснеговывпавшего снега происходят очень быстро, несмотря на низкие температуры в морозильнике и минимальную массу. В течение 10 дней средние размеры зёрен увеличились в несколько раз и достигли в диаметре 0,5 мм. В процессе опыта образец снега испытывал оседание и его плотность, как уже отмечалось, линейно увеличивалась до 0,18 г/см³. Вместе с тем структу-

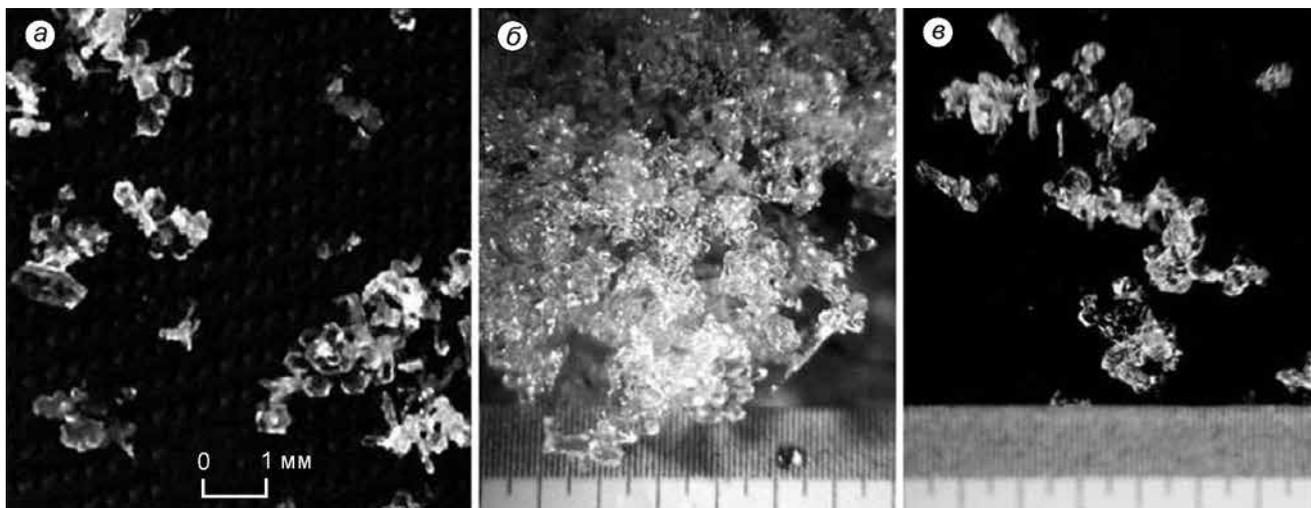


Рис. 2. Термоградиентный метаморфизм свежеснеговывпавшего снега при времени, прошедшем после снегопада: *a* – 1 час; *б* – 100 часов; *в* – 205 часов

Fig. 2. Temperature gradient metamorphosis of new snow, time after snowfall: *a* – 1 hour; *б* – 100 hours; *в* – 205 hours

ра снега оказалась более жёсткой и одновременно более хрупкой: снег сыпался при отборе проб. Подобный признак структуры снега более характерен для глубинной изморози, хотя размеры её кристаллов значительно больше. Такие же количественные и качественные изменения снега мы также наблюдали и в других образцах. В образцах с иглами и дендритами (звёздочки) начальная плотность снега была одинакова и составляла $0,10 \text{ г/см}^3$. При самоуплотнении снега плотность увеличилась до $0,15$ и $0,14 \text{ г/см}^3$ для дендритов и игл соответственно. В случае с иглами наблюдался замедленный рост плотности снега, что может быть связано с особенностями пространственного каркаса слоя снега, сложенного тонкими лучами кристаллов льда. Образец из снежной крупы имел начальную плотность $0,11 \text{ г/см}^3$ и уплотнился до $0,18 \text{ г/см}^3$.

Структурные изменения в образцах также имели различную интенсивность: дендриты преобразовались в зернистый снег за пять дней, иглы – за шесть дней, снежная крупа – за три дня. На рис. 3 показаны экспериментальные данные измерений коэффициента теплопроводности снега в процессе его метаморфизма. В образцах снега 1–3 наблюдался рост коэффициента теплопроводности в течение 4–5 дней, в образце 4 (снежная крупа) теплопроводность в первые дни даже уменьшалась. В последующие дни во всех образцах наблюдалась стабилиза-

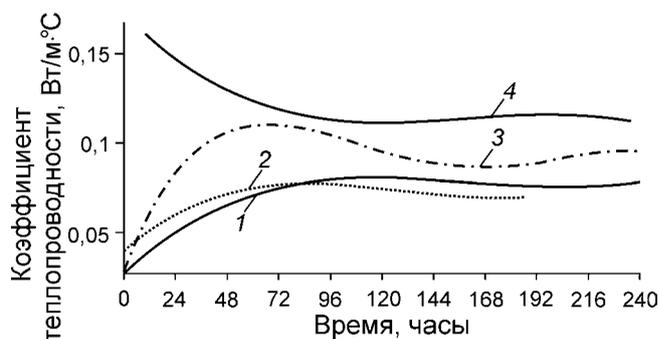


Рис. 3. Изменения коэффициента теплопроводности свежеснеговывпавшего снега в процессе метаморфизма:

1 – игл; *2* – звёздочек; *3* – пластинок; *4* – снежной крупы
Fig. 3. Changes of the thermal conductivity of new snow in the process of metamorphosis:

1 – needle; *2* – stellar; *3* – plates; *4* – graupels

ция коэффициента теплопроводности на уровне $0,07$ – $0,11 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{С}$. Температурные условия опытов были идентичными, температура в центре образца составляла $-9 \div -10 \text{ }^\circ\text{С}$, максимально понижаясь до $-12 \text{ }^\circ\text{С}$. Значения теплового потока изменялись в зависимости от уплотнения и оседания образца и составляли 3 – 6 Вт/м^2 .

Повторные взятия образцов и определения теплопроводности свежеснеговывпавшего снега показали практически те же результаты. Для дендритов и снежной крупы при начальной плотности снега, равной $0,09$ и $0,12 \text{ г/см}^3$ соответственно, теплопроводность снега через 10 дней стабили-

зировалась на уровне 0,12 и 0,09 Вт/м²·°С. Однако теплопроводность снега, сложенного первоначально дендритами, оказалась выше ожидаемой, что можно объяснить отсутствием в начале опыта (трое суток после снегопада) градиента температуры в образце. Отметим, что без градиента температуры в образце свежевыпавшего снега (дендриты) его плотность в первые трое суток после снегопада изменялась как и с градиентом температуры.

Обсуждение результатов

Результаты эксперимента позволили выделить характерные признаки начальной стадии метаморфизма снега и установить его влияние на термические свойства снега. Во всех случаях наблюдается преобразование кристаллических форм снежинок в бесформенные частицы снега, отмечены равномерное увеличение плотности снега и рост его кристаллов. Постоянно действующий градиент температуры в образце вызывает появление огранки на поверхности кристаллов. А развитие гранных форм, по-видимому, указывает на перестройку зернистой структуры снега, так как он становится рассыпчатым и менее связанным. В результате этих процессов теплопроводность снега в целом увеличивается, но процесс протекает неравномерно.

Исследования термических свойств снега показали, что уплотнение снега и его структура влияют на процессы теплопередачи в снегу. По мнению большинства авторов, с увеличением плотности снега возрастает и его теплопроводность [1, 10, 14, 16]. Тем не менее, с ростом кристаллов снега наблюдаются уменьшение общего числа связей между ними и утончение нагруженных связей в каркасе снега [2, 4, 12], что препятствует теплопередаче, так как именно ледяной каркас снега — основной проводник тепла.

Результаты наших опытов показывают взаимодействие этих процессов: при оседании снега и увеличении его плотности коэффициент теплопроводности стабилизируется. В работах [10, 16] представлены многочисленные примеры подобных зависимостей отечественных и зарубежных авторов, которые не обнаруживают этот эффект. Однако в работе М. Стурма приведены низкие значения теплопроводности снега,

которые, по мнению автора, характерны для сухого перекристаллизованного снега. В нашем случае теплопроводность свежевыпавшего снега достигала 0,09–0,11 Вт/м²·°С в первые 3–5 дней, а в дальнейшем теплопроводность преобразованного снега оставалась постоянной, что вполне согласуется с результатами М. Стурма [16] по измерению теплопроводности перекристаллизованного рыхлого снега. Полученные нами ранее экспериментальные данные о теплопроводности глубинной изморози дают величину около 0,10–0,13 Вт/м²·°С [13]. Хотя эти величины несколько больше опытных значений для свежевыпавшего снега, небольшие различия можно отнести за счёт преобразования структуры снега и влияния температуры на его теплопроводность.

Таким образом, в величине коэффициента теплопроводности отражается характерная особенность термических свойств перекристаллизованного снега в процессе его метаморфизма. Эта особенность указывает на развитие снежной толщии по типу разрыхления. В дальнейшем определения коэффициента теплопроводности снега в полевых условиях могут быть использованы при исследовании процессов метаморфизма снежного покрова, а его значения удобно сравнивать с коэффициентом теплопроводности для глубинной изморози, который определяется по формуле, полученной ранее экспериментально: $K_{eff} = 0,64\rho - 0,02$, Вт/м²·°С. Здесь значения плотности снега ρ даны в г/см³.

Данная формула применима и для лежалого свежевыпавшего снега при значениях его плотности более 0,14 г/см³, что также проверено экспериментально. Отметим, что в нашем опыте созданы условия для интенсивной перекристаллизации снега, а продолжительное воздействие отрицательной температуры обуславливает его развитие по типу разрыхления. Подобные условия развития снежного покрова — типичные для обширных территорий России, где идёт умеренное накопление снега, а зимой редко случаются оттепели. Как было отмечено П.А. Шумским [14], процессы перекристаллизации снега препятствуют процессам оседания, создавая жёсткую вертикальную структуру снега. Можно предположить, что конструктивный метаморфизм снега в таких условиях препятствует не только дальнейшему оседанию снега, но и процессам передачи тепла. Развитие снежной толщии

имеет направленность к созданию структуры с большим термическим сопротивлением, т.е. холод так преобразует снежную толщу, что она лучше защищает почву от выхолаживания.

Эти особенности метаморфизма снега справедливы для условий холодной зимы с продолжительными отрицательными температурами воздуха. В Подмоскowie и более южных районах подобная ситуация наблюдается только в холодные зимы с редкими непродолжительными оттепелями. В последние годы это были зимы с 2009 по 2012 г., когда снежная толща развивалась по типу разрыхления. Регулярные полевые измерения на юге Подмоскowie, в Калужской, Тульской и Тверской областях показали, что в этих условиях формируется снежная толща, состоящая из рыхлых слоёв мелкозернистого снега и глубинной изморози. Для снежного покрова расчётный средний коэффициент теплопроводности был равен $0,11-0,12 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$, что соответствует плотности снежного покрова $0,20-0,22 \text{ г/см}^3$. В тёплые зимы в этих регионах плотность снежного покрова обычно выше $0,22 \text{ г/см}^3$ в результате уплотнения снега во время оттепелей. Доля жидких осадков в зимний период составляет в среднем 20%, количество дней с оттепелями достигает 18–20, а в южных районах эти показатели увеличиваются до 30% и 30 дней соответственно [11]. Толщина слоёв свежеснежного покрова в Подмоскowie и на севере Среднерусской возвышенности больше в 2–3 раза, чем на юге, а их плотность оказывается вдвое меньше. Влияние оттепелей проявляется и в средней плотности снежного покрова, которая растёт с севера на юг приблизительно вдвое, а в Белгородской области достигает $0,38 \text{ г/см}^3$. Поэтому теплозащитные свойства снежного покрова значительно ухудшаются с севера на юг.

Ландшафтные различия в снегонакоплении могут быть даже более заметны, чем региональные. Уплотнение снега при оттепелях особенно хорошо проявляется на открытых пространствах. Повышение плотности свежеснежного покрова при оттепелях на полях носит регулярный характер, а к концу зимы различия в средней плотности снега для леса и поля достигают 20–30% (см. таблицу). Эти ландшафтные различия существенно влияют на неравномерное промерзание почвы. Так, в начале марта 2011 г., по нашим наблюдениям, на территории Централь-

но-Чернозёмного заповедника глубина промерзания почвы в лиственном лесу и на лесной опушке составляла около 10 см. Средняя толщина снежного покрова в лесу была равна 45 см, а средняя плотность — $0,20 \text{ г/см}^3$. Снежная толща состояла преимущественно из рыхлого перекристаллизованного снега, а слои свежеснежного и мелкозернистого снега имели толщину 15–20 см. Рядом, на пашне, где снежная толща состояла из уплотнённого смёрзшегося крупнозернистого снега толщиной до 15 см, а свежеснежный снег отсутствовал, глубина промерзания почвы превышала 100 см. Безусловно, значительные различия в глубине промерзания в лесу и на полях определяются и другими факторами: влажностью и составом почв, экспозицией склона, наличием слоя лиственного опада.

Заключение

Для образцов свежеснежного покрова, образованных из осадков разного типа, экспериментально определены значения плотности, размера зёрен и теплопроводности снега. В процессе опытов установлены некоторые расхождения в величине начальной теплопроводности и скорости уплотнения в зависимости от типа осадков. При этом конечные характеристики для всех образцов снега оказались близкими как по плотности, так и по теплопроводности. Этот факт указывает на общий механизм преобразования свежеснежного покрова на начальной стадии метаморфизма независимо от типа твёрдых осадков.

Установлено, что на ранней стадии метаморфизма свежеснежного покрова в течение 2–3 дней быстро увеличивается его теплопроводность, однако после преобразования его структуры в зернистую и появлении признаков конструктивного метаморфизма этот процесс замедляется. При проведении опыта теплопроводность снега стабилизировалась на значении $0,08-0,09 \text{ Вт/м}^\circ\text{С}$, что оказалось значительно меньше теплопроводности свежеснежного покрова, отложившегося во время оттепели при температуре около 0°С . При отсутствии оттепелей в снежном покрове формируются условия для сохранения его теплозащитных свойств. Отметим, что перерывы в снегонакоплении не

ухудшают теплозащитные свойства отложенного снега, так как при отрицательных температурах перекристаллизация существенно не влияет на коэффициент теплопроводности снега.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что свежеснеживший снег из осадков разного типа имеет чрезвычайно низкую теплопроводность. В процессе термоградиентного метаморфизма, несмотря на значительное уплотнение и интенсивный рост кристаллов, свежеснеживший снег длительное время сохраняет свои теплозащитные свойства. Его теплопроводность была равна $0,10 \pm 0,02$ Вт/м^{°С} для всех рассмотренных типов свежеснежившего снега. Результаты исследования позволяют сделать вывод, что преобразования свежеснежившего снега играют важную роль в сохранении теплозащитных свойств снежного покрова в условиях термоградиентного метаморфизма. Это необходимо учитывать при планировании снежной мелиорации и оценке промерзания почв.

Литература

1. *Войтковский К.Ф.* Механические свойства снега. М.: Изд-во Наука, 1977. 126 с.
2. *Коломыц Э.Г.* Кристалломорфологический атлас снега (пособие для снеголавинных станций). Л.: Гидрометеиздат, 1984. 214 с.
3. *Котляков В.М.* Мир снега и льда. М.: Наука, 1994. 287 с.
4. *Куваева Г.М.* О росте кристаллов в снежном покрове // МГИ. 1965. Вып. 11. С. 270–273.
5. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство для описания снежной толщи и снежного покрова). Русское издание // МГИ. 2012. Вып. 2. 80 с.
6. *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.
7. *Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В., Жидков В.А., Чернов Р.А.* Роль снежного покрова в промерзании грунтов // Изв. РАН. Сер. геогр. 2001. № 4. С. 52–57.
8. *Осокин Н.И., Сосновский А.В., Накалов П.Р., Ненашев С.В.* Термическое сопротивление снежного покрова и его влияние на промерзание грунта // Лёд и Снег. 2013. № 1 (121). С. 93–103.
9. *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.
10. *Павлов А.В.* Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 286 с.
11. Средняя полоса Европейской части России / Под ред. И.П. Герасимова. М.: Наука, 1967. 440 с.
12. *Тушинский Г.К., Гуськова Е.Ф., Губарева В.Д.* Перекристаллизация снега и возникновение лавин. М.: Изд-во МГУ, 1953. 116 с.
13. *Чернов Р.А.* Экспериментальное определение теплопроводности глубинной изморози // Лёд и Снег. 2013. № 3 (123). С. 71–77.
14. *Шумский П.А.* Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.
15. *Schneebeli M., Socratov S.A.* Tomography of temperature gradient metamorphism of snow and associated changes in heat conductivity // Hydrological Processes. 2004. V. 18. P. 3655–3665.
16. *Sturm M., Holmgren J., König M., Morris K.* The thermal conductivity of seasonal snow // Journ. of Glaciology. 1997. V. 43. № 143. P. 26–41.