

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА ПОД СНЕЖНЫМ ПОКРОВОМ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА ШПИЦБЕРГЕНЕ

© 2025 г. А. В. Сосновский*, Н. И. Осокин

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: alexandr_sosnovskiy@mail.ru*

Поступила 24.10.2024 г.

После доработки 10.11.2024 г.

Принята к печати 25.12.2024 г.

На основе математического моделирования и численных экспериментов получена зависимость для оценки температуры поверхности грунта под снежным покровом при разной температуре воздуха и толщине снежного покрова.

Ключевые слова: температура поверхности грунта, снежный покров, толщина, плотность снега, температура воздуха, моделирование

DOI: 10.31857/S2076673425010079, EDN: GYXNOY

ВВЕДЕНИЕ

Термический режим почв, грунтов и горных пород имеет важное значение для разных отраслей народного хозяйства. Он влияет на несущую способность мёрзлых грунтов, функционирование хозяйственных объектов, транспортных и других коммуникаций, урожайность озимых культур и многое другое (Stieglitz et al., 2003; Павлов, 2008; Анисимов, Стрелецкий, 2015).

Одно из негативных последствий современного изменения климата — деградация многолетней мерзлоты, которая отрицательно влияет на инфраструктуру территорий её распространения (Доклад..., 2017; Suter et al., 2019; Hjørt et al., 2022). В работе (Второй..., 2014) отмечается, что изменение климата к концу первого десятилетия XXI в. привело к уменьшению несущей способности многолетней мерзлоты по сравнению с 1970-ми годами в среднем на 17%, а в отдельных регионах — до 45%. Опасно деформируются объекты железнодорожной, автомобильной и трубопроводной транспортной инфраструктуры.

Оценка состояния почвы под снегом — важная задача, в частности, для оценки вероятности промерзания или выпревания растений (Перевертин и др., 2022). В работе (Николаев, Скачков, 2012) показано влияние снежного покрова и температурного режима мерзлотных почв на радиальный прирост деревьев Центральной Якутии. Так, при малой высоте снежного покрова происходит сильное

промерзание грунтов в зимний период, что отрицательно сказывается на радиальном приросте деревьев в последующий год.

В работе (Зайкова и др., 2021) дана оценка влияния снежного покрова на формирование температурного режима чернозёма выщелоченного на орошаемых участках. На основании информационно-логического анализа показано, что на формирование температурного режима почвы в зимний период максимальное влияние оказывают плотность и высота снежного покрова. На поверхности почвы доля влияния этих факторов составила 31 и 30% соответственно.

Теплозащитные свойства снежного покрова определяются его термическим сопротивлением — R_s , равным отношению толщины снега h_s к его коэффициенту теплопроводности λ_s . Термическое сопротивление снежного покрова, наряду с температурой воздуха, определяют температурный режим промерзающего основания (Осокин, Сосновский, 2016). Коэффициент теплопроводности снега зависит в основном от его плотности и структурных особенностей (Осокин, Сосновский, 2014).

Для расчёта температурного режима пород применяются разные математические модели (Сосновский, 2006). Однако для их реализации требуются большой спектр входных параметров. При этом не всегда есть возможность измерить температуру грунта в разных ландшафтных условиях, поэтому важной задачей является оценка температуры

грунта по известной толщине снега и температуре воздуха, которые представляют измеряемые параметры на каждой метеостанции.

Цель работы — оценка температуры поверхности грунта по данным о толщине снега и температуре воздуха. Для этого на основании математического моделирования проведены расчёты температуры поверхности грунта при разных значениях толщины снега, температуры воздуха и других параметров.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для расчётов промерзания—протаивания грунта применялась математическая модель, представленная в работах (Сосновский, 2006; Осокин, Сосновский, 2015). Она позволяет учесть реальную изменчивость метеорологических параметров, динамику снегонакопления; изменчивость теплофизических характеристик снега и грунта. Распределение температуры в мёрзлом слое горной породы рассчитывалась с учётом зависимости её теплоёмкости и теплопроводности от температуры и фазового состава (влажность/льדיстость). Движение границ мёрзлого и талого слоя грунта определялось из условия Стефана на фазовой границе. Деформация грунта и миграция влаги не учитывалась. На поверхности грунта (снежного покрова) задавалось граничное условие 3-го рода с учётом потоков тепла за счёт конвективного теплообмена, испарения, эффективного излучения и солнечной радиации, на нижней поверхности вводился геотермический поток тепла (Осокин, Сосновский, 2015). Распределение температуры в снежном покрове, в мёрзлой и талой зонах грунта описывается уравнением теплопроводности Фурье с переменными во времени теплофизическими параметрами снега и зависимостью соответствующих параметров грунта от его температуры и влажности. На границе контакта снег—грунт принимается граничное условие, задающее равенство температур и потоков тепла.

Зависимость доли незамёрзшей воды в грунте w_w принималась по графикам, приведённым в работе (Вотьяков, 1975), аппроксимируемых для суглинка экспоненциальной зависимостью вида $w_w = A_1 \cdot \exp(B_1(T - 273))$ при значениях коэффициентов $A_1 = 0.0834$ и $B_1 = 0.0476$. Система уравнений замыкается граничными условиями на поверхности и подстилающем основании, начальным распределением температуры и влажности в талом грунте, динамикой снегонакопления, заданием изменчивости теплофизических параметров снега.

Численное решение системы уравнений, описывающей теплообмен в системе атмосфера — снежный покров — подстилающая порода, выполнялось методом конечных разностей с применением неявной разностной схемы для нелинейных задач тепло-влажносто-проводности с переменными

коэффициентами. Задача промерзания решалась методом ловли фронта промерзания в узел фиксированной пространственной сетки с переменным шагом по времени, определяемым из условия перемещения границы фазового перехода на один узел сетки и с переходом при необходимости на постоянный шаг по времени и переменный по пространственной переменной.

На каждом временном шаге рассчитывался рост высоты снежного покрова, плотность и теплопроводность снега, теплофизические параметры мёрзлого и талого грунта и составляющие внешнего тепло— и массообмена. При расчётах пространственный шаг по снежному покрову и грунту на глубине до 10 м принят равным 2 см, а на глубине 10–25 м шаг 1 м. При этом если величина очередного шага по времени превышала предыдущее значение более чем на 10%, то вводился фиксированный временной шаг и находилось промежуточное положение фронта замерзания между узлами пространственной сетки, от которого определялось дальнейшее продвижение фронта промерзания. Применялась фиксированная пространственная сетка по снежному покрову, рост узлов которой зависел от временного шага продвижения фронта промерзания грунта и динамики высоты снежного покрова.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЁТОВ

При расчётах применялся коэффициент эффективной теплопроводности снега в зависимости от его плотности по формуле

$$\lambda_s = 9.165 \cdot 10^{-2} - 3.814 \cdot 10^{-4} \rho_s + 2.905 \cdot 10^{-6} \rho_s^2,$$

полученной путём обработки более 20 известных из литературы эмпирических зависимостей (Осокин, Сосновский, 2015).

Основные расчёты проведены для суглинка плотностью 1600 кг/м³ и влажностью 20%. Коэффициенты теплопроводности мёрзлого — λ_f и талого — λ_{th} суглинка принимались равными 1.51 и 1.33 Вт/(м × °С) соответственно, а объёмная теплоёмкость 2.14 ж/(м³ × °С)10⁶ (СНиП 2.02.04—88, 1997). Количество незамёрзшей воды на границе мёрзлой и талой зоны суглинка принималась 11%.

Начальная температура грунта определялась путём предварительных калибровочных расчётов. Температура выпадающего снега полагается равной температуре воздуха, скорость ветра принимается 4 м/с, влажность воздуха 70% и облачность — 0.6. При расчётах задержка времени начала снегонакопления по отношению к моменту установления отрицательных среднесуточных температур воздуха принималась $\tau_{s0} = 5$ суток.

Альbedo снежной поверхности принято равным 0.8 для сухого снега, 0.5 для влажного снега (в период таяния) и 0.2 для грунта. Солнечная радиация

задавалась по средним многолетним значениям. В условиях полярной ночи на Шпицбергене солнечная радиация в календарные зимние месяцы принималась равной нулю. Динамика высоты снежного покрова от времени принималась по линейной зависимости.

При расчёте термического режима приповерхностного слоя грунта важными параметрами являются высота и плотность снега. Известно много зависимостей плотности снега от его толщины. В работе (Основы ..., 2017) рассмотрены такие зависимости, применяемые в разных странах. Ряд из приведённых зависимостей связывает плотность снежного покрова не только с его высотой, но и с температурой воздуха и скоростью ветра. Исключая экстремальные значения плотности снега, эти зависимости дают средние значения плотности снега около 200, 250 и 290 кг/м³ при толщине снега 0,3, 0,5 и 1 м, соответственно. В работе (Осокин, Сосновский, 2014) приведены карты распределения высоты и плотности снежного покрова на равнинной территории России за периоды 1966–2000 и 2001–2010 гг. за разные месяцы. В марте 2001–2010 гг. диапазон изменения плотности составляет 140–330 кг/м³. Наименьшие значения плотности – до 200 и 170 кг/м³ приурочены соответственно к Якутии и Забайкалью, где высота снежного покрова в основном не превышает 0,4 и 0,25 м. В центральных районах Европейской территории России плотность снега составляет 230–270 кг/м³ при толщине снега от 0,5 до 0,75 м. На севере Западной Сибири плотность снега достигает 300 кг/м³ при снежном покрове толщиной до 1 м. При этом максимальные значения высоты снежного покрова достигают 120 см и значения плотности при максимальной толщине снега могут превысить 380 кг/м³.

Для расчётов приняты пары значений толщина/плотность снега: 0,3/200; 0,5/250; 0,75/270 и 1/290 м/(кг/м³). Для этих значений термическое сопротивление снежной толщи, рассчитанное по формуле $R_s = \lambda_s / h_s$, равно 2,3, 2,8, 3,5 и 4,4 м²К/Вт соответственно. Таким образом, при увеличении толщины снега в 3,3 раза (от 0,3 до 1 м) величина R_s растёт только в 1,9 раз. В работе (Осокин и др., 2013) отмечается, что рост плотности снега в полтора раза с 200 до 300 кг/м³ (например, за счёт механического воздействия) снижает толщину снежного покрова в 1,5 раза и увеличивает коэффициент теплопроводности в 1,9 раз. В итоге термическое сопротивление снежного покрова снижается в 2,8 раза.

КАЛИБРОВОЧНЫЕ РАСЧЁТЫ

Для проверки работоспособности математической модели при принятых значениях входящих параметров были проведены калибровочные расчёты

по данным измерений глубины промерзания грунта в районе метеостанции Баренцбург (Западный Шпицберген) в 2022/23 г. Длительность холодного периода в 2022/23 г. составила 240 суток, средняя температура воздуха за период с положительными температурами 2022 г. составила $t_a = 5,3$ °С, и за период с отрицательными температурами $t_w = -6$ °С. Динамика температуры воздуха за периоды с положительной и отрицательной температурой приняты по синусоиде с максимальным $t_s \pi/2$ и минимальным $t_w \pi/2$ значением температуры воздуха.

Для получения температурного профиля в грунте и оценки скорости его промерзания в сентябре 2022 г. были установлены и сняты в сентябре 2023 г. термохроны. Термохроны измеряли температуру грунта на его поверхности и на глубинах 10, 30, 50 и 70 см. Скорость глубины промерзания определяли по времени перехода температуры грунта в этих точках через 0 °С – от положительных к отрицательным значениям температуры. Одна из точек измерений (точка *I*) была расположена в 100 м на юго-запад от метеоплощадки метеостанции Баренцбург на высоте 70 м над ур. моря. Температуру грунта измеряли температурными логгерами iButtons DS1922L-F5/DS1925L-F5. Разрешение измерений составляет 0,0625 °С. Интервал измерения температуры грунта составлял 2 часа.

Для оценки толщины снега в точке *I* рассмотрим динамику толщины снега на метеостанции Баренцбург в период таяния снежного покрова весной 2023 г. На момент наступления положительных температур воздуха 21.05.2023 толщина снега на метеостанции, расположенной в 100 м от точки *I* составляла 157 см. При этом наибольшая толщина снежного покрова в течение нескольких зимних дней достигала 163 см. Положительная температура поверхности грунта в точке *I*, когда весь снег растаял, приходится на 9 июня 2023 г. К этому моменту толщина снега на метеостанции составляла 56 см. Таким образом, предполагая, что интенсивность таяния на метеостанции и в точке *I* отличается незначительно, получим, что к 9 июня на метеостанции растаял 101 см снега, поэтому на момент начала таяния толщина снега в точке *I* составляла 101 см, а максимальная высота снежного покрова в этой точке достигала 107 см. Предположим, что динамика снегонакопления – отношение толщины снежного покрова к его максимальному значению на метеостанции и в точке *I* одинакова, получим, что толщина снега в этой точке в холодный период 2022/23 г. будет составлять $107/163 = 66\%$ от толщины снега на метеостанции. Отметим, что в холодный период 2021/22 г. максимальная высота снежного покрова на метеоплощадке составляла 148 см, а в точке *I* – 94 см, что составляет 64% от значения на метеоплощадке. Близкие значения отношения толщины снежного покрова в точке *I* и на метеостанции Баренцбург за холодный период 2021/22

и 2022/23 гг. — 64 и 66%, соответственно, показывают на схожий режим снегонакопления в этой точке. В условиях Западного Шпицбергена довольно часто наблюдаются оттепели, что влияет на рост плотности снега. Зависимость плотности снежного покрова от его толщины до начала снеготаяния принималось в виде $\rho_s = 250 * h_s + 150$, кг/м³, h_s — в метрах. Максимальная плотность снега ограничивалось значением 400 кг/м³. В условиях частых оттепелей на Западном Шпицбергене и сильных ветров плотность снежного покрова по глубине можно принять постоянной.

Результаты расчётов глубины и динамики промерзания грунта показали удовлетворительное совпадение с данными измерений (рис. 1). Время промерзания грунта до глубины 70 см в точке 1 по данным измерений и расчётов составила 46 сут.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки температуры поверхности грунта под снегом проведены расчёты при разных соотношениях температуры воздуха, толщины и плотности снега. На рис. 2 представлены результаты расчётов средней температуры поверхности грунта и её отношение к температуре воздуха при разных значениях толщины и плотности снега. Расчёты проводились при постоянных значениях толщины и плотности снега, начиная с 60-х суток. В первые два месяца толщина снега изменялась от нуля до 10–25 см, а температура воздуха от 0 до –10 °С. Затем температура воздуха выдерживалась постоянной в течение 45 суток равной –10, –20, –30 и –40 °С при постоянной толщине и плотности снега. В течение каждого из этих промежутков температура поверхности грунта немного понижалась. Для анализа принималась средняя температура

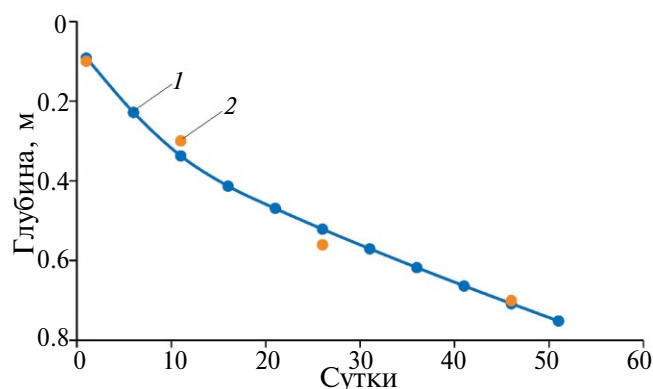


Рис. 1. Глубина промерзания грунта по данным расчётов и измерений: 1 — данные расчётов; 2 — данные измерений

Fig. 1. The depth of soil freezing according to calculations and measurements: 1 — calculation data; 2 — measurement data

поверхности грунта за каждый 45-суточный период. При этом для снега толщиной 0.3 м и плотностью 200 кг/м³ коэффициент вариации составил 1.7 и 9.8% при температуре воздуха –10 и –40 °С соответственно. Для снега толщиной 1 м и плотностью 290 кг/м³ коэффициент вариации при этих температурах воздуха составил 1.9 и 7.2%. При этих значениях коэффициента вариации степень рассеивания данных считается незначительной.

Результаты расчётов температуры поверхности грунта T_g и её отношение к температуре воздуха T_a при разных значениях температуры воздуха и толщины снега представлены на рис. 2. Из графика (см. рис. 2, а) видно, что при температуре воздуха –20 °С температура поверхности грунта составляла –5.9 и –8.5 °С при толщине/плотности снега 1.0/290 и 0.3/200 м/(кг/м³) соответственно. При температуре воздуха –40 °С эти значения составили –11.2 и –16.6 °С соответственно.

Рассмотрим отношение средней температуры поверхности грунта к температуре воздуха — $r = T_g / T_a$. Из рис. 2, б видно, что при температурах воздуха T_a ниже –20 °С отношение температуры

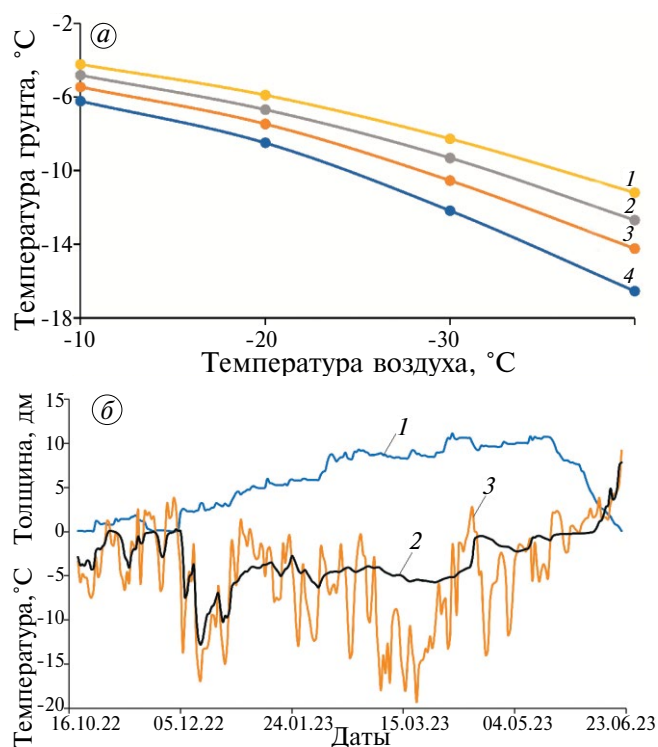


Рис. 2. Средняя температура поверхности грунта (а) и её отношение к температуре воздуха (б) при толщине/плотности снега: 1 — 1/290; 2 — 0.75/270; 3 — 0.5/250; 4 — 0.3/200 м/(кг/м³)

Fig. 2. The average temperature of the soil surface (а) and its ratio to air temperature (б) at the thickness / density of snow: 1 — 1/290; 2 — 0.75/270; 3 — 0.5/250; 4 — 0.3/200 м/(кг/м³)

поверхности грунта к температуре воздуха мало изменяется. Так, для толщины снега (при соответствующей плотности) от 0.3 до 0.7 м отклонение величины r от среднего значения составило 2–3% и 7% при толщине снега 1 м. Это позволило получить зависимость величины r от толщины снега (рис. 3) в виде

$$r = -0.162 \ln(h_s) + 0.435, R^2 = 0.9966$$

при значениях $T_a = -10^\circ\text{C}$

$$\text{и } r = -0.107 \ln(h_s) + 0.286, R^2 = 0.9977$$

при $T_a = -20 \dots -40^\circ\text{C}$,

при этом коэффициент детерминации R^2 принимает достаточно высокие значения. При толщине снега 1 м величина r равна 0.435 и 0.286 при температуре воздуха -10 и $-20 \dots -40^\circ\text{C}$ соответственно.

Отмечено, что, согласно данным работы (Шерстюков, 2008), изменения среднегодовой температуры почвогрунтов в Сибири (на большей части территории которой зимние температуры воздуха опускаются ниже -20°C) в большей мере определяются изменениями толщины снежного покрова (до 60%), а не изменениями температуры воздуха (до 10%).

Зная величину r , можно получить зависимость для разности $-d$ между температурой поверхности почвы под снегом и температурой воздуха от высоты снежного покрова и температуры воздуха в виде:

$$d = T_a (-0.107 \ln(h_s) - 0.714), ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

при $T_a = -20 \dots -40^\circ\text{C}$, h в м,

$$d = T_a (-0.162 \ln(h_s) - 0.565), ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

при $T_a = -10^\circ\text{C}$.

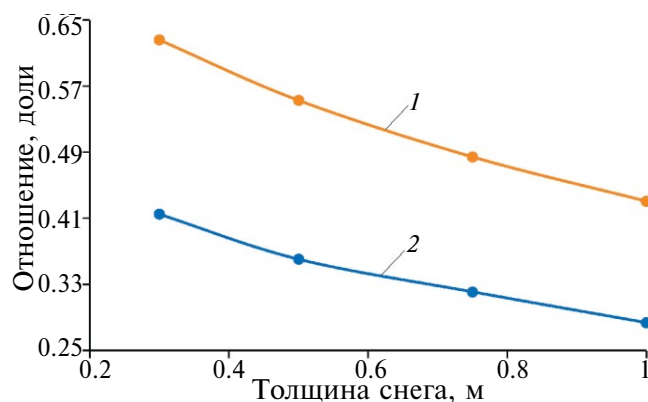


Рис. 3. Отношение температуры поверхности грунта к температуре воздуха при значениях последней: 1 – -10°C ; 2 – от -20 до -40°C

Fig. 3. The ratio of the soil surface temperature to the air temperature at the values of the latter: 1 – -10°C ; 2 – -20 to -40°C

В работе (Шерстюков, Анисимов, 2018), исходя из предположений, что тепловые потоки зимой и летом равны по модулю, так как годовой баланс тепла почвы равен нулю и водопроницаемость разных горизонтов почвы летом и зимой одинакова, была получена зависимость разности между температурой поверхности почвы под снегом и температурой воздуха d от высоты снежного покрова H_s в виде $d = 2.1671 \ln(H_s - 5) + 0.7679$, где H_s в см, и построена карта пространственного распределения величины d за 1984–2013 гг. На территории России величина d изменяется от 0.1 на юго-западе до 20°C в отдельных районах Якутии. При этом отмечается, что для слоя снега 7 см среднее значение d составляет около 2.3°C , а при высоте снежного покрова 50 см средняя разность между температурой поверхности почвы и температурой воздуха достигает 9.0°C .

Расчёты по формуле (1) показывают, что при высоте снежного покрова 0.5 м и температуре воздуха -20°C величина $d = 12.8^\circ\text{C}$, а по формуле (2) при $T_a = -10^\circ\text{C}$ получим $d = 4.5^\circ\text{C}$. Тогда при $T_a = -15.5^\circ\text{C}$ получена разность между температурой поверхности почвы и температурой воздуха $d \approx 9.1^\circ\text{C}$. Из рис. 3 видно, что рост толщины снега в два раза от 0.5 м до 1 м приводит к снижению величины r приблизительно на четверть, как для $T_a = -20 \dots -40^\circ\text{C}$, так и $T_a = -10^\circ\text{C}$.

Рассмотрим изменчивость толщины снежного покрова, температуры воздуха и поверхности грунта в точке 1 в районе метеостанции в пос. Баренцбург (рис. 4). При толщине снега до 0.3–0.5 м температура поверхности грунта в целом повторяет изменчивость температуры воздуха. При толщине снега более 0.5 м с января до начала апреля 2023 г. колебания отрицательной температуры воздуха на 20°C приводят к колебанию температуры поверхности грунта только на 3°C (см. рис. 4). С 15 по 19 февраля температура воздуха понизилась

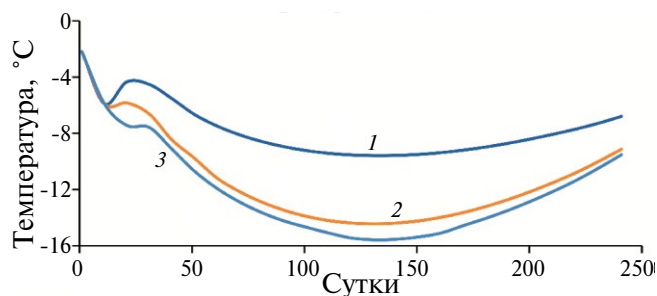


Рис. 4. Толщина снега (1), температура поверхности грунта (2) и воздуха (3) в районе метеостанции Баренцбург

Fig. 4. Snow thickness (1), ground surface temperature (2) and air temperature (3) in the area of the Barentsburg weather station

от -1.4 до -14.3 °C, при этом температура поверхности грунта понизилась от -4.3 до -4.5 °C при толщине снега 84 см. Это показывает небольшое влияние краткосрочного изменения температуры воздуха на температуру поверхности грунта при толщине снежного покрова более 0.5 м. Однако это не касается оттепели. Так, к 15 апреля температура воздуха повысилась до 2.8 °C при толщине снега 1 м. В результате за трое суток температура поверхности грунта увеличилась на 3 °C.

При более продолжительном понижении температуры воздуха с 2 по 28 марта 2023 г. в среднем на 10 °C, температура поверхности грунта уменьшилась на 1.3 °C при толщине снега 86 см. С 20 апреля по 3 мая температура воздуха понизилась на 5.9 °C, от средней температуры -1.7 °C (за период с 6 по 19 апреля) до -7.6 °C за последующие две недели. При этом температура поверхности грунта понизилась от -0.5 до -2 °C при толщине снега 96 см.

Из рис. 4 видно, что с 4 по 28 марта 2023 г. средняя температура воздуха составила -13.6 °C, толщина снега 86 см и средняя температура поверхности грунта -5.1 °C при коэффициенте вариации 9.2%. При этих значениях температуры воздуха и толщины снега (см. рис. 2, а) путём линейной аппроксимации получим расчётную температуру поверхности грунта равной -5.2 °C.

ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА

Проведённые расчёты выполнены при фиксированном соотношении высоты снежного покрова и плотности снега. Однако если известна плотность снега, то можно уточнить температуру поверхности грунта под снежным покровом. Для этого проведена серия расчётов для определения влияния плотности снега на температуру поверхности грунта.

Представленные результаты расчётов температуры поверхности грунта (рис. 5) получены при средней температуре воздуха за холодный период -20 °C (минимальная -31.4 °C), плотности снега 200 и 300 кг/м³ и максимальной толщине снега 0.5 и 1 м. Легко заметить, что при максимальной толщине снега 1 м рост плотности с 200 до 300 кг/м³, кривые 1 и 2 (см. рис. 5), приводит к понижению температуры поверхности грунта на 3–5 °C, в среднем на 3.8 °C с момента установления снежного покрова. Таким образом, рост плотности снега на 20 кг/м³ приводит к снижению температуры поверхности грунта приблизительно на 0.75 °C. Немного более значительное понижение температуры поверхности грунта, в среднем на 4.7 °C, происходит при снижении толщины снега в два раза, с 1 до 0.5 м.

Также оценку температуры поверхности грунта можно уточнить, если известна летняя температура

воздуха и влажность грунта. Рассмотрим влияние летней температуры воздуха на температуру поверхности грунта — T_g . Расчёты были проведены для снега максимальной толщины 0.5 м, плотностью 250 кг/м³, при средней температуре воздуха за холодный период -15 °C (минимальной -23.4 °C) при средней положительной температуре воздуха 5, 10 и 15 °C в период с 241 до 365 суток от начала наступления отрицательных температур воздуха. Максимальная температура воздуха за этот период составляла 7.5, 15.6 и 23.4 °C. При этом средняя температура поверхности грунта в летний период составила 2.8, 7.7 и 12.5 °C, а максимальная 4.2, 11.5 и 18.7 °C, соответственно. При росте средней летней температуры воздуха в два раза — от 5 до 10 °C средняя температура поверхности грунта в зимний период растёт на 0.84 °C, а с ростом в полтора раза — от 10 до 15 °C увеличивается на 0.36 °C. При этом минимальная температура грунта составила -13.1 , -12.0 и -11.2 °C, соответственно. Поэтому при значительном повышении летней температуры воздуха от 5 до 15 °C растёт на 1.2 °C и температура поверхности грунта под снегом из-за роста температуры грунта в летний период.

Для снега толщиной 0.5 м, плотностью 250 кг/м³ и температурах воздуха -10 , -20 , -30 и -40 °C были проведены дополнительные расчёты при влажности грунта 15%. В результате было получено снижение температуры поверхности грунта в среднем на 0.6 °C в пересчёте на 1% влажности грунта по сравнению с его влажностью 20%.

Оценим температуру поверхности грунта влажностью 18% при толщине снежного покрова 0.5 м, плотности снега 300 кг/м³, зимней температуре

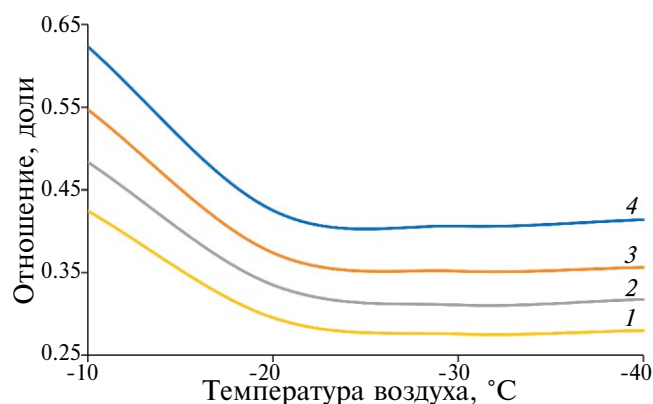


Рис. 5. Температура поверхности грунта при средней температуре воздуха за холодный период -20 °C при плотности снега 1, 3 — 200 кг/м³; 2 — 300 кг/м³; при толщине снега: 1, 2 — 1 м; 3 — 0.5 м

Fig. 5. Ground surface temperature at an average air temperature during the cold period -20 °C at a snow density of 1, 3 — 200 kg/m³; 2 — 300 kg/m³; at snow thickness: 1 and 2 — 1 m; 3 — 0.5 m

атмосферного воздуха $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ и средней летней температуре воздуха $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. По формулам (1) и (2) получим, что при высоте снежного покрова 0.5 м , плотности снега 250 кг/м^3 и температуре воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ величина $d = 12.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а по формуле (2) при $T_a = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ получим $d = 4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тогда при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ получим разность между температурой поверхности почвы и температурой воздуха $d \approx 8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуру поверхности почвы $T_g \approx -6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Так как плотность снега больше принятой при получении формул (1) и (2) на 50 кг/м^3 , то величина T_g будет на $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже и составит $-8.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. При летней температуре воздуха $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит рост температуры поверхности почвы на $0.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ и тогда $T_g \approx -7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а учёт снижения влажности грунта на 2% понизит температуру поверхности грунта на $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ и в результате получим оценку температуры поверхности грунта $T_g \approx -8.6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Температура грунта в зимний период — важный параметр для оценки функционирования природных и технических систем. Снежный покров, как и температура воздуха, влияют на температуру грунта. При этом не всегда возможно измерение температуры грунта в течение холодного времени года. Поэтому разработка простой и доступной методики определения температуры грунта, в частности температуры его поверхности, по толщине снежного покрова и температуре воздуха представляет актуальную задачу. Для её решения применялось математическое моделирование и численные эксперименты по определению температурного режима грунта под снежным покровом при разных значениях толщины и плотности снега и температуры воздуха. Математическая модель тестировалась по данным измерений динамики промерзания грунта в районе метеостанции Баренцбург на Западном Шпицбергене. Был проведён анализ соотношения плотности снега и его толщины и получены наиболее распространённые пары значений этих величин, что позволило сократить объём вычислений.

Результаты численных экспериментов позволили определить температуру поверхности грунта под снегом и рассчитать отношение температуры поверхности грунта к температуре воздуха. При изменении температуры воздуха в диапазоне от -20 до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ это отношение практически не зависит от температуры воздуха, а только от параметров снежного покрова. В результате получены зависимости для разности между температурой поверхности грунта под снегом и температурой воздуха от высоты снежного покрова и температуры воздуха. Дана оценка влияния плотности снега, положительной температуры воздуха и влажности грунта на температуру поверхности грунта. Проведена

калибровка проведенных расчётов температуры поверхности грунта по данным измерений на Западном Шпицбергене.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы Госзадания Института географии РАН FMWS-2024-0004. Сбор и анализ материалов по Шпицбергену проводился по программе FMWS-2024-0013.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0004. The collection and analysis of materials for Spitsbergen was carried out under the Program FMWS-2024-0013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов О.А., Стрелецкий Д.А. Геокриологические риски при таянии многолетнемерзлых грунтов // Арктика XXI век. Естественные науки. 2015. № 2 (3). С. 60–74.
- Вотьяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск: Наука, 1975. 176 с.
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М.: Изд-во Росгидромета, 2014. 58 с.
- Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. СПб.: Климатический центр Росгидромета, 2017. 106 с.
- Зайкова Н.И., Шишкин А.В., Дёмина И.В. Оценка влияния снежного покрова на формирование температурного режима чернозема выщелоченного орошаемых участков // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. 2021. № 5 (199). С. 36–41.
- Николаев А.Н., Скачков Ю.Б. Влияние снежного покрова и температурного режима мерзлотных почв на радиальный прирост деревьев Центральной Якутии // Журнал Сибирского федерального ун-та. Сер. Биология. 2012. Т. 5. № 1. С. 43–51.
- Основы проектирования строительных конструкций. Определение снеговых нагрузок на покрытия (ГОСТ Р ИСО 4355–2016). М.: Стандартинформ, 2017. 37 с.
- 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. Т. 53. № 1. С. 93–103. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-93-103>
- Осокин Н.И., Сосновский А.В. Пространственная и временная изменчивость толщины и плотности снежного покрова на территории России // Лёд и Снег. 2014. Т. 4 (128). С. 72–80. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-4-72-80>
- Осокин Н.И., Сосновский А.В. Экспериментальные исследования коэффициента эффективной тепло-

- проводности снежного покрова на Западном Шпицбергене // Лёд и Снег. 2014. Т. 54 (3). С. 50–58. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-3-50-58>
- Осокин Н.И., Сосновский А.В. Влияние динамики температуры воздуха и высоты снежного покрова на промерзание грунта. // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 1. С. 99–105. <http://www.izdatgeo.ru/pdf/krio/2015-1/99.pdf>
- Осокин Н.И., Сосновский А.В. Влияние термического сопротивления снежного покрова на устойчивость многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 3. С. 105–112. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3\(105-112\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3(105-112))
- Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Гео, 2008. 229 с.
- Перевертин К.А., Белолюбцев А.И., Дронова Е.А., Асаяк И.Ф., Кузнецов И.А., Мазиров М.А., Васильев Т.А. Влияние режима снежного покрова на агрономические риски развития розовой снежной плесени. Лёд и Снег. 2022; 62 (1): 75–80. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010117>
- СНиП 2.02.04–88. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. М.: Изд-во ГУП ЦПП, 1997. 52 с.
- Сосновский А.В. Математическое моделирование влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 3. С. 83–88.
- Шерстюков А.Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России // Криосфера Земли. 2008. Т. XII. № 1. С. 79–87.
- Шерстюков А.Б., Анисимов О.А. Оценка влияния снежного покрова на температуру поверхности почвы по данным наблюдений // Метеорология и гидрология. 2018. № 2. С. 17–25.
- Hjort J., Streletskiy D., Dore G., Wu Q., Bjella K., Luoto M. Impacts of permafrost degradation on infrastructure // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. V. 3. № 1. P. 24–38. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00247-8>
- Stieglitz M., Déry S.J., Romanovsky V.E., Osterkamp T.E. The role of snow cover in the warming of arctic permafrost // Geophys. Research Letters. 2003. 30 (13). P. 1721–1724.
- Suter L., Streletskiy D., Shiklomanov N. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic // Polar Geography. 2019. V. 42. P. 267–286.

Citation: Osokin N.I., Sosnovsky A.V. Approach to the assessment of ground surface temperature under snow cover based on measurements in Svalbard. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (1): 93–102. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425010079

Approach to the assessment of ground surface temperature under snow cover based on measurements in Svalbard

© 2025 A. V. Sosnovsky[#], N. I. Osokin

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]*e-mail: alexandr_sosnovskiy@mail.ru*

Received October 24, 2024; revised November 10, 2024; accepted December 25, 2024

Ground temperature in winter is one of important parameters for evaluating the functioning of natural and technical systems. This temperature is formed under the influence of two factors —the air temperature and snow cover properties. At the same time, it is not always possible to measure the temperature of the ground during the cold season. A simple and easily available method has been developed to estimate the surface temperature from thickness of the snow cover and the air temperature. Based on mathematical modeling, numerical experiments were carried out to determine the temperature regime of the ground under the snow cover using different values of snow thickness, the snow density and the air temperature. The mathematical model was tested against data of measurements of the dynamics of ground freezing in the area of the Barentsburg weather station in Western Svalbard. The ratio of snow density and its thickness was analyzed and the most common pairs of values of these parameters for snow thickness/density were obtained: 1/290; 0.75/270; 0.5/250; 0.3/200 m/(kg/m³). The results of numerical experiments made it possible to determine the temperature of the ground under snow and to calculate the relationship between the air and the ground temperatures. It was found that when the air temperature changes within the range from –20 to –40 °C, this ratio practically does not depend on the air temperature, but only on the parameters of the snow cover.

With a snow thickness of 1 m, the ratio is 0.435 and 0.286 at air temperatures of -10°C and $-20 \dots -40^{\circ}\text{C}$, respectively. As a result, dependencies for calculating the difference between the temperature of the ground under snow and air temperature on the height of the snow cover and atmospheric air temperature have been obtained. Calculations have shown that this difference is 12.8 and 4.5°C with a snow cover height of 0.5 m and an air temperature of -20 and -10°C , respectively. Influence of snow density, soil moisture and the summer air temperature upon the ground surface temperature was estimated. The calculations of ground surface temperature were verified using measured data from Western Svalbard.

Keywords: ground surface temperature, snow cover, thickness, snow density, air temperature, modeling

REFERENCES

- Anisimov O.A., Streletsy D.A. Geocryological risks in the melting of permafrost soils. *Arktika XXI vek. Estestvennye nauki*. Arctic twenty-first century. Natural Sciences. 2015, 2 (3): 60–74 [In Russian].
- Votyakov I.N. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva merzlih i ottavayuschih gruntov Yakutii* Physico-mechanical properties of frozen and thawing soils of Yakutia. Novosibirsk: Nauka, 1975: 176 p. [In Russian].
- Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General Summary. Moscow: Roshydromet, 2014: 58 p. [In Russian].
- Otchet o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Report on climate risks on the territory of the Russian Federation. Saint Petersburg: Climatic Center of Roshydromet, 2017: 106 p. [In Russian].
- Zaykova N.I., Shishkin A.V., Demina I.V. The evaluation of the influence of snow cover on the temperature regime formation of leached chernozem in irrigated areas. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. Bulletin of the Altai State Agrarian University. 2021, 199 (5): 36–41 [In Russian].
- Nikolaev A.N., Skachkov Yu.B. Influence of snow cover and temperature regime of permafrost soils on the radial growth of trees in Central Yakutia. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Biologiya*. Journ. of the Siberian Federal University. Series: Biology. 2012, 5 (1): 43–51 [In Russian].
- Osnovi proektirovaniya stroitel'nykh konstruktsii. Opredelenie snegovih nagruzok na pokrytiya (GOST R ISO 4355–2016). Bases for design of structures. Determination of snow loads on roofs (ISO 4355:2016, IDT). Moscow: Standardinform, 2017: 37 p. [In Russian].
- Osokin N.I., Sosnovsky A.V., Nakalov P.R., Nenashev S.V. Thermal resistance of snow cover and its effect on the ground freezing. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2013, 53 (1): 93–103 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-93-103>
- Osokin N.I., Sosnovsky A.V. Spatial and temporal variability of depth and density of the snow cover in Russia. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 54 (4): 72–80 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-4-72-80>
- Osokin N.I., Sosnovsky A.V. Field investigation of efficient thermal conductivity of snow cover on Spitsbergen. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 54 (3): 50–58 [In Russian]. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-3-50-58>
- Osokin N.I., Sosnovskiy A.V. Influence of temperature and dynamics of snow cover on the ground freezing. *Kriosfera Zemli*. Earth Cryosphere. 2015, 19 (1): 99–105. Retrieved from: <http://www.izdatgeo.ru/pdf/krio/2015-1/99.pdf> [In Russian].
- Osokin N.I., Sosnovskiy A.V. Influence of snow cover thermal resistance on permafrost stability. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth. 2016, 20 (3): 105–112. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3\(105-112\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2016-3(105-112)) [In Russian].
- Pavlov A.V. *Monitoring kriolitozony*. Monitoring of cryolithozone. Novosibirsk: Geo, 2008: 229 p. [In Russian].
- Perevertin K.A., Belolyubcev A.I., Dronova E.A., Asauliyak I.F., Kuznetsov I.A., Mazirov M.A., Vasiliev T.A. Impact of changes in snow cover regime on agronomic risks causing pink snow mold. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2022, 62 (1): 75–80. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010117> [In Russian].
- Building Code. SNiP 2.02.04–88. *Osnovaniya i fundamente na vechnomerzlykh gruntah*. Basements and Foundations in Permafrost. Moscow, State Unitary Enterprise “Center for Design products in Construction”, 1997: 52 p. [In Russian].
- Sosnovsky A.V. Mathematical modelling of the influence of snow cover thickness on degradation of permafrost at climate warming. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth. 2006, 10 (3): 83–88 [In Russian].
- Sherstyukov A.B. Correlation of soil temperature with air temperature and snow cover depth in Russia. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth. 2008, 12 (1): 79–87 [In Russian].

- Sherstiukov A.B., Anisimov O.A.* Assessment of the snow cover effect on soil surface temperature from observational data Russian. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2018, 2: 17–25 [In Russian].
- Hjort J., Streletskiy D., Dore G., Wu Q., Bjella K., Luoto M.* Impacts of permafrost degradation on infrastructure. *Nature Reviews Earth & Environment*. 2022, 3 (1): 24–38. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00247-8>
- Stieglitz M., Déry S.J., Romanovsky V.E., Osterkamp T.E.* The role of snow cover in the warming of arctic permafrost. *Geophysical Research Letters*. 2003, 30 (13): 1721–1724.
- Suter L., Streletskiy D., Shiklomanov N.* Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. *Polar Geography*. 2019, 42: 267–286.