

УДК 551.578.46+551.345+631.436

Термическое сопротивление снежного покрова и его влияние на промерзание грунта

© 2013 г. Н.И. Осокин, А.В. Сосновский, П.Р. Накалов, С.В. Ненашев

Институт географии РАН, Москва

osokinn@mail.ru

Статья принята к печати 24 декабря 2012 г.

Критическая толщина снежного покрова, промерзание грунта, термическое сопротивление.
Critical thickness of a snow cover, ground freezing, thermal resistance.

Рассмотрена пространственно-временная изменчивость термического сопротивления снежного покрова для ряда районов Красноярского края и Якутии. Проведена корреляция глубины промерзания грунта с толщиной снежного покрова и его термическим сопротивлением. На основе математического моделирования дана оценка влияния параметров снежного покрова и грунта на глубину промерзания. Рассчитана критическая толщина снежного покрова, при превышении которой образуется несливающаяся мерзлота в сезонноталом грунте. Рассмотрены возможности и эффективность регулирования термического сопротивления снежного покрова для снижения отрицательных последствий потепления климата на деградацию многолетнемёрзлых грунтов.

Введение

Деградация многолетней мерзлоты в результате потепления климата снижает несущую способность свайных фундаментов, приводит к деформации опор, потере их устойчивости и, как следствие, к многочисленным авариям и чрезвычайным ситуациям [22]. Началом текущего потепления считают середину 1960-х годов. В работах [2, 7] отмечается, что для севера России потепление оценивается в 0,2–2,5 °С за 1965–1995 гг. В этот период в условиях морского климата количество осадков увеличилось, а в условиях континентального – уменьшилось. Поэтому в ряде районов деградация криолитозоны объясняется в том числе и ростом толщины снежного покрова [17]. По данным метеонаблюдений, тренды повышения температуры воздуха за 1960–1995 гг. для севера Западной Сибири и Якутии составляют порядка 0,06 °С/год, а для Северо-Востока России и севера её европейской части эти показатели в 2–3 раза ниже.

Результаты, близкие к наблюдаемым, получены для севера Западной Сибири и Якутии и по отдельным глобальным климатическим моделям потепления климата. Прогноз изменения климата по этим моделям для первой половины XXI в. дан в работе [2]. Он показывает рост среднегодовой температуры воздуха в северных регионах Западной Сибири по моделям общей циркуляции атмосферы Британской метеорологической службы и Института Макса Планка в Германии на 2,5–5,5 °С. Эмпирический прогноз, приведённый в той же работе, составляет 4–6 °С. При этом преобладает повышение зимних температур

воздуха, которое в 1,4 раза больше летних температур для севера Западной Сибири и в 10 раз больше для Якутии [7]. Измерения в скважинах на севере Аляски показали рост температуры многолетней мерзлоты на 2–4 °С за прошедшие 50–100 лет [23, 24]. Отмечены многочисленные отрицательные последствия влияния потепления климата на мерзлоту. Так, за прошедшие 50 лет на севере Аляски сократились размеры многих водоёмов. Как отмечается в работе [26], вероятный механизм этого – внутренний дренаж в результате деградации поверхностной части многолетней мерзлоты. Расконсервация льдонасыщенных многолетнемёрзлых грунтов вызывает образование термокарста в арктических лесах Аляски, что приводит к обрушению деревьев и изменению экосистемы [25]. Один из факторов, влияющих на теплофизическое состояние и деградацию многолетнемёрзлых грунтов, – изменчивость параметров снежного покрова. Цель настоящей работы – проанализировать пространственную и временную изменчивость термического сопротивления снежного покрова для ряда метеостанций (ГМС) Красноярского края и Якутии, а также оценить влияние термического сопротивления снежного покрова на глубину промерзания почвогрунтов и деградацию многолетнемёрзлых пород.

Влияние снежного покрова на промерзание грунта

Снежный покров – важный фактор взаимодействия в системе атмосфера–поверхностные покровы–подстилающее основание. Обзор работ по влиянию снежного покрова на под-

стилающее основание дан в работе [15]. К одной из существенных причин, способствующих активизации опасных природных процессов и снижению несущей способности оснований, относится изменение условий снегонакопления в районах распространения многолетней мерзлоты, вызванное, в частности, антропогенным воздействием. В населённых пунктах происходит техногенное перераспределение и уплотнение снега, в результате чего изменяются температура грунта и глубина сезонного промерзания и протаивания пород. Так, натурные наблюдения показали [8], что в ходе инженерной подготовки территории (уплотнение и уборка снега) в течение двух-трёх лет формируются линзы мёрзлого грунта толщиной до 2 м. В то же время устройство газонов с травяной и кустарниковой растительностью способствует накоплению рыхлого снега, под которым глубина сезонного промерзания грунтов значительно снижается.

Изменчивость толщины снежного покрова на небольшой территории как в силу естественных причин, так и в результате техногенных процессов при освоении территории сильно различается, тогда как температура воздуха на локальной территории меняется незначительно. Изменение теплового потока в системе атмосфера–поверхностные покровы–подстилающее основание при потеплении климата может приводить к образованию и росту таликов и, как следствие, к деградации многолетней мерзлоты. Установлено, что повышение среднегодовой температуры воздуха в ряде районов может сопровождаться понижением температуры грунтов. Это объясняется уменьшением максимальной толщины снежного покрова или замедленным его ростом в первой половине зимы [16]. Численные эксперименты показали [13], что только за счёт изменчивости теплофизических параметров снежного покрова расчётная глубина промерзания грунтов может отличаться в несколько раз. К основным параметрам снежного покрова, влияющим на теплообмен, относятся толщина снежного покрова h_s и его плотность ρ_s . Значение последнего в значительной степени определяет величину коэффициента эффективной теплопроводности снега λ_s . В качестве комплексного теплофизического параметра снежного покрова, определяющего его теплоизоляционную способность, выступает термическое сопротивление – отношение толщины снежного покрова к коэффициенту эффективной теплопроводности снега: $R_s = h_s/\lambda_s$. Оценим влияние термического сопротивления снежного покрова на промерзание грунта. Чтобы определить его, приведём глубину промерзания

грунта, измеренную на разных ГМС, к единой температуре воздуха. С этой целью получены расчётные кривые глубины промерзания при разных параметрах снежного покрова и температурах воздуха.

Исходные данные для расчётов

Для получения расчётных кривых применялось математическое моделирование [13]. Параметры грунта принимались в соответствии со СНиП 2.02.04–88 [19]. Расчёты проводились для суглинка с плотностью 1400 кг/м^3 . При влажности суглинка 25% коэффициенты теплопроводности мёрзлого суглинка λ_f и его объёмная теплоёмкость c_f приняты равными соответственно $1,51 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $2,06 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$, а для талого суглинка $\lambda_{th} = 1,33 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и $c_{th} = 2,78 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$. При влажности 35% принятые значения составляют: λ_f и λ_{th} соответственно $1,66$ и $1,57 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, а c_f и c_{th} – соответственно $2,35 \cdot 10^6$ и $3,35 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3 \cdot \text{К)}$. Среднеширотные значения интенсивности суммарной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность в равнинных районах России, приняты по данным работы [18]. При отрицательных температурах воздуха значение альbedo снежного покрова принималось равным $0,8$, в период таяния – $0,5$, а при отсутствии снега – $0,2$.

Расчёты проводились для условий ГМС Байкит Красноярского края. Сумма отрицательных температур воздуха $\sum T_a$ для этой метеостанции составляет $-4020 \text{ }^\circ\text{C}$. Суточная температура воздуха за периоды с положительной и отрицательной температурой аппроксимировалась зависимостью вида

$$T_a = T_1 \sin(\pi t/\tau_{\max}) + 273,$$

где $T_1 = T_{\max}$ или T_{\min} ; t – текущее время; τ_{\max} – продолжительность соответствующего периода.

Значения T_{\max} и T_{\min} определялись по формулам $T_{\max} = \pi T_{th}/2$ и $T_{\min} = \pi T_f/2$, где T_{th} и T_f – соответственно средние значения температуры за периоды с положительной и отрицательной температурой воздуха. Для ГМС Байкит значения T_f и T_{th} равны соответственно $-19,0$ и $10,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Продолжительность холодного периода принята равной 220 суткам. При расчётах задержка времени начала снегонакопления по отношению к моменту установления отрицательных среднесуточных температур воздуха τ_{s0} принималась равной восьми суткам. Температура выпадающего снега считается одинаковой с температурой воздуха.

Толщина и плотность снежного покрова для ГМС Байкит брались по данным Научно-прикладного справочника по климату СССР [11]. Коэффициент эффективной теплопроводности

сти снега λ_s рассчитывался в зависимости от его плотности ρ_s по формуле [14]

$$\lambda_s = 9,165 \cdot 10^{-2} - 3,814 \cdot 10^{-4} \rho_s + 2,905 \cdot 10^{-6} \rho_s^2, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)},$$

полученной путём обработки более 20 известных из литературы эмпирических зависимостей. При расчётах скорость ветра принималась равной 7 м/с, влажность воздуха – 70%, облачность – 0,6. Количество незамёрзшей воды на границе мёрзлой и талой зоны суглинка считалось равным 11%. Температура грунта к началу промерзания, полученная в результате предварительных расчётов, задавалась по параболической зависимости с максимальным значением 2 °С на глубине 2,5 м и 0 °С на глубинах 0 и 5 м (среднее значение 1,3 °С).

Результаты расчётов

Результаты расчётов глубины промерзания грунта в зависимости от суммы отрицательных температур воздуха при разной толщине снежного покрова и разном термическом сопротивлении даны на рис. 1. Из него видно, что при термическом сопротивлении 3,29 м²·К/Вт и увеличении суммы отрицательных температур в 3,3 раза (от –1000 до –3300 °С) глубина промерзания увеличивается в 2,2 раза. Приблизительно такой же рост глубины промерзания (в 2 раза) наблюдается в случае уменьшения втрое термического сопротивления (с 4,93 до 1,64 м²·К/Вт) при сумме отрицательных температур –3300 °С.

Сравнение натурных данных по влиянию снежного покрова и его термического сопротивления на промерзание грунта в разных районах проводилось по определённой методике. Сначала по данным агроклиматических справочников [1] для ГМС Красноярского края и Республики Коми были определены средние многолетние значения глубин промерзания грунта (ξ , м), сумма отрицательных температур воздуха и параметры снежного покрова (табл. 1). Среднее значение суммы отрицательных температур воздуха для рассмотренных ГМС Красноярского края составляет около –2200 °С. Для приведения глубины промерзания грунта к этой сумме температур использовались графики рис. 1. Полученные значения приведённой глубины промерзания грунта ξ_T в зависимости от толщины снежного покрова и его термического сопротивления приведены на рис. 2, из которых видно, что эти значения глубин промерзания лучше коррелируют с термическим сопротивлением снежного покрова. Для расчётов принята влажность грунта 25 и 35%. Эмпирические и расчётные значения глубин промерзания для

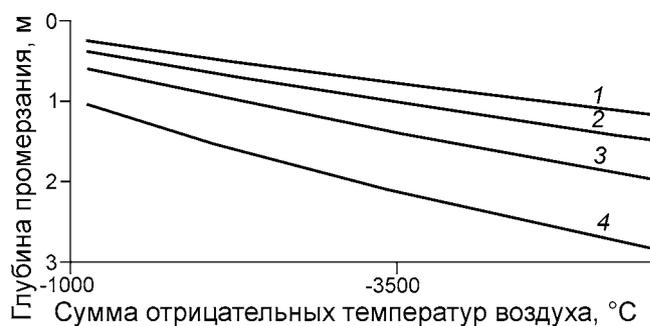


Рис. 1. Расчётная глубина промерзания грунта в зависимости от суммы отрицательных температур воздуха при термическом сопротивлении снежного покрова (м²·К/Вт) и его толщине (в скобках):

1 – 6,64 (1,00 м); 2 – 4,93 (0,75 м); 3 – 3,29 (0,50 м); 4 – 1,64 (0,25 м)

Fig. 1. Calculated depth of ground freezing depending on the air negative temperature sum at thermal resistance (м²·К/Вт) and snow depth:

1 – 6.64 (1.00 m); 2 – 4.93 (0.75 m); 3 – 3.29 (0.50 m); 4 – 1.64 (0.25 m)

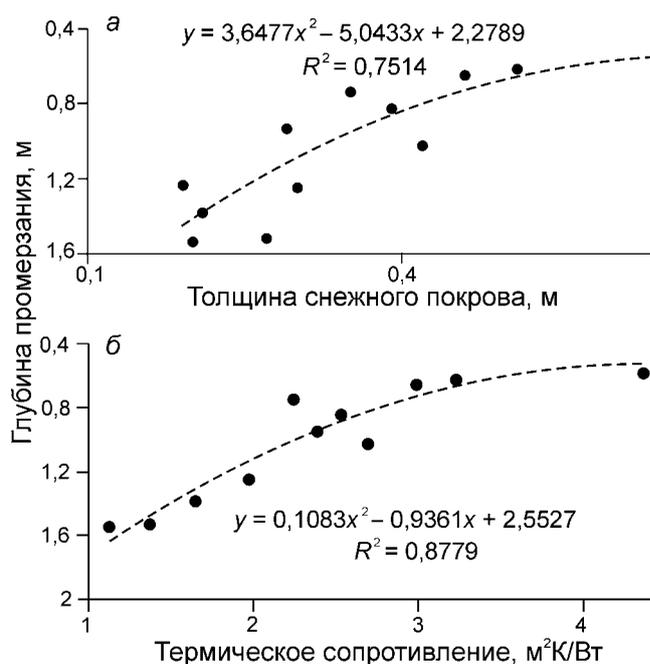


Рис. 2. Зависимость приведённой глубины промерзания от толщины (а) и термического сопротивления (б) снежного покрова. Пунктиром показан тренд

Fig. 2. Dependence of the resulted depth of freezing from thickness (а) and thermal resistance (б) of snow cover. Dotted line is a trend

условий ГМС Байкит, приведённые к значению $\Sigma T_a = -2200$ °С, представлены на рис. 3. Из него видно, что эмпирические значения глубин промерзания грунта для ГМС Красноярского края и

Таблица 1. Глубина промерзания грунта, параметры снежного покрова и температуры воздуха для ГМС Красноярского край и Республики Коми (агроклиматический справочник); прочерки означают отсутствие информации*

Метеостанции	Индекс ВМО	Координаты, с.ш./в.д.	h_s , м	R_s , м ² ·К/Вт	l , м	ΣT_a , °С	l_n , м
<i>Красноярский край</i>							
Солянка	—	—	0,2	1,12	1,5	–2138	1,53
Ачинск (ж.-д. ст.)	29467	59°25'/90°31'	0,27	1,37	1,45	–2061	1,52
Таштын	—	—	0,21	1,64	1,29	–2001	1,37
Чадан	36087	51°22'/91°26'	0,19	1,98	1,77	–3603	1,23
Идринское	29766	54°22'/92°08'	0,3	1,98	1,32	–2394	1,25
Большой Улуй	29464	56°54'/90°33'	0,35	2,24	0,71	–2104	0,73
Дзержинское	29481	56°51'/95°13'	0,29	2,39	1,05	–2635	0,93
Тюхтет	29456	56°32'/89°19'	0,39	2,54	0,8	–2108	0,82
Большая Мурта	29471	56°54'/93°08'	0,42	2,69	1,11	–2492	1,02
Березовское	—	—	0,46	2,99	0,69	–2472	0,64
Енисейск	29263	58°27'/92°09'	0,51	3,22	0,7	–2655	0,61
Казачинское	29374	57°45'/93°11'	0,7	4,36	0,6	–2450	0,56
<i>Республика Коми</i>							
Усть-Уса	36083	65°58'/56°55'	0,53	2,80	1,39	–2535	1,32
Усть-Цильма	23405	65°26'/52°10'	0,60	3,62	0,81	–2193	0,89
Ижма	23503	65°00'/53°55'	0,45	2,48	0,83	–2254	0,88
Венденга	—	—	0,69	4,25	0,58	–1727	0,81
Троицко-Печорск	23711	62°42'/56°12'	0,67	3,59	0,51	–2180	0,56
Усть-Вымь	—	—	0,63	3,33	0,92	–1807	1,22
Усть-Кулом	23803	61°41'/53°41'	0,62	3,92	0,7	–1880	0,89
Сыктывкар	23804	61°40'/50°51'	0,55	2,88	0,83	–1759	1,13
Пустошь	23807	61°07'/50°17'	0,56	3,02	0,81	–1736	1,12
Объячево	22996	60°22'/49°39'	0,56	2,95	0,43	–1640	0,63

* h_s – максимальная толщина снежного покрова; R_s – термическое сопротивление снежного покрова; l – глубина промерзания, ΣT_a – сумма отрицательных температур воздуха; l_n – приведённая глубина промерзания.

Республики Коми находятся, в основном, в диапазоне изменения расчётных значений.

Рассмотрим другие факторы, влияющие на глубину промерзания и определяющие разброс значений натуральных данных на рис. 3. Расчёты с использованием метеоданных ГМС Байкит показали, что при увеличении времени сдвига установления снежного покрова τ_{s0} на одни сутки глубина промерзания увеличивается приблизительно на 0,02 м. Если отличие в величине τ_{s0} составляет пять суток, то глубина промерзания изменится на 0,1 м. При росте средней температуры грунта к началу промерзания на 1 °С глубина промерзания уменьшится на 0,13 м. На среднюю температуру грунта к началу про-

мерзания влияют положительные температуры воздуха. Отметим, что для рассмотренных ГМС Красноярского края и Республики Коми средние положительные температуры воздуха находятся в пределах 11–14 °С и 8–10 °С соответственно. При изменении средней положительной температуры воздуха от 10 до 14 °С средняя температура грунта возрастает с 1,9 до 3,2 °С. Это вызывает уменьшение глубины промерзания на 11% – с 1,66 до 1,48 м.

Замена суглинка на супесь приводит к росту коэффициента теплопроводности талой и мёрзлой его части на 20 и 12% соответственно. При этом глубина промерзания увеличивается только на 2%. Изменение плотности суглинка с 1400

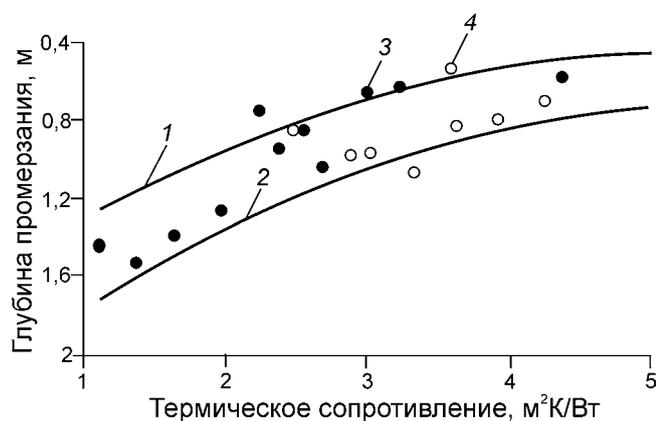


Рис. 3. Расчётные и измеренные значения приведённой глубины промерзания грунта в зависимости от термического сопротивление снежного покрова:

1, 2 – расчёт при влажности грунта 35 и 25% соответственно; 3, 4 – натурные данные по Красноярскому краю и Республике Коми соответственно

Fig. 3. Calculated and natural values of freezing depth of the ground depending on thermal resistance of snow:

1, 2 – calculation at the soil humidity of 35 and 25% accordingly; 3, 4 – the natural data of Krasnoyarsk region and Komi Republic

до 1600 кг/м^3 при равной весовой влажности снижает глубину промерзания на 10% за счёт роста объёмной влажности грунта. Другой фактор – наличие мохово-растительного покрова на поверхности грунта, который служит дополнительным термическим сопротивлением и может способствовать изменению глубины промерзания.

Пространственно-временная изменчивость параметров снежного покрова

Для определения пространственного распределения термического сопротивления снежного покрова проведём сравнительный анализ этой величины для ряда ГМС севера Красноярского края и Якутии. С этой целью по данным климатических справочников определим динамику толщины и плотности снежного покрова и рассчитаем его термическое сопротивление. Один из наиболее важных параметров снежного покрова – его плотность, влияющая и на коэффициент теплопроводности снега и на его толщину. Так, рост плотности снега с 200 до 300 кг/м^3 снижает толщину снежного покрова в 1,5 раза и увеличивает коэффициент теплопроводности в 1,9 раз. В итоге термическое сопротивление снижается в 2,8 раза. Значения термического сопротивления снежного покрова, а также толщины, плотности и коэффициента теплопроводности (на момент достижения максимальной толщины снежного

покрова) приведены для ГМС Красноярского края и Якутии в табл. 2.

Номера ГМС в табл. 2 соответствуют их номерам в справочниках по климату [9–11]. Из таблицы видно, что даже в случае приблизительно одинаковой толщины снежного покрова (ГМС Волочанка и Чемдальск – Красноярский край, ГМС Депутатский и Сухана – Якутия) термическое сопротивление снежного покрова различается в 1,5 раза. Динамика термического сопротивления для ГМС, расположенных на севере Красноярского края, дана на рис. 4. Значения термического сопротивления снежного покрова для ГМС Красноярского края с номерами 5, 8, 9, 12 по табл. 2 находятся в диапазоне изменения термического сопротивления ГМС с номерами 10 и 11 в соответствии с рис. 4.

В работе [3] отмечается, что с ростом толщины снежного покрова увеличиваются его плотность и, следовательно, коэффициент теплопроводности снега. В результате отношение этих величин к термическому сопротивлению снежного покрова большую часть холодного времени года меняется незначительно. Для ряда ГМС Якутии из-за небольшого изменения плотности снега рост термического сопротивления продолжается в течение всего холодного периода. Эта величина характеризует теплоизоляционные свойства снежного покрова в данной географической точке.

В аномальные по снежности годы возможно изменение криогенного строения грунта. Так, при небольшом термическом сопротивлении снежного покрова в сезонномёрзлых грунтах может сформироваться слой промёрзшего грунта, который не протает в летний период. При больших значениях термического сопротивления снежного покрова возможны формирование талого слоя в многолетнемёрзлых породах и ослабление несущей способности грунта. Поэтому оценка критических параметров снежного покрова, при которых вероятно формирование неслюющей мерзлоты в сезонноталом грунте или устойчивого мёрзлого слоя в сезонномёрзлом грунте, имеет практическое значение.

Критическая толщина снежного покрова

Критическая толщина снежного покрова рассматривалась разными исследователями. В работе [6] эта величина принимается из условия достижения среднегодовой температуры грунта 0°C . Так, прогнозные значения критической толщины снега для суглинка тундры Кольского региона составляют $25\text{--}30$ см при наличии мохового покрова и $15\text{--}20$ см при отсутствии напочвенной растительности. Для восточной

Таблица 2. Параметры снежного покрова для ГМС Красноярского края и Якутии

Метеостанции	Индекс ВМО	Координаты, с.ш./в.д.	Место	R_s , м ² ·К/Вт	h_s , м	Плотность снега ρ_s , кг/м ³
<i>Красноярский край</i>						
1. Волочанка	–	70°58'/94°42'	Поле	3,20	0,57	250
2. Дудинка	23074	69°24'/86°10'	Лес	2,41	0,38	230
3. Норильск	23078	69°20'/88°18'	Поле	1,16	0,22	260
4. Ессей	24105	68°28'/102°22'		2,05	0,27	200
5. Агата	23383	66°53'/93°28'	Лес	4,39	0,58	200
6. Тура	24507	64°10'/100°04'	Лес, поле	3,42	0,40	180
7. Байкит	23891	61°40'/96°22'	Лес	6,05	0,75	190
8. Усть-Камо	23992	60°43'/97°31'		5,13	0,60	180
9. Ванавара	24908	60°20'/102°16'		4,19	0,52	190
10. Таимба	–	60°19'/98°54'		4,68	0,52	170
11. Чемдальск	30014	59°38'/103°19'		4,53	0,53	180
12. Игарка	23274	67°28'/86°34'	Поле	3,20	0,57	250
<i>Якутия</i>						
1 а. Саскылах	–	71°58'/114°05'	Лес	2,96	0,39	200
1 б. Саскылах	21802	71°58'/114°05'	Поле	2,29	0,32	210
2. Джалинда	30695	53°28'/123°54'	Лес	4,18	0,49	180
3. Саханджа	24052	69°46'/128°13'		4,35	0,51	180
4. Джангкы	–	70°08'/135°06'		4,10	0,43	160
5. Воронцово	–	70°00'/147°06'		5,24	0,58	170
6. Депутатский	24076	69°20'/139°40'		2,86	0,40	210
7. Джарджан	24143	68°44'/124°00'		4,59	0,57	190
8. Сухана	24136	68°48'/117°58'		4,29	0,45	160
9. Оленёк	24125	68°30'/112°26'		4,33	0,48	170
10. Янск	24166	68°26'/134°47'		3,05	0,32	160
11. Дружина	–	68°16'/145°28'		5,14	0,54	160
12. Батагай-Алыга	24261	67°48'/130°23'		2,73	0,26	140
13. Маак	–	67°44'/116°16'		4,10	0,43	160
14. Верхоянск	24266	67°33'/133°23'		2,76	0,29	160
15. Среднеколымск	25206	67°26'/153°43'		5,33	0,59	170

части Мало- и Большеземельской тундр эти значения равны соответственно 80–90 и 75–85 см. В работе [8] критическая толщина снега, при которой среднегодовая температура поверхности почвенно-растительного покрова равна 0 °С, оценивается на основе автомодельного решения. При этом отмечается, что при увеличении толщины снега выше критических значений возможна деградация многолетнемёрзлых пород. Однако для применения автомодельного решения требуется введение ряда ограничений на параметры процесса. Их анализ показал [20], что исполь-

зование средних значений температуры воздуха и теплофизических параметров снега, а также других ограничений, необходимых при автомодельном решении, может приводить к большим погрешностям при расчётах глубины промерзания. Поэтому автомодельные решения неприменимы при определении динамики промерзания.

На примере двух ГМС Западной Сибири – Байкит (61°40' с.ш., 96°22' в.д.) и Волочанка (70°58' с.ш., 94°42' в.д.) с разными значениями термического сопротивления снежного покрова (6,4 и 3,2 м²·К/Вт) и расположенными на юге и

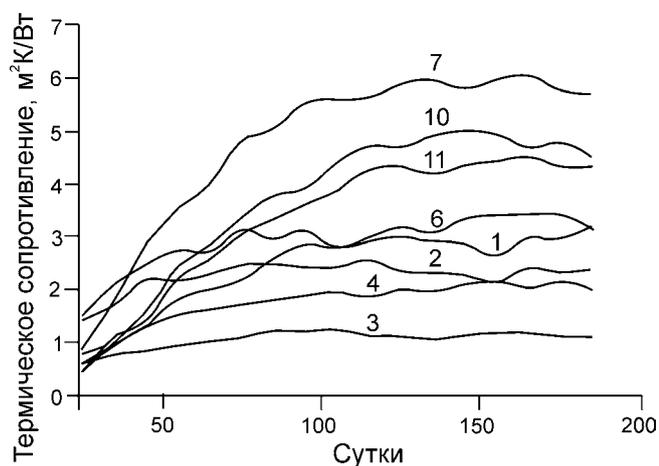


Рис. 4. Термическое сопротивление снежного покрова в районе ГМС Красноярского края. Над кривыми даны номера ГМС (см. табл. 2)

Fig. 4. Thermal resistances of snow cover at meteorological stations of Krasnoyarsk region; number of meteorological stations above corresponding curves (see Table 2)

севере Западной Сибири рассмотрим критическую толщину снежного покрова, при достижении которой изменяется криогенное строение многолетнемёрзлых пород и сезонномёрзлых грунтов. Среднемноголетние значения толщины и плотности снежного покрова в районе указанных ГМС приняты по данным климатических справочников [11]. В табл. 3 приведены климатические параметры для ГМС Волочанка и Байкит.

Для расчёта промерзания–протаивания грунта начальная температура грунта в районе ГМС Волочанка принималась равной $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в районе ГМС Байкит – равной $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. В ходе вычислений отводится время для получения установившегося распределения температуры. Расчёты проводились по многофронтальной модели с использованием метода «выпрямления фронта» [21] для суглинка с плотностью скелета грунта 1600 кг/м^3 . Рассматриваемая толщина мёрзлой горной породы составляла 50 м. При расчётах шаг по времени варьировался от одного часа (на момент образования нового фазового слоя) до одних суток (при толщине вновь образованного слоя более 2 см). Каждый фазовый слой грунта разбивался на 20 промежутков. Численное решение системы уравнений [21], описывающей теплообмен в системе атмосфера–снежной покров–многолетнемёрзлые породы, велось методом конечных разностей с помощью неявной разностной схемы для нелинейных задач теплопроводности с переменными коэффициентами [4].

На каждом временном шаге рассчитывались рост толщины снежного покрова, плотность и

Таблица 3. Климатические параметры для ГМС Волочанка и Байкит

Параметры	Метеостанции	
	Волочанка	Байкит
Средняя температура воздуха за период, $^{\circ}\text{C}$:		
с отрицательной температурой	-21,6	-19,0
с положительной температурой	7,7	10,3
Продолжительность холодного периода, сутки	252	220
Максимальная толщина снега, м	0,57	0,75
Время достижения максимальной толщины снега, сутки	225	165
Плотность снега при максимальной толщине, кг/м^3	250	190

теплопроводность снега, теплофизические параметры мёрзлого и талого грунта и составляющие внешнего тепло- и массообмена [21]. Результаты расчётов показали, что при росте толщины снежного покрова от 0,6 до 1,7 м глубина протаивания возрастает с 1,43 до 1,58 м в соответствии с рис. 5 за счёт меньшего выхолаживания грунта в зимний период. При толщине снежного покрова более 1,7 м глубина протаивания грунта практически не меняется, так как уменьшение выхолаживания грунта в зимний период компенсируется затратами тепла и времени на таяние снежного покрова. Промерзание сезонноталого слоя и смыкание с кровлей многолетнемёрзлой части грунта в районе ГМС Волочанка в холодное время года происходит в соответствии с зависимостью $\tau = 88h_s + 53$ сутки, $R = 0,998$. При толщине снежного покрова 0,6 и 2,1 м время промерзания до смыкания слоёв составляет 100 и 235 суток соответственно. При толщине снежного покрова более 2,3 м глубина протаивания превышает глубину промерзания грунта, и в итоге будет образовываться непромёрзший слой и происходит деградация мерзлоты.

Таким образом, для климатических условий ГМС Волочанка критическая толщина снега составляет 2,3 м, а критическое термическое сопротивление – $12,92\text{ м}^2\cdot\text{K/Вт}$. Результаты расчётов глубины промерзания грунта в районе ГМС Байкит показывают, что при влажности грунта 25% глубина промерзания грунта изменяется от 1 м при толщине снежного покрова 1 м до 2 м при толщине 0,36 м. При влажности грунта 30% глубина промерзания меньше на четверть. Глубина протаивания грунта при влажности 25 и 30% составляет соответственно около 2,0 и 1,7 м. Сравнение глубин промерзания и протаив-

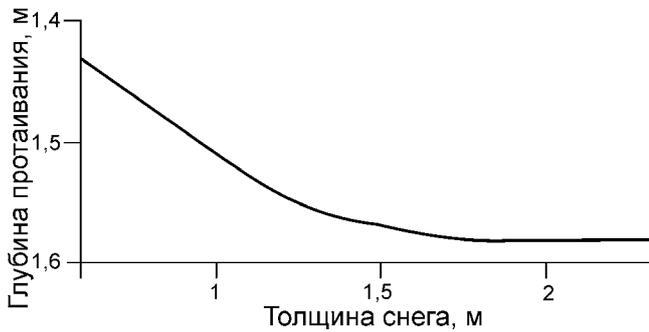


Рис. 5. Глубина протаивания грунта в зависимости от толщины снега для ГМС Волочанка

Fig. 5. Ground thawing depth depending on the snow thickness for the weather station Volochanka

вания при разных значениях толщины снежного покрова позволяет определить критическую толщину снега. В районе ГМС Байкит, расположенной на 9° южнее ГМС Волочанка и имеющей сумму положительных температур воздуха на 73% больше, критическая толщина снега составляет 0,36 м при влажности грунта 25% и 0,31 м при влажности 30%. Термическое сопротивление снежного покрова в этих случаях равно 2,73 и 2,35 м²·К/Вт соответственно. При меньших значениях термического сопротивления ниже глубины протаивания будет оставаться мёрзлый слой.

Возможности регулирования термического сопротивления снежного покрова

В зависимости от толщины снежного покрова он оказывает как отепляющее, так и охлаждающее действие [12]. Отепляющее действие снежного покрова для сезонного промерзания и протаивания пород неодинаково. При снятии снежного покрова в области сезонного промерзания глубина последнего увеличивается. При снятии снежного покрова в области сезонного протаивания глубина сезонного протаивания изменяется незначительно. Результаты расчётов, приведённые в работе [6], показывают, что для восточной части Мало- и Большеземельской тундр при уменьшении толщины снежного покрова с 70 до 40 см глубина сезонного протаивания суглинистых грунтов снижается со 150 до 130 см, а при полном удалении снежного покрова – до 110 см. Более ощутимая реакция глубины оттаивания при изменении толщины снежного покрова отмечается для маловлажных песчаных грунтов. Таким образом, регулирование толщины снежного покрова позволяет предотвращать и замедлять деградацию многолетнемёрзлых пород при климатических изменениях. Регулировать термическое сопротив-

ление снежного покрова можно за счёт его уплотнения. Для оценки эффективности подобного регулирования мы выполнили численные эксперименты влияния параметров снежного покрова на промерзание–протаивание пород.

Для расчётов приняты климатические параметры в районе ГМС Волочанка и Игарка. При близких значениях параметров снежного покрова сумма положительных температур воздуха в районе ГМС Игарка на 30% больше, чем в районе ГМС Волочанка. Примем повышение среднегодовой температуры воздуха $\Delta T_{ya} = 6$ °С за 100 лет. Среднегодовая температура воздуха рассчитывалась по формуле

$$T_{ya} = T_f(1 - \varphi) + T_{th}\varphi,$$

где T_f и T_{th} – средние значения температуры воздуха за периоды с положительной и отрицательной температурой воздуха; φ – доля периода с положительными температурами в году, равная $\tau_{th}/365$; τ_{th} – продолжительность тёплого периода года.

Среднегодовая температура воздуха растёт на величину ΔT_{ya} как за счёт повышения средней положительной температуры воздуха и понижения средней отрицательной температуры воздуха, так и за счёт сокращения продолжительности холодного периода года и соответственно повышения продолжительности тёплого периода. Примем, что рост средней отрицательной температуры воздуха в k раз больше роста средней положительной температуры воздуха. Тогда из уравнения

$$T_{ya} + \Delta T_{ya} = (T_{th} + \Delta T_{th})(\varphi + \Delta T_{ya}\Delta\tau_T/365) + (T_f + k\Delta T_{th})(1 - \varphi - \Delta T_{ya}\Delta\tau_T/365)$$

(где $\Delta\tau_T$ – рост средней продолжительности тёплого периода года, приходящийся на 1 °С роста средней годовой температуры воздуха) получим формулу для определения средней температуры воздуха за период с положительной температурой ΔT_{th} при росте среднегодовой температуры воздуха на ΔT_{ya} :

$$\Delta T_{th} = \frac{\Delta T_{ya}(1 - (T_{th} - T_f)\Delta\tau_T/365)}{k + (1 - k)(\varphi + \Delta T_{ya}\Delta\tau_T/365)}.$$

Для условий севера Западной Сибири примем преобладающее повышение отрицательной температуры воздуха ($k = 2$) по сравнению с ростом летних температур и рост средней продолжительности тёплого периода $\Delta\tau_T = 6$ сут/°С. По данным работы [5], в северных широтах 65° и 70° на меридиане 80° в.д. перепад среднегодовых температур воздуха составляет 3,5 °С при разнице в продолжительности тёплого периода

Таблица 4. Температура воздуха и продолжительность тёплого периода года для ГМС Волочанка и Игарка

Показатели	Метеостанции	
	Волочанка	Игарка
Продолжительность тёплого периода года, сутки	112	130
Средняя температура воздуха, °С:		
положительная	8,42	9,48
отрицательная	-20,7	-18,09
годовая	-11,9	-8,4
ΔT_{th} , °С, при $\Delta \tau_T = 6$	1,96	2,12

года 25 суток ($\Delta \tau_T = 7$ сут/°С), в полосе между 70° и 60° с.ш. перепад равен 7 °С ($\Delta \tau_T = 7,5$ сут/°С) при разнице 53 суток, а на широтах между 70° и 60° с.ш. на меридиане 100° в.д. эти величины составляют 45 суток на 6 °С повышения средней годовой температуры воздуха ($\Delta \tau_T = 7,5$ сут/°С). Однако на разных широтах определённое влияние оказывают продолжительность светлого времени суток и величина солнечной радиации. Параметры температуры воздуха для ГМС Волочанка и Игарка приведены в табл. 4.

Начальная температура суглинка с влажностью 25% и плотностью скелета грунта 1600 кг/м³ принимается равной -1 °С и отводится время для получения установившегося распределения. Рассматриваемая толщина мёрзлой горной породы составляла 170 м. Параметры теплообмена поверхности снежного покрова и грунта с атмосферой приведены в работе [15]. Расчёты показывают, что через 100 лет глубина протаивания грунта для ГМС Волочанка (6,45 м) и Игарка (11,64 м) будет отличаться на 40% (рис. 6). Это обусловлено более низкой среднегодовой температурой воздуха для ГМС Волочанка (-11,9 °С) по сравнению с этим же показателем для ГМС Игарка (-8,4 °С) при равном термическом сопротивлении снежного покрова 3,2 м²·К/Вт.

Результаты расчётов протаивания грунта при воздействии на снежный покров

При оценке влияния возможного изменения термического сопротивления снежного покрова на деградацию ММП рассматривались два вида воздействия: 1) уплотнение снежного покрова в 2 раза после достижения им половины максимальной толщины; 2) удаление снежного покрова после достижения им половины максимальной толщины. Уплотнение снежного покрова вдвое может происходить при проезде по снежному покрову автомобилей (в расчётах уплотнение

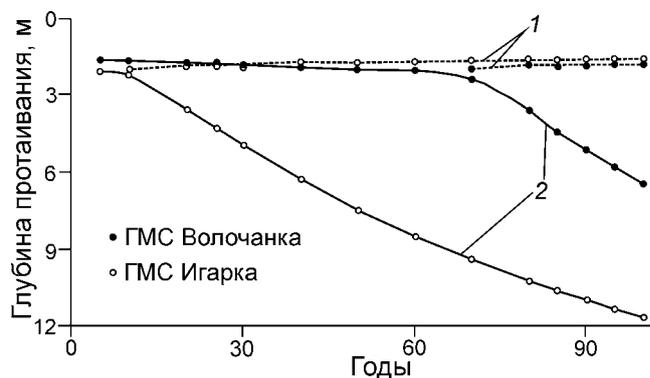


Рис. 6. Глубина промерзания (1) и протаивания (2) грунта для условий ГМС Волочанка и Игарка

Fig. 6. Depth of freezing (1) and thawing (2) of ground for weather conditions of Volochanka and Igarka weather stations

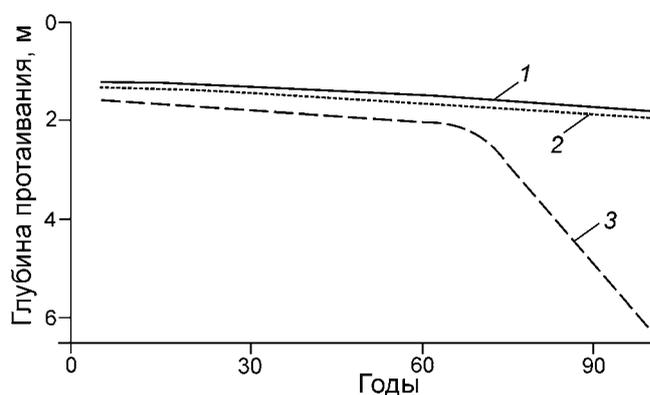


Рис. 7. Глубина протаивания грунта в районе ГМС Волочанка: 1 – удаление снежного покрова после достижения им половины максимальной толщины снежного покрова; 2 – уплотнение снежного покрова в 2 раза после достижения им половины максимальной толщины снежного покрова; 3 – снежный покров без изменений

Fig. 7. The depth of ground thawing for the weather station Volochanka:

1 – remove of snow which reaches half of maximum thickness; 2 – compaction of snow which reaches half of the maximum depth; 3 – snow cover without changing

снега рассматривалось после достижения им половины максимальной толщины). Результаты экспериментов в Тюменской области по уплотнению снега при проезде по нему разных автомобилей показали, что уже после первого проезда плотность снега возрастает в 2 раза, а при двух- и трёхкратных проездах – втрое. При этом глубина колеи составляет примерно 25 см.

Второй вид воздействия – однократное удаление снежного покрова после достижения им половины максимальной толщины, что приводит к новому накоплению снежного покрова. При этом его плотность рассчитывается, исходя

из его новой небольшой толщины. Результаты расчётов для условий ГМС Волочанка (рис. 7) показали, что разница в глубине протаивания грунта при указанных воздействиях на снежный покров составляет 10–15 см. Воздействие на снежный покров уменьшает глубину протаивания грунта на 30–50 см по сравнению с ненарушенным снежным покровом. При указанных воздействиях на снежный покров талый слой промерзает полностью, в то время как при отсутствии воздействия толщина талика в летний период достигнет 6,5 м. Различие в глубине протаивания при указанных видах воздействия на снежный покров для условий ГМС Игарка составляет 6–10 см. При этом глубина протаивания на 40–45 см меньше, чем в ненарушенном снежном покрове, и талик не образуется. В случае отсутствия воздействия на снежный покров толщина талика в летний период через 85 лет достигнет 10 м.

Заключение

Теплозащитные свойства снежного покрова определяются его термическим сопротивлением, которое для разных районов Якутии, Красноярского края и Республики Коми изменяются от 1 до 6 м²·К/Вт. Результаты расчётов и анализ экспериментальных данных показали, что глубина промерзания сезонномёрзлого грунта лучше коррелирует с термическим сопротивлением снежного покрова, чем с его толщиной. Математическое моделирование позволило оценить влияние на глубину промерзания температуры грунта, времени сдвига установления снежного покрова, типа, влажности и плотности грунта. Так, для ГМС Красноярского края при росте средней положительной температуры воздуха с 10 до 14 °С средняя температура грунта возрастает с 1,9 до 3,2 °С. Это приводит к уменьшению глубины промерзания с 1,66 до 1,48 м.

При росте толщины снежного покрова с 0,6 до 1,7 м в районе ГМС Волочанка (север Западной Сибири) глубина протаивания грунта вследствие меньшего выхолаживания грунта в зимний период возрастает с 1,43 до 1,58 м, а при толщине снежного покрова более 1,7 м глубина протаивания грунта практически не меняется, так как выхолаживание грунта в зимний период компенсируется затратами тепла на таяние снежного покрова. При этом критическая толщина снега, при которой глубина протаивания превысит глубину промерзания, составит 2,3 м, а величина термического сопротивления – 12,9 м²·К/Вт.

При больших значениях термического сопротивления возникнут условия для деградации многолетней мерзлоты. Для более южной ГМС Байкит критическая толщина снега составит 0,36 м при влажности грунта 25%, а термическое сопротивление снежного покрова – 2,7 м²·К/Вт. Регулирование термического сопротивления снежного покрова за счёт уплотнения снега или частичного его удаления позволяет снизить отрицательные последствия потепления климата и предотвратить деградацию многолетнемёрзлых грунтов. Если естественные температурные межгодовые изменения составляют десятки процентов, то техногенными воздействиями термическое сопротивление можно изменить на сотни процентов.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований ОНЗ РАН № 12 и гранта НШ-479.2012.5 ведущей научной школы.

Литература

1. Агроклиматический справочник по Красноярскому краю и Тувинской автономной области. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 288 с.
2. Анисимов О.А., Нельсон Ф.Э., Павлов А.В. Прогнозные сценарии эволюции криолитозоны при глобальных изменениях климата в XXI веке // Криосфера Земли. 1999. Т. III. № 4. С. 15–25.
3. Балобаев В.Т. Геотермия мерзлой зоны литосферы севера Азии. Новосибирск: Наука, 1991. 194 с.
4. Берковский Б.М., Ноготов Е.Ф. Разностные методы исследования задач теплообмена. Минск: Наука и техника, 1976. 144 с.
5. Гаврилова М.К. Современный климат и вечная мерзлота на континентах. Новосибирск: Наука, 1981. 113 с.
6. Геокриология СССР: Европейская территории СССР / Под ред. Е.Д. Ершова. М.: Недра, 1988. 358 с.
7. Израэль Ю.А., Павлов А.В., Анохин Ю.А. Эволюция криолитозоны при современных изменениях глобального климата // Метеорология и гидрология. 2002. № 1. С. 22–34.
8. Максимова Л.Н., Чижов А.Б., Меламед В.Г., Дубровин В.А., Медведев А.В. Оценка влияния снежного покрова на температурный режим и сезонное промерзание пород (с применением ЭВМ) // Мерзлые породы и снежный покров. М.: Наука, 1977. С. 127–135.
9. Научно-прикладной справочник по климату СССР: Сер. 3. Вып. 1. Ч. 1–6. Кн. 1. Республика Коми. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 483 с.
10. Научно-прикладной справочник по климату СССР: Сер. 3. Вып. 24. Ч. 1–6. Кн. 1. Якутская АССР Л.: Гидрометеиздат, 1989. 607 с.
11. Научно-прикладной справочник по климату СССР: Сер. 3. Вып. 21. Ч. 1–6. Кн. 1. Красноярский край и

- Тувинская автономная область. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 623 с.
12. Общее мерзлотоведение (геокриология) / Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: изд. МГУ, 1978. 464 с.
 13. *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.
 14. *Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В., Чернов Р.А.* Оценка влияния потепления климата на деградацию мерзлоты (на теплофизическое состояние мерзлых пород) // МГИ. 2005. Вып. 99. С. 144–150.
 15. *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.
 16. *Павлов А.В.* Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: ГЕО, 2008. 230 с.
 17. *Павлов А.В., Ананьева Г.В., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г., Дубровин В.А., Какунов Н.Б., Минайлов Г.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н.* Мониторинг сезонноталого слоя и температуры мерзлого грунта на Севере России // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 4. С. 30–39.
 18. *Пивоварова З.И.* Радиационные характеристики климата СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 335 с.
 19. СНиП 2.02.04–88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. М.: изд. ГУП ЦПП, 1997. 52 с.
 20. *Сосновский А.В.* О применимости автотемпературного решения к оценке влияния параметров снежного покрова на промерзание грунтов // МГИ. 2001. Вып. 90. С. 202–205.
 21. *Сосновский А.В.* Математическое моделирование влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 3. С. 83–88.
 22. *Цаликов Р.Х.* Опасности и угрозы для северных территорий Российской Федерации, обусловленные глобальным изменением климата / Материалы науч.-практич. конф. «Обеспечение комплексной безопасности северных регионов Российской Федерации». М.: изд. НЦУКС МЧС России, 2008. С. 122–130.
 23. *Jorgenson M.T., Racine C.H., Waiters J.C., Osterkamp T.E.* Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming climate in central Alaska // *Climate Change*. 2001. № 48. P. 551–579.
 24. *Lachenbruch A.H., Marshall B.V.* Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic // *Science*. 1986. № 234. P. 689–696.
 25. *Osterkamp T.E., Viereck L., Shur Y., Jorgenson M.T., Racine C.H., Doyle A.P., Boone R.D.* Observations of thermokarst in boreal forests in Alaska // *Arctic, Antarctic, Alpine Research*. 2000. V. 32. № 3. P. 303–315.
 26. *Yoshikawa K., Hinzman L.* Shrinking thermokarst ponds and groundwater dynamics in discontinuous permafrost // *Permafrost Periglacial Process*. 2003. № 14. № 2. P. 151–160.

Summary

Spatial and temporal variability of snow thermal resistance in some areas of Krasnoyarsk region and Yakutia has been studied. Soil freezing depth has been correlated with snow cover depth and its thermal resistance. Mathematical modeling has been applied to assess the influence of snow cover and soil parameters on depth of frost penetration. The critical thickness of snow cover that controls the development of seasonally frozen layer disconnected from underlying permafrost was found. Capabilities and efficiency of controlling the thermal resistance of snow cover required to reduce the adverse effects of climate warming on permafrost degradation have been discussed.