

**Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение /
Engineering geology, permafrost and soil sciences**

УДК 631.674:551.345 (571.56-925.13)

EDN: GZVUXH

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-244-256>



Оригинальная статья

**Оценка оптимальной нормы предзимнего полива
для создания защитного слоя в условиях распространения
ледового комплекса**

**Максим Алексеевич Сивцев^{✉,1}, Александр Федотович Жирков¹, Владимир Петрович
Осипов²**

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
ул. Мерзлотная, 36, г. Якутск, 677010, Российская Федерация

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
Миусская пл., 4, г. Москва, 125047, Российская Федерация

✉SivtsevMA@mpi.ysn.ru

Аннотация

В районах распространения ледового комплекса деградация защитного слоя приводит к активизации криогенных процессов, что сопровождается нарушением поверхности, изменением водно-теплового режима грунтов и утратой устойчивости мерзлотных ландшафтов. Особенно уязвимы нарушенные участки с неглубоким залеганием полигонально-жильных льдов. Предзимний полив рассматривается как способ управляемого изменения тепло- и влагопереноса в верхней части сильнольдистых отложений ледового комплекса Центральной Якутии с целью ускоренного формирования переходного (защитного) слоя на нарушенных термокарстом участках. Цель работы – на основе сопряженного моделирования тепло- и влагопереноса оценить оптимальную норму предзимнего увлажнения, при которой создаются условия для накопления льда в нижней части сезонно-талого слоя без его переувлажнения. Материалами послужили метеорологические данные со станции Амга и данные термовлажностного мониторинга на экспериментальных участках в долине р. Амга. Модель реализована в программе COMSOL Multiphysics и включает уравнение теплопереноса с учетом фазового перехода методом кажущейся теплоемкости и уравнение Ричардса для переменного-насыщенной фильтрации. Выполнены расчеты серии сценариев предзимнего полива (0–500 мм) с контролем выхода на квазистационарный режим. Установлено, что для рассматриваемых условий оптимальная норма предзимнего полива, обеспечивающая формирование льдонасыщенного защитного слоя, составляет не более $W = 300$ мм и зависит от начальной влажности сезонно-талого слоя. При других сценариях либо фронт инфильтрации не достигает нижней части сезонно-талого слоя ($W = 100, 200$ мм), либо начинает увеличиваться количество незамерзшей воды и повышается температура подстилающих многолетнемерзлых пород ($W = 400, 500$ мм). Полученные результаты могут быть использованы при планировании мерзлотно-мелиоративных мероприятий в районах распространения ледового комплекса и при выборе режимов предзимнего увлажнения.

Ключевые слова: защитный слой, предзимний полив, ледовый комплекс, численное моделирование, Центральная Якутия, COMSOL Multiphysics

Финансирование. Исходные данные получены в рамках НИОКТР № 126020216324-9 «Геотемпературное поле и многолетнемерзлые толщи Азиатской части России. Реакция теплового режима многолетнемерзлых пород на изменение климата», численная реализация выполнена за счет гранта РНФ № 23-61-10032 и при финансовой поддержке гранта им. П.И. Мельникова-2025.

Для цитирования: Сивцев М.А., Жирков А.Ф., Осипов В.П. Оценка оптимальной нормы предзимнего полива для создания защитного слоя в условиях распространения ледового комплекса. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2026;31(2):244–256. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-244-256> EDN: GZVUXH

Assessment of the optimal pre-winter irrigation rate for creating a protective layer under ice complex distribution conditions

Maxim A. Sivtsev^{✉,1}, Alexander F. Zhirkov¹, Vladimir P. Osipov²

¹Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 36, Merzlotnaya St., Yakutsk, Russian Federation, 677010

²Keldysh Institute of Applied Mathematics of the Russian Academy of Sciences, 4, Miusskaya Sq., Moscow, Russian Federation, 125047

[✉]SivtsevMA@mpi.ysn.ru

Abstract

In areas underlain by ice complex deposits, degradation of the protective layer activates cryogenic processes, leading to surface disturbance, alterations in ground heat and moisture regimes, and loss of permafrost landscape stability. Disturbed sites with shallow polygonal-wedge ice are especially vulnerable. Pre-winter irrigation is considered a method for the controlled modification of heat and moisture transfer in the upper part of ice-rich deposits of the ice complex in Central Yakutia. The method is intended to accelerate the formation of a transitional (protective) layer in areas disturbed by thermokarst. This study aimed to assess, through coupled modeling of heat and moisture transfer, the optimal pre-winter irrigation rate that creates conditions for the formation of an ice-saturated protective layer without over-wetting the seasonally thawed layer. To achieve this, the study draws on meteorological data from the Amga station and thermal and moisture monitoring data from experimental sites in the Amga River valley. The model was implemented in COMSOL Multiphysics and includes a heat transfer equation accounting for phase transitions using the apparent heat capacity method, as well as the Richards equation for variably saturated flow. A series of pre-winter irrigation scenarios ranging from 0 to 500 mm was calculated, with control of the transition to a quasi-steady-state regime. Under the considered conditions, the optimal pre-winter irrigation rate ensuring the formation of an ice-saturated protective layer was found to be no more than $W = 300$ mm, depending on the initial moisture conditions of the seasonally thawed layer. However, at $W = 100$ and 200 mm, the infiltration front does not reach the lower part of the seasonally thawed layer, whereas at $W = 400$ and 500 mm, the amount of unfrozen water begins to increase and the temperature of the underlying permafrost rises. Therefore, these results can be used in planning permafrost reclamation measures in areas with ground ice development, including the ice complex, and in selecting pre-winter irrigation regimes.

Keywords: shielding (protective) layer, pre-winter irrigation, ice complex, numerical modeling, Central Yakutia, COMSOL Multiphysics

Funding. The source data were obtained within the framework of a state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (reg. No. 126020216324-9) for the project “Geotemperature field and permafrost of the Asian part of Russia. Response of the thermal regime of permafrost rocks to climate change.” The numerical implementation was supported by Russian Science Foundation (grant No. 23-61-10032) and by the Pavel I. Melnikov Grant – 2025.

For citation: Sivtsev M.A., Zhirkov A.F., Osipov V.P. Assessment of the optimal pre-winter irrigation rate for creating a protective layer under ice complex distribution conditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2026;31(2):244–256. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-244-256> EDN: GZVUXH

Введение

В настоящее время в холодных регионах под влиянием климатических изменений и роста техногенной нагрузки наблюдается интенсивная деградация многолетнемерзлых пород [1–3]. Особенно уязвимы территории распространения сильнольдистых отложений ледового комплекса, где развитие термопросадочных деформаций и термокарста приводит к трансформации при-

родных и антропогенно преобразованных ландшафтов [4–6]. Последствия этих изменений проявляются в повреждении зданий и линейных сооружений, развитии просадочных форм рельефа и снижении пригодности сельскохозяйственных угодий [5, 7–10]. В связи с этим актуальной задачей является оценка возможности регулирования водно-теплового режима грунтов и формирования защитного слоя с по-

мощью мерзлотно-мелиоративных мероприятий [11, 12].

Район исследования

Исследуемый участок расположен в юго-восточной части Центральной Якутии, на левобережье долины р. Амга, вблизи с. Чапчылган (Амгинский район, Республика Саха (Якутия)) (рис. 1). Территория приурочена к поверхности надпойменной террасы (уровень абалахской террасы) в пределах Приленского плато. На участке распространен просадочный термокарстовый микрорельеф (бугристо-впадинные формы, локальные понижения), определяющий неоднородность тепло- и влагообмена в поверхностном слое [13].

Климат района резко-континентальный, с продолжительной холодной зимой и коротким теплым летом. По данным метеостанции Амга, среднегодовая температура воздуха составляет $-8,3^{\circ}\text{C}$, средняя температура самого холодного месяца, января, $-40,8^{\circ}\text{C}$, а самого теплого месяца, июля, $+17,6^{\circ}\text{C}$; среднегодовое количество осадков достигает 270 мм [12]. Для Центральной Якутии характерны холодный период продолжительностью до 7 месяцев и короткое лето продолжительностью около 3 месяцев; годовая сумма осадков, по литературным данным, изменяется в пределах 185–340 мм [14]. Основная

часть осадков приходится на теплый период года: для Центральной Якутии летние осадки составляют около 68 % годовой суммы [15]. Указанные климатические особенности определяют ведущую роль условий поверхности – снежного и растительного покровов, микрорельефа и увлажнения – в формировании температурного режима грунтов и мощности сезонно-талого слоя [15, 16].

Согласно мерзлотно-ландшафтной карте Якутии, район исследований приурочен к территории сплошного распространения многолетнемерзлых пород [17]. Геологический разрез участка представлен тонкодисперсными высокольдистыми отложениями супесчано-алевритового состава с развитием полигонально-жильных льдов (ПЖЛ) [18]. Высокая льдистость этих отложений предопределяет их чувствительность к малейшим изменениям условий тепло- и влагообмена на поверхности и повышает риск активизации термокарста [4].

В работах А.В. Павлова, Р.В. Десяткина, А.Н. Федорова, С.П. Варламова и др. для условий Центральной Якутии установлено, что сезонная динамика температуры грунтов и глубина протаивания во многом определяются условиями внешнего теплообмена, включая состояние растительного и снежного покровов [14, 16, 19, 20]. Для инженерных, сельскохозяйственных и природо-

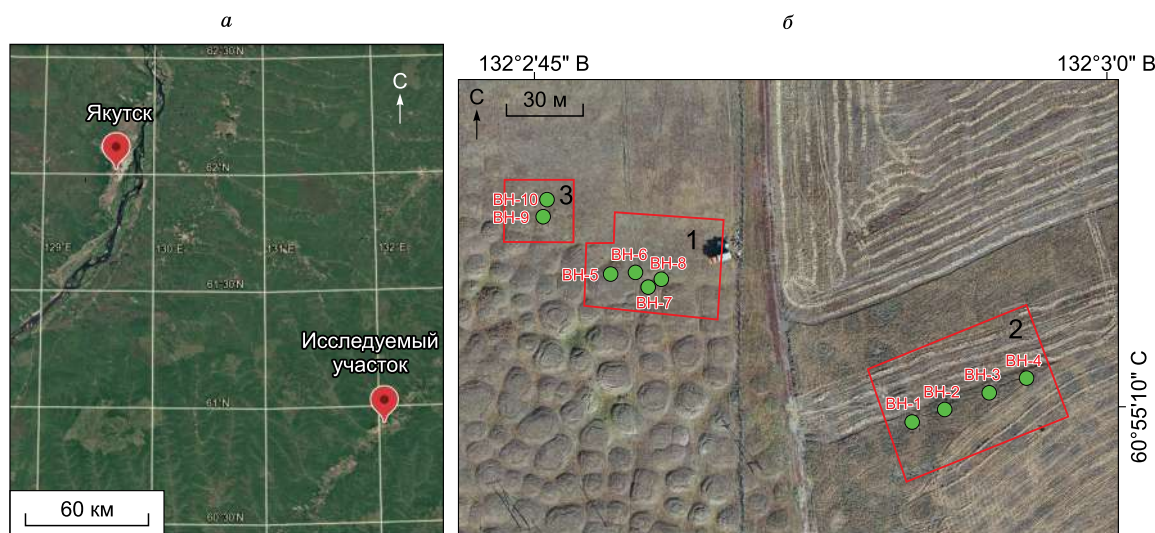


Рис. 1. Район исследований и схема расположения экспериментальных участков в долине р. Амга: а – положение исследуемого участка в Центральной Якутии; б – схема экспериментальной площадки с расположением участков и скважин. 1 – экспериментальный участок № 1, 2 – экспериментальный участок № 2, 3 – контрольный участок с естественными ненарушенными условиями. ВН-1...ВН-10 – термометрические скважины

Fig. 1. Study area and layout of the experimental plots in the Amga River valley: (a) location of the study site in Central Yakutia; (b) layout of the experimental site showing the plots and boreholes. 1 – experimental plot no. 1; 2 – experimental plot no. 2; 3 – control plot under natural undisturbed conditions. ВН-1–ВН-10 – thermometric boreholes

доохранных задач особый интерес представляют мерзлотно-мелиоративные методы, позволяющие регулировать водно-тепловой режим мерзлотных почв без развития негативных криогенных процессов. Основы изучения водного режима и орошения мерзлотных почв Центральной Якутии заложены в работах П.П. Гаврильева, А.А. Мандарова и И.С. Угарова, в которых рассмотрены вопросы лиманного орошения лугов, дождевания кормовых культур и регулирования влажности почвогрунтов в условиях многолетней мерзлоты [21, 22]. В развитие этого направления Д.Д. Саввиновым и соавторами изучено влияние осенних влагозарядковых поливов на запасы почвенной влаги, расход влаги и урожайность сельскохозяйственных культур в долине р. Лена [23]. Также показано, что влагозарядковый полив влияет на теплофизические свойства мерзлотной лугово-черноземной почвы, прежде всего на ее объемную теплоемкость [24]. Установлено, что при предзимнем увлажнении грунтов вода инфильтруется в деятельный слой, в последующем промерзает, увеличивая льдистость и потенциально формируя защитный слой с высокой теплоемкостью [11, 25, 26].

Цель работы – определить оптимальную норму предзимнего полива, обеспечивающую формирование льдонасыщенного защитного слоя и снижение риска развития термопросадочных деформаций и термокарста.

Материалы и методы

Исходные данные. В качестве параметров внешней среды использовались среднемесячные значения температуры воздуха, скорости ветра и высоты снежного покрова по метеостанции Амга за 2015–2024 гг. (табл. 1) по данным электронных архивов метеонаблюдений [27]. Скорость ветра использовалась для расчета коэффициента внешнего теплообмена в верхнем граничном условии. Для учета теплоизолирующего влияния снежного покрова коэффициент теплопроводности снега рассчитывался по зависимости Н.И. Шендера с учетом сезонного изменения плотности снега.

Выбор периода 2015–2024 гг. обусловлен необходимостью использования актуальных климатических характеристик, отражающих современные условия теплообмена на поверхности грунта в период потепления последних десятилетий [28].

Данные о температуре грунтов и их объемной влажности [29] использовались для задания начального температурного профиля (по средним значениям за сентябрь) и верификации теплового режима модели (табл. 2).

Геометрия расчетной области. Расчетная область построена на основе материалов натурных исследований [29] и представляет собой характерный вертикальный разрез с ПЖЛ в пределах надпойменной террасы. В рамках модели выделены основные инженерно-геологические элементы (ИГЭ) верхней части разреза: супесь (0–3 м), ниже ПЖЛ (3–10 м). Границы слоев для расчетной схемы усреднялись, поскольку фактическое залегание кровли ледяных жил варьирует по площади и обычно соответствует диапазону 2,5–3,2 м. При параметризации расчетного разреза кровля ПЖЛ была принята на глубине 3 м как характерное значение в пределах диапазона наблюдений, а нижняя граница расчетной области – на глубине 10 м.

Физические и теплофизические свойства слоев. Физические и теплофизические свойства слоев (плотность, пористость, теплопроводность и теплоемкость) задавались по материалам полевых и лабораторных исследований [12] для супеси и подстилающих ПЖЛ (табл. 3).

Теплоемкость и теплопроводность грунта задавались как функции температуры и фазового состава воды (жидкость/лед) с использованием

Таблица 1
Среднемесячные климатические параметры
за 2015–2024 гг.

Table 1
Average monthly climate parameters for 2015–2024

Дата	Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	Высота снежного покрова, м
Январь	–39,6	0,44	0,31
Февраль	–34,1	0,66	0,34
Март	–18,9	1,4	0,37
Апрель	–3,9	2,37	0,21
Май	8	2,8	0
Июнь	16,7	2,32	0
Июль	19,4	2,16	0
Август	15,2	1,85	0
Сентябрь	6	2,16	0
Октябрь	–6,2	2	0,07
Ноябрь	–25,9	1,08	0,17
Декабрь	–38,3	0,67	0,24

Таблица 2

Среднемесячные значения температуры грунтов и объемной влажности (сентябрь 2021 г.)

Table 2

Average monthly values of soil temperature and volumetric moisture content (September 2021)

Глубина, м	Температура, °С	Объемная влажность, м ³ /м ³	Глубина, м	Температура, °С	Объемная влажность, м ³ /м ³
0	5,78	0,09	2	1,27	0,3
0,2	5,84	0,21	2,2	0,32	
0,4	6,05		2,5	–0,38	
0,6	6,12	0,26	3	–0,54	
0,8	5,87		3,5	–0,61	
1	5,44	0,26	4	–0,65	
1,2	4,83		4,5	–0,67	
1,4	4,08		5	–0,74	
1,6	3,27	0,24	7,5	–0,82	
1,8	2,31		10	–0,99	

Таблица 3

Физические и теплофизические свойства слоев

Table 3

Physical and thermophysical properties of the layers

ИГЭ	ρ , кг/м ³	ϕ , д.е.	λ_{th} , Вт/(м·К)	λ_{fr} , Вт/(м·К)	c_{th} , Дж/(кг·К)	c_{fr} , Дж/(кг·К)
Супесь	1409	0,45	1,47	2,4	1650	1150
ПЖЛ (лед)	900	0,00	–	2,2	–	2100

сглаженной функции количества незамерзшей воды, описывающей переход от талого состояния к мерзлоте в интервале фазового перехода около 0 °С. Это обеспечивает устойчивое численное решение и корректный учет фазового перехода [30–32].

В расчетах использовались лабораторные значения теплофизических параметров талого и мерзлого грунта (см. табл. 3), а переход между ними задавался по формулам

$$c_{eff}(T) = c_{th} \cdot f_l(T) + c_{fr} \cdot (1 - f_l(T)), \quad (1)$$

$$\lambda_{eff}(T) = \lambda_{th} \cdot f_l(T) + \lambda_{fr} \cdot (1 - f_l(T)), \quad (2)$$

где $c_{eff}(T)$ – эффективная удельная теплоемкость грунта, $\lambda_{eff}(T)$ – эффективный коэффициент теплопроводности грунта, c_{th} и λ_{th} – соответствующие характеристики талого грунта, c_{fr} и λ_{fr} – соответствующие характеристики мерзлого грунта, $f_l(T)$ – сглаженная безразмерная функция количества незамерзшей воды, принимающая значения от 0 до 1 в интервале фазового перехода около 0 °С, T – температура грунта. Использование формул (1) и (2) позволяет задать непрерывное

изменение теплофизических параметров грунта в интервале фазового перехода.

Численная модель и уравнения

Расчеты выполнены в COMSOL Multiphysics, в одномерной постановке по глубине (ось x направлена вниз от поверхности), с использованием модулей теплопереноса в пористой среде и влаготеплопереноса (уравнение Ричардса) [32].

Основой модуля теплопереноса в пористой среде является уравнение теплопереноса

$$\rho \cdot c_{eff}(T, \theta) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{eff}(T, \theta) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho_w \cdot c_w \cdot q \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (3)$$

где t – время, x – вертикальная координата (глубина), ρ – эффективная плотность пористой среды, q – фильтрационный поток (скорость Дарси), ρ_w и c_w – плотность и теплоемкость воды. Учет фазового перехода реализован методом кажущейся теплоемкости, что обеспечивает учет скрытой теплоты при промерзании/оттаивании грунта [30–32].

Изменения теплофизических свойств и фазового перехода описываются выражениями

$$c_{eff}(T, \theta) = c_0(\theta) + L_f \frac{\partial \theta_i(T)}{\partial T}, \quad (4)$$

$$\lambda_{eff}(T, \theta) = \lambda_{th}(\theta) \cdot f_l(T) + \lambda_{fr}(\theta) \cdot (1 - f_l(T)), \quad (5)$$

здесь L_f – удельная теплота фазового перехода; θ – суммарное влагосодержание (объемная влажность). Связь фазового состава воды: $\theta = \theta_l + \theta_i$, где θ_l – количество незамерзшей воды, θ_i – льдистость. Величина определялась по общему объемному влагосодержанию с учетом функции количества незамерзшей воды. При отрицательных температурах θ_l соответствует количеству незамерзшей воды в порах грунта [30–32].

Перенос и перераспределение влаги в модели описываются уравнением Ричардса

$$\partial \theta / \partial t + \partial q / \partial x = S, \quad (6)$$

$$q = -K(h) \cdot (\partial h / \partial x + 1) \quad (7)$$

где h – напор (капиллярное давление), $K(h)$ – ненасыщенная гидравлическая проводимость, S – источники/стоки (импульс орошения на верхней границе). Слагаемое «+1» в правой части (7) соответствует гравитационному члену при оси x , направленной вниз [32, 33].

Гидрофизические зависимости ван Генухтена–Муалема использовались для описания кривой водоудержания и ненасыщенной гидравлической проводимости грунта:

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) S_e(h), \quad (8)$$

$$S_e(h) = [1 + (\alpha \cdot |h|)^n]^{-m}, \quad m = 1 - 1/n, \quad (h < 0), \\ S_e = 1 (h \geq 0), \quad (9)$$

$$K(h) = K_s \cdot S_e^l \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2, \quad (10)$$

здесь θ_s и θ_r – влажности насыщения и остаточная влажность, α , n – параметры кривой водоудержания, l – параметр Муалема, K_s – насыщенная гидравлическая проводимость. В расчетах приняты значения $\alpha = 2,5$, $n = 1,55$ и $l = 0,5$. При задании K_s использованы классовые оценки для супеси по подходу ROSETTA [34–37].

Граничные условия. Для тепловой задачи брались следующие граничные условия:

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{T_s - T_a}{\frac{1}{h_c} + \frac{h_s}{\lambda_s}}, \quad (11)$$

где T_s – температура поверхности грунта, T_a – температура воздуха, h_c – коэффициент внешнего теплообмена, h_s – мощность снежного покрова, λ_s – коэффициент теплопроводности снега. Знаменатель в правой части уравнения (11) представляет собой суммарное термическое сопротивление верхней границы, включающее сопротивление конвективного теплообмена $\frac{1}{h_c}$ и термическое сопротивление снежного покрова $\frac{h_s}{\lambda_s}$.

При отсутствии снежного покрова $h_s = 0$, и граничное условие сводится к обычному условию конвективного теплообмена между поверхностью грунта и атмосферой.

Коэффициент внешнего теплообмена h_c определялся по среднемесячной скорости ветра $U(t)$ по метеостанции Амга. Для расчета использовалась эмпирическая зависимость

$$h_c(t) = 6,16 + 4,19U(t), \quad (12)$$

где $h_c(t)$ – коэффициент внешнего теплообмена, Вт/(м²·К); $U(t)$ – среднемесячная скорость ветра, м/с. В расчетах значения принимались по данным метеостанции Амга за 2015–2024 гг. (см. табл. 1). Таким образом, изменение коэффициента внешнего теплообмена во времени учитывалось через сезонную изменчивость скорости ветра.

Коэффициент теплопроводности снега λ_s рассчитывался по эмпирической зависимости Н.И. Шендера [38] как функция плотности снега ρ_s :

$$\lambda_s = 0,06 + 0,564\rho_s + 1,31\rho_s^2. \quad (13)$$

В расчетах снежный покров рассматривался как промежуточная теплоизолирующая среда, регулирующая теплообмен между поверхностью грунта и приземным слоем атмосферы в холодный период года. Его влияние задавалось через эквивалентное термическое сопротивление

$$R_s(t) = \frac{h_s(t)}{\lambda_s(t)}, \quad (14)$$

где $h_s(t)$ – мощность снежного покрова, $\lambda_s(t)$ – коэффициент теплопроводности снега. Параметры снежного покрова задавались помесечно: при изменении мощности и плотности снега пересчитывался коэффициент $\lambda_s(t)$ по зависимости Н. И. Шендера [38]. Это позволяет учитывать сезонное уплотнение снега и связанное с ним увеличение его теплопроводности в течение зимнего периода.

Таким образом, в модели учитывалась сезонная роль снежного покрова в теплообмене: в октябре–феврале он ограничивает проникновение холода в грунт, а в марте–апреле замедляет отвод накопленного холода из грунта. Направление теплового потока определяется разностью температур между поверхностью грунта и воздухом, а его величина – суммарным термическим сопротивлением верхней границы.

На нижней границе расчетной области ($x = 10$ м) принималось граничное условие первого рода в виде постоянной температуры $-0,99$ °С. Такое задание соответствует фоновому температурному режиму нижней части разреза и позволяет исключить искажение расчетов сезонного теплообмена за счет искусственного влияния нижней границы.

Для уравнения Ричардса задавалось следующее граничное условие:

$$q \cdot n = -N(t), \quad \text{при } (x = 0), \quad (15)$$

где $N(t)$ – заданный влагоприток (интенсивность инфильтрации) в период предзимнего орошения. Вне периода орошения принималось отсутствие притока.

$$W = \int_{t_1}^{t_2} N(t) dt, \quad (16)$$

где W – суммарная норма орошения (мм), $[t_1; t_2]$ – временной интервал увлажнения. В работе использовался импульс длительностью $\Delta t = 1$ сутки.

На нижней границе влажностной задачи принималось условие нулевого влагопотока.

Начальные условия. Температурное поле задавалось по профилю, соответствующему наблюдениям за сентябрь 2021 г. (см. табл. 2). Распределение влажности в расчетной области принималось по результатам натурных исследований и использовалось как исходное условие для расчета влагопереноса. Значения объемного влагосодержания по глубине приведены в табл. 2.

Сценарии расчетов и план вычислительного эксперимента. Численный эксперимент выполнялся для разных сценариев предзимнего полива, в которых изменялась суммарная норма увлажнения (W) при фиксированной длительности импульса Δt . Все остальные входные данные и параметры модели сохранялись одинаковыми, что обеспечивает корректное сопоставление сценариев. На основе анализа натурных и теоретических исследований [11, 21–24] по влагонасыще-

нию почвогрунтов сезонно-талого слоя в данной работе рассмотрены шесть расчетных сценариев, в которых варьировалась суммарная норма предзимнего полива (W): 0 (контрольная), 100, 200, 300, 400 и 500 мм. Длительность импульса увлажнения принималась равной одним суткам. Предзимний полив в каждом сценарии задавался однократно в виде кратковременного импульса увлажнения длительностью одни сутки. Ежегодное повторение полива в течение всего расчетного периода не предусматривалось. До момента задания импульса влагоприток на верхней границе отсутствовал. Таким образом, расчетный период использовался для выхода модели на квазистационарный сезонный режим и последующей оценки отклика грунтов на однократное предзимнее увлажнение. Сценарий $W = 500$ мм включен как завышенный для оценки возможного ухудшения мерзлотных условий при переувлажнении [22].

Для количественной оценки эффективности предзимнего увлажнения и выбора оптимальной нормы полива использовались два взаимосвязанных критерия: прирост объемной льдистости в нижней части сезонно-талого слоя и отсутствие избыточного накопления незамерзшей воды. Оценка выполнялась для целевого интервала глубин от $x_1 = 2,5$ м до $x_2 = 2,9$ м в марте 4-го расчетного года, т. е. после завершения зимнего промерзания.

Средняя объемная льдистость в целевом интервале определялась как

$$I(W) = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \theta_i(x, t_m, W) dx, \quad (17)$$

где $I(W)$ – средняя объемная льдистость в целевом интервале при норме полива W ; θ_i – объемное содержание льда; x – глубина; t_m – расчетный момент времени, соответствующий марту 4-го года; W – суммарная норма предзимнего полива.

Прирост льдистости относительно контрольного сценария без полива рассчитывался по выражению

$$\Delta I(W) = I(W) - I(0), \quad (18)$$

где $I(0)$ – средняя объемная льдистость в контрольном сценарии. Положительное значение $I(W)$ рассматривалось как показатель формирования льдонасыщенного горизонта в зоне защитного слоя.

Для оценки переувлажнения использовалось среднее содержание незамерзшей воды в том же интервале

$$L(W) = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} \theta_l(x, t_m, W) dx, \quad (19)$$

где $L(W)$ – среднее содержание незамерзшей воды; θ_l – количество незамерзшей воды.

Избыточное увлажнение оценивалось по приросту количества незамерзшей воды относительно контрольного сценария

$$\Delta L(W) = L(W) - L(0), \quad (20)$$

где $L(0)$ – среднее количество незамерзшей воды в контрольном сценарии.

Оптимальной считалась такая норма предзимнего полива, при которой обеспечивается положительный прирост льдистости в целевом интервале при отсутствии выраженного роста содержания незамерзшей воды и сохранении отрицательных температур в нижней части сезонно-талого слоя и на кровле ПЖЛ. При сравнении расчетных сценариев предпочтение отдавалось варианту, обеспечивающему наибольший прирост льдистости без признаков переувлажнения.

Для каждого сценария выполнялся численный расчет с одинаковыми климатическими входными данными (температура воздуха, снег и параметры внешнего теплообмена). Сопоставление проводилось по одинаковым календарным датам и по ключевым сезонам: конец теплого периода (сентябрь) и завершение промерзания СТС (март).

Калибровка и проверка стационарности. Для контрольного сценария была проведена проверка стационарности расчетного решения. Установлено, что усредненные по сентябрю температурные профили 3-го и 4-го расчетных годов в интервале глубин 0–10 м различаются не более чем на 0,04 °С. Это свидетельствует о выходе модели на квазистационарный сезонный режим и позволяет использовать 4-й расчетный год как репрезентативный для вычислительного эксперимента (рис. 2).

Калибровка модели выполнялась поэтапно. На первом этапе согласовывался тепловой режим контрольного сценария за счет уточнения параметров поверхностных условий, включая теплообмен с атмосферой и учет снежного покрова. На втором этапе уточнялись гидрофизические параметры переменного-насыщенной фильтрации, обеспечивающие воспроизведение наблюдаемой сезонной динамики температуры, глубины про-

таивания и реалистичного отклика на импульс предзимнего увлажнения.

Результаты и обсуждение

Для оценки эффекта увлажнения рассматривались глубина проникновения фронта влаги, изменение температуры грунтов в период максимального зимнего промерзания, содержание незамерзшей воды и распределение льдистости по глубине. Количественное сопоставление сценариев выполнялось по критериям прироста льдистости и ограничения накопления незамерзшей воды, рассчитанным по формулам (17)–(20).

Анализ динамики объемной влажности по глубине СТС показал, что горизонт на глубине 2,0 м является репрезентативным для оценки глубины проникновения фронта предзимнего полива, поскольку соответствует верхней части фронта протаивания (рис. 3). При норме 100 мм изменение влажности СТС слабо выражено, что свидетельствует о недостижении фронта инфильтрации до рассматриваемого горизонта. При норме полива 200 мм фронт увлажнения достигает рассматриваемого горизонта с запаздыванием и в меньшем объеме. Следовательно, указанные нормы не обеспечивают увлажнение нижней части СТС и не могут рассматриваться как достаточные для формирования защитного слоя. При поливе 300–500 мм, напротив, наблюдается отчетливое увеличение объемной влажности, указывающее на достижение фронтом увлажнения нижней части СТС.

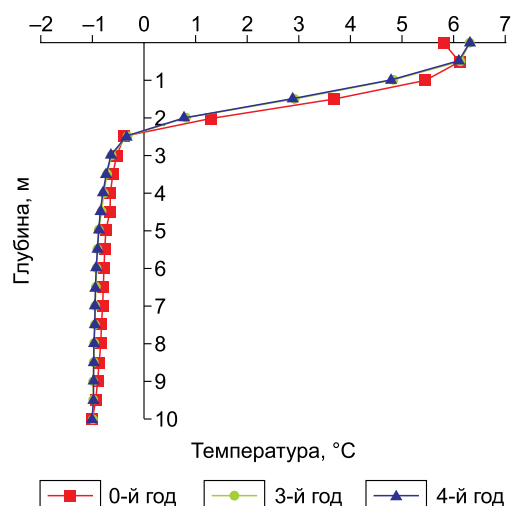


Рис. 2. Стационарность температурного профиля в контрольном варианте (сентябрь): 0-й, 3-й и 4-й годы

Fig. 2. Stationarity of the temperature profile in the control scenario (September): years 0, 3, and 4

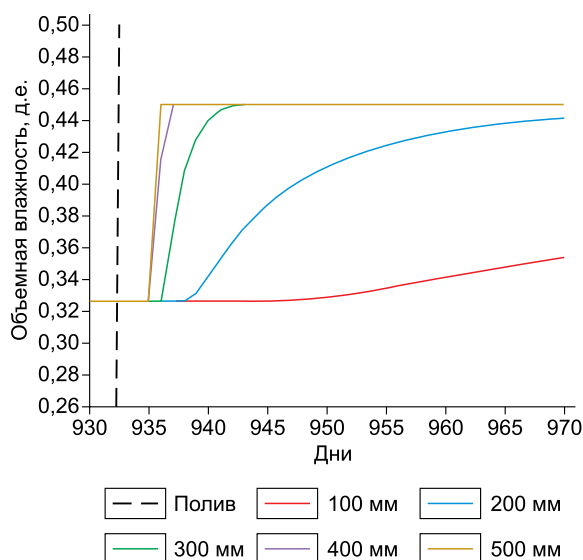


Рис. 3. Динамика объемной влажности на глубине 2,0 м при разных сценариях предзимнего полива

Fig. 3. Dynamics of volumetric moisture content at a depth of 2.0 m under different pre-winter irrigation scenarios

Температурные профили последней декады марта (при максимальном промораживании СТС) 4-го года расчетов, после выхода на стационарный режим, демонстрируют тепляющий эффект при увеличении норм предзимнего полива (рис. 4). Наиболее существенные различия температур между сценариями фиксируются в интервале 2,5–3,0 м. С увеличением нормы полива температура ММП в этой части разреза повышается, стремясь к околонулевым значениям, а при сценариях 400 и 500 мм температура переходит в область положительных значений. Это указывает на то, что при избыточном увлажнении значительная часть зимнего выхолаживания расходуется не на понижение температуры, а на фазовые переходы воды. Ниже по разрезу различия между сценариями постепенно сглаживаются. Следовательно, влияние предзимнего полива локализуется главным образом в пределах СТС и верхней части подстилающих многолетнемерзлых пород, т. е. в зоне формирования защитного слоя.

Дополнительным критерием оценки эффективности является содержание незамерзшей воды в слое 2,5–2,9 м в марте 4-го года (рис. 5). При нормах 100 и 200 мм содержание незамерзшей воды в рассматриваемом слое остается минимальным. Это объясняется тем, что фронт увлажнения не достигает рассматриваемого горизонта

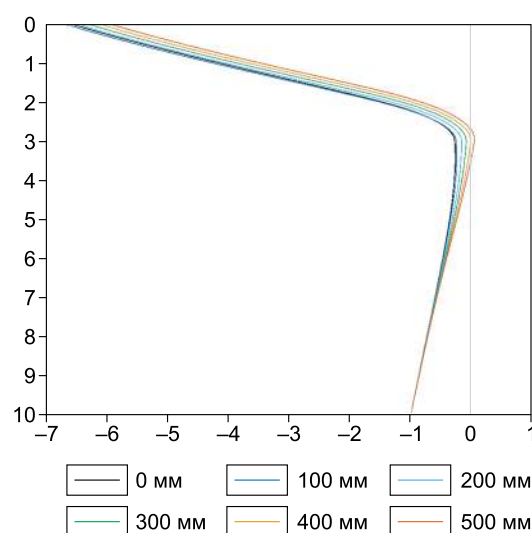


Рис. 4. Температурные профили грунтов в конце марта 4-го года расчета при различных нормах предзимнего полива

Fig. 4. Ground temperature profiles at the end of March of the 4th simulation year under different pre-winter irrigation rates

при этих значениях W (см. рис. 3). В сценариях 300–500 мм количество незамерзшей воды возрастает по мере увеличения нормы полива, причем наиболее выраженный рост характерен для 400 и 500 мм. Это свидетельствует о переувлажнении нижней части СТС. Часть привнесенной влаги сохраняется в жидкой фазе и не переходит в лед. В результате эффективность дополнительного промораживания снижается. Следовательно, чрезмерное увеличение нормы полива не только не дает пропорционального положительного эффекта, но и ухудшает условия формирования защитного слоя.

Распределение льдистости по глубине до 3 м в конце марта 4-го года позволяет оценить изменение фазового состояния влаги в зоне фронта протаивания (рис. 6). При нормах 100 и 200 мм льдистость грунтов незначительно отличается от контрольного сценария, поскольку увлажнение не достигает нижней части сезонно-талого слоя. При нормах 400 и 500 мм в интервале около 2 м отмечается выраженное увеличение льдистости. К глубине 3 м льдистость снижается до минимальных значений. Это объясняется ростом количества незамерзшей воды (см. рис. 5), что указывает на переувлажнение и снижение общей эффективности промораживания. Сценарий 300 мм занимает промежуточное положение

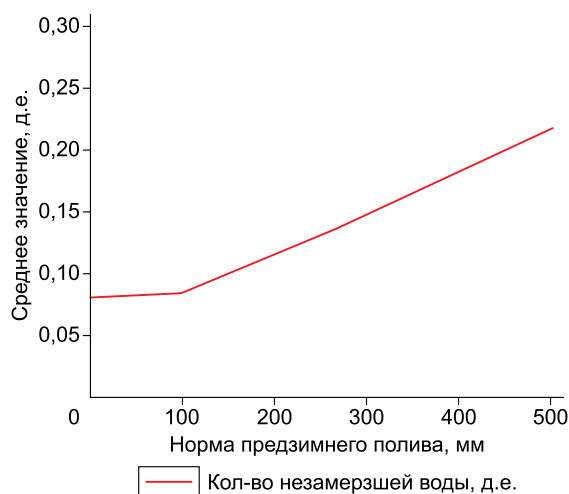


Рис. 5. Среднее содержание незамерзшей воды в слое 2,5–2,9 м в марте 4-го года расчета при различных нормах предзимнего полива

Fig. 5. Average unfrozen water content in the 2.5–2.9 m layer in March of the 4th simulation year under different pre-winter irrigation norms

и обеспечивает наиболее рациональное увеличение льдистости в рассматриваемом слое.

Таким образом, сопоставление результатов по всем рассмотренным показателям позволяет дать однозначную оценку изученным сценариям. Нормы предзимнего полива 100 и 200 мм следует признать недостаточными, поскольку фронт увлажнения не достигает нижней части СТС. Нормы 400 и 500 мм, напротив, обеспечивают глубокое проникновение влаги, однако сопровождаются переувлажнением и избыточным ростом количества незамерзшей воды. Наиболее рациональной для исследуемых условий является норма 300 мм, так как именно этот сценарий обеспечивает достижение влагой нижней части СТС, способствуя увеличению льдистости в зоне формирования защитного слоя и при этом не сопровождается столь выраженным ростом количества незамерзшей воды.

Полученные результаты отражают закономерности, характерные для типичных условий ледового комплекса Центральной Якутии, и поэтому рассматриваемое значение следует интерпретировать как теоретически обоснованную рациональную норму предзимнего полива для исследуемого типа разреза. Вместе с тем эта величина может изменяться в зависимости от исходного влагосодержания сезонно-талого слоя, литоло-

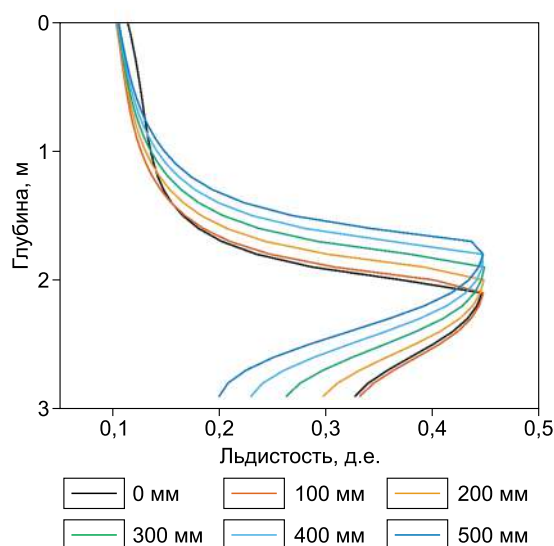


Рис. 6. Распределение льдистости по глубине в марте 4-го года расчета при различных нормах предзимнего полива

Fig. 6. Depth distribution of ice content in March of the 4th simulation year under different pre-winter irrigation norms

гического строения и конкретных метеорологических условий, что требует дальнейшей проверки в натурных экспериментах.

Следует отметить, что выполненное исследование имеет ряд ограничений. Модель реализована в одномерной постановке, а гидрофизические зависимости заданы по литературным и расчетным данным без прямого лабораторного определения кривых водоудержания для каждого слоя. Кроме того, в расчетах не учитывались засоленность грунтов и химический состав порового раствора, которые могут влиять на влагоперенос, фазовые переходы и распределение льда и незамерзшей воды в грунтовой толще. В данной постановке суммарная солнечная радиация и альbedo поверхности также не задавались как самостоятельные граничные условия; их влияние учитывалось косвенно через среднемесячные значения температуры воздуха и параметры поверхностного теплообмена. Более детальный учет радиационного баланса, сезонной изменчивости альbedo, засоленности и гидрофизических характеристик грунтов следует рассматривать как направление дальнейшего уточнения модели.

Закключение

Выполненное сопряженное моделирование тепло- и влагопереноса позволило оценить вли-

ание различных норм предзимнего полива на формирование льдонасыщенного защитного слоя в условиях распространения ледового комплекса Центральной Якутии. Разработанная численная модель учитывает теплоперенос с фазовым переходом воды и влагоперенос в переменнонасыщенной зоне, что позволяет анализировать изменение температурного режима, льдистости и содержания незамерзшей воды в нижней части сезонно-талого слоя.

Результаты расчетов показали, что при нормах предзимнего полива 100 и 200 мм фронт инфильтрации в рассматриваемых условиях не достигает нижней части сезонно-талого слоя. Следовательно, такие объемы увлажнения недостаточны для выраженного увеличения льдистости в зоне формирования защитного слоя над полигональными льдами.

Наиболее рациональной для условий Центральной Якутии является норма предзимнего полива не более $W = 300$ мм. Данная норма обеспечивает существенный рост льдистости в нижней части сезонно-талого слоя и способствует формированию льдонасыщенного защитного слоя над ПЖЛ. При этом эффективность такой нормы зависит от начального влагосодержания сезонно-талого слоя.

Увеличение нормы предзимнего полива до 400 и 500 мм не приводит к сопоставимому дополнительному росту льдистости. Напротив, такие сценарии сопровождаются увеличением содержания незамерзшей воды в зимний период и повышением температуры подстилающих многолетнемерзлых пород, что указывает на признаки переувлажнения и снижение эффективности промораживания. Таким образом, чрезмерное увеличение объема предзимнего увлажнения может ухудшать условия формирования защитного слоя.

Список литературы / References

1. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzli J., et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nat. Commun.* 2019;10:264. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4> EDN: HTZKKV
2. Smith S.L., O'Neill H.B., Isaksen K., et al. The changing thermal state of permafrost. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2022;(3): 10–23. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00240-1> EDN: JEAJAX
3. Jorgenson M.T., Romanovsky V., Harden J., et al. Resilience and vulnerability in response to climate warming. *Can. J. For. Res.* 2010;40(7):1219–1236. <https://doi.org/10.1139/X10-060>
4. Strauss J., Schirmermeister L., Grosse G., et al. Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability. *Earth-Science Reviews.* 2017;(172):75–86. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.007> EDN: XOFQPD

5. Kokelj S.V., Jorgenson M.T. Advances in thermokarst research. *Permafrost & Periglacial.* 2013;(24):108–119. <https://doi.org/10.1002/ppp.1779> EDN: RIJVVN
6. Jorgenson M.T., Shur Y.L., Pullman E.R. Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska. *Geophysical Research Letters.* 2006;(33):2005GL024960. <https://doi.org/10.1029/2005GL024960> EDN: MAUSDB
7. Hjort J., Karjalainen O., Aalto J., et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. *Nat. Commun.* 2018;(9):5147. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07557-4> EDN: ANNAYC
8. Streletskiy D.A., Suter L.J., Shiklomanov N.I., et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environ. Res. Lett.* 2019;14(2):025003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf5e6> EDN: AHATIK
9. Desyatkin R., Filippov N., Desyatkin A., et al. Degradation of arable soils in Central Yakutia: Negative consequences of global warming for Yedoma landscapes. *Front Earth Sci.* 2021;9:683730. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.683730> EDN: IVTCUA
10. Porfiriev B.N., Eliseev D.O., Streletskiy D.A. Economic assessment of permafrost degradation effects on the housing sector in the Russian Arctic. *Her. Russ. Acad. Sci.* 2021;91:17–25. <https://doi.org/10.1134/S1019331621010068> EDN: OSTUWV
11. Shur Y., Hinkel K.M., Nelson F.E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science. *Permafrost & Periglacial.* 2005;16:5–17. <https://doi.org/10.1002/ppp.518>
12. Zhirkov A., Sivtsev M., Lytkin V., et al. An Assessment of the possibility of restoration and protection of territories disturbed by thermokarst in Central Yakutia, Eastern Siberia. *Land.* 2023;12(1):197. <https://doi.org/10.3390/land12010197> EDN: CSHWRO
13. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М.: Изд-во Акад. наук СССР; 1959. 141 с.
14. Solovyev P.A. *Cryolithozone of the northern part of the Lena Plateau.* Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR; 1959. 144 p. (In Russ.)
15. Desyatkin A., Fedorov P., Filippov N., et al. Climate change and its influence on the active layer depth in Central Yakutia. *Land.* 2020;10(1):3. <https://doi.org/10.3390/land10010003> EDN: BXIECU
16. Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Influence of climate change on the thermal condition of Yakutia's permafrost landscapes (Chabyda Station). *Land.* 2020;9(5):132. <https://doi.org/10.3390/land9050132> EDN: ESSUDQ
17. Fedorov A.N., Konstantinov P.Y., Vasilyev N.F., et al. The influence of boreal forest dynamics on the current state of permafrost in Central Yakutia. *Polar Science.* 2019;22:100483. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2019.100483> EDN: LXAZDK
18. Fedorov A.N., Vasilyev N.F., Torgovkin Y.I., et al. Permafrost-landscape map of the Republic of Sakha (Yakutia) on a Scale 1:1,500,000. *Geosciences.* 2018;8(12):465. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120465> EDN: WUVMKM
19. Ulrich M., Jongejans L.L., Grosse G., et al. Geochemistry and weathering indices of Yedoma and Alas deposits beneath thermokarst lakes in Central Yakutia. *Front. Earth Sci.* 2021;9:704141. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.704141> EDN: KEYGXZ
20. Варламов С.П., Жирков А.Ф., Находкин Д.А. Температурный режим почвогрунтов при нарушении покровов

в современных климатических условиях Центральной Якутии. *Наука и образование*. 2017;(4):65–71. EDN: YUYWZM

Varlamov S.P., Zhirkov A.F., Nakhodkin D.A. Ground temperature regime after surfer disturbance under current climatic conditions in Central Yakutia. *Nauka i Obrazovanie*. 2017;(4):65–71. EDN: YUYWZM (In Russ.)

20. Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск: Якутское кн. изд-во; 1975.

Pavlov A.V. Heat exchange between soil and the atmosphere in the northern and temperate latitudes of the USSR. Yakutsk: Yakutsk Publishing House; 1975. (In Russ.)

21. Гаврильев П.П., Мандаров А.А. Лиманное орошение лугов в Центральной Якутии. Новосибирск: Наука; 1976. 165 с.

Gavriliev P.P., Mandarov A.A. Liman irrigation of meadows in Central Yakutia. Novosibirsk: Nauka. Sib.; 1976. 165 p. (In Russ.)

22. Угаров И.С., Мандаров А.А. Орошение дождеванием кормовых культур в Центральной Якутии. Якутск: ИМЗ СО РАН; 2000. 128 с.

Ugarov I.S., Mandarov A.A. Sprinkler irrigation of forage crops in Central Yakutia. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute of SB RAS; 2000. 128 p. (In Russ.)

23. Саввинов Д.Д., Саввинов Г.Н., Макаров В.С. и др. Влияние осенних влагозарядковых поливов на расход почвенной влаги и урожайность овса в долине р. Лена. *Наука и образование*; 2016;(4):140–143. EDN: XYFZLV

Savvinov D.D., Savvinov G.N., Makarov V.S., et al. Influence of autumn irrigation to the consumption of soil moisture and oats green mass value in the Lena River Valley. *Nauka i obrazovanie*. 2016;(4):140–143. (In Russ.) EDN: XYFZLV

24. Макаров В.С., Саввинов Д.Д., Саввинов Г.Н. Влияние влагозарядкового полива на теплофизические свойства мерзлотной лугово-черноземной почвы в долине р. Лена. *Наука и образование*. 2017;(3):107–110. EDN: ZPDREZ

Makarov V.S., Savvinov D.D., Savvinov G.N. Influence of water supply irrigation on thermophysical properties of permafrost meadow-chernozem soil in the Lena River Valley. *Nauka i obrazovanie*. 2017;(3):107–110. (In Russ.) EDN: ZPDREZ

25. Shur Y.L., Jorgenson M.T. Patterns of permafrost formation and degradation in relation to climate and ecosystems. *Permafrost & Periglacial*. 2007;18(1):7–19. <https://doi.org/10.1002/ppp.582> EDN: XUQXVQ

26. Жирков А.Ф., Железняк М.Н., Пермяков П.П. и др. Влияние инфильтрации жидких атмосферных осадков на формирование температурного режима мерзлых грунтов. *Вестник Забайкальского государственного университета*; 2018;24(6):4–14. EDN: USZCTH

Zhirkov A.F., Zheleznyak M.N., Permyakov P.P., et al. Infiltration influence of liquid atmospheric precipitation on the formation of the temperature regime of frozen soils. *Transbaikalian State University Journal*. 2018;24(6):4–14. (In Russ.) <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2018-24-6-4-14> EDN: USZCTH (In Russ.)

27. Архив погоды в Амге. Режим доступа: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Амге (дата обращения: 20.02.2026)

Weather archive for Amga. Available at: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Амге (accessed:20.02.2026)

28. Справочник по климату СССР. Якутская АССР. Вып. 24. Л.: Гидрометеиздат; 1989.

Reference book on the climate of the USSR. Yakut ASSR. Issue 24. Leningrad: Hydrometeoizdat Publ.; 1989. (In Russ.)

29. Сивцев М.А., Жирков А.Ф. Особенности динамики температуры грунтов на участке восстановления нарушенных термокарстом территорий. В кн.: *Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в арктических и субарктических территориях (Тэгэа-2023): Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РСФСР и ЯАССР, д.т.н., профессора Н.С. Иванова, г. Якутск, 06–09 декабря 2023 г.* Якутск: Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова; 2023. С. 120–122. EDN: SCJCOH

Sivtsev M.A., Zhirkov A.F. Features of soil temperature dynamics at the restoration study site of thermokarst – disturbed territories. In: *Actual issues of thermophysics, power engineering and gas hydrodynamics in Arctic and Subarctic territories (TEGUA-2023): Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, Yakutsk, December 6–9, 2023.* Yakutsk: M.K. Ammosov North-Eastern Federal University; 2023, pp. 120–122. (In Russ.) EDN: SCJCOH

30. Harlan R.L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. *Water Resources Research*. 1973;9:1314–1323. <https://doi.org/10.1029/WR009i005p01314>.

31. Dall'Amico M., Endrizzi S., Gruber S., et al. A robust and energy-conserving model of freezing variably-saturated soil. *The Cryosphere*. 2011;5:469–484. <https://doi.org/10.5194/tc-5-469-2011> EDN: OLODKH

32. COMSOL AB. COMSOL Multiphysics v. 6.3: Subsurface Flow Module User's Guide; Heat Transfer Module User's Guide. Stockholm, Sweden; 2024

33. Richards L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*. 1931;1:318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>.

34. Van Genuchten M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Soc. of Amer. J.* 1980;44:892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>.

35. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*. 1976;12:513–522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>.

36. Schaap M.G., Leij F.J., Van Genuchten M.Th. rosetta : a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*. 2001;251(3-4):163–176. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00466-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00466-8) EDN: ARBJNJ

37. ROSETTA model: documentation and reference information. USDA-ARS 2026. Available at: <https://www.ars.usda.gov/pacific-west-area/riverside-ca/agricultural-water-efficiency-and-salinity-research-unit/docs/model/rosetta-model/>. (accessed: 20.02.2026)

38. Шендер Н.И. Рекомендации по прогнозу температурного режима грунтов: на примере центрального и восточного участков зоны БАМа. Якутск: ИМЗ СО АН СССР; 1986. 58 с.

Shender N.I. Recommendations for forecasting the ground temperature regime (a case study of the central and eastern sections of the BAM zone). Yakutsk: Permafrost Institute, Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR; 1986. 58 p. (In Russ.)

Об авторах

СИВЦЕВ Максим Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории геотермии криолитозоны, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, <https://orcid.org/0000-0003-4032-3675>, SPIN: 1078592, e-mail: sivtsevma@mpi.ysn.ru

ЖИРКОВ Александр Федотович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геотермии, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, <https://orcid.org/0000-0001-6721-5338>, SPIN: 3281-5147, e-mail: zhirkov_af@mail.ru

ОСИПОВ Владимир Петрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела № 16, сектора № 3, Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, <https://orcid.org/0000-0002-8237-1053>, SPIN: 7933-1651, e-mail: osipov@keldysh.ru; vpo53@mail.ru

Вклад авторов

Сивцев М.А. – разработка концепции, методология, программное обеспечение, верификация данных, проведение статистического анализа, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, визуализация; **Жирков А.Ф.** – разработка концепции, методология, редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта, получение финансирования; **Осипов В.П.** – проведение исследования, редактирование рукописи, получение финансирования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

SIVTSEV, Maxim Alexeevich, Junior Researcher, Laboratory of Permafrost Geothermics, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0003-4032-3675>, SPIN: 1078592, e-mail: sivtsevma@mpi.ysn.ru

ZHIRKOV, Alexander Fedotovitch, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Laboratory of Permafrost Geothermics, Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0001-6721-5338>, SPIN: 3281-5147, e-mail: zhirkov_af@mail.ru

OSIPOV, Vladimir Petrovich, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Department No. 16, Sector No. 3, Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-8237-1053>, SPIN: 7933-1651, e-mail: osipov@keldysh.ru

Authors' contribution

Sivtsev M.A. – conceptualization, methodology, software, validation, formal analysis, investigation, data curation, writing – original draft, visualization; **Zhirkov A.F.** – conceptualization, methodology, writing – review & editing, supervision, project administration, funding acquisition; **Osipov V.P.** – investigation, writing – review & editing, funding acquisition

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 04.03.2026

Поступила после рецензирования / Revised 23.04.2026

Принята к публикации / Accepted 12.05.2026