

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

УДК 624.130:51.313

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-609-617>



Оригинальная статья

Высокоэффективная теплоизоляция грунтовой дамбы в г. Якутск

О. И. Алексеева^{✉,1}, К. Н. Большев², А. В. Литовко¹

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

[✉]o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru

Аннотация

Высокоэффективные теплоизоляционные материалы широко используются при строительстве в криолитозоне для тепловой защиты лдотехнических сооружений (плотин, дамб, хранилищ, аэродромов, дорог и др.), а также в целях управления природными и техногенными криогенными процессами и явлениями (наледееобразованием, сезонным промерзанием-протаиванием и др.). Исследование этих процессов является важным и актуальным для регионов Арктики и Субарктики. Целью эксперимента в 1982–1986 гг. было создание противофильтрационной мерзлотной завесы в теле и основании грунтовой дамбы на территории Института мерзлотоведения СО АН СССР (РАН) (г. Якутск) с помощью совместного действия термосифонов (СОУ) и высокоэффективной теплоизоляции (ПХВ-1). В 2024 г. после 40 лет эксплуатации дамбы с ее поверхности были взяты образцы пенопласта для исследования его остаточных теплофизических свойств. Исследования были проведены расчетным способом, а также методами двухточечного анализа и стационарного теплового режима на установке Netzsh HFM 436 Lambda. Исследования показали, что материал достаточно хорошо сохранил теплоизоляционные свойства и целостность, что говорит о высокой надежности и долговечности пенопласта ПХВ-1 в качестве грунтового теплоизоляционного слоя в климатических условиях Якутии. Это позволило сделать вывод о том, что более современные теплоизоляционные материалы, применяемые для сохранения мерзлого состояния грунтовых оснований и создания мерзлотных завес, теоретически могут иметь длительный срок службы (более 50 лет).

Ключевые слова: грунтовая дамба, мерзлотная завеса, теплофизические свойства, пенопласт, термосифон, высокоэффективный теплоизолятор

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке комплексной Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021–2030 годы) по проекту ИМЗ СО РАН (рег. № 122011800076-2), а также в рамках госзадания (рег. № 1023030900073-8-2.3.3, научная тема № FWRS-2024-0032).

Для цитирования: Алексеева О. И., Большев К. Н., Литовко А. В. Высокоэффективная теплоизоляция грунтовой дамбы в г. Якутск. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):609–617. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-609-617>

Original article

High-efficiency thermal insulation for an embankment dike in Yakutsk

Olga I. Alekseeva^{✉,1}, Konstantin N. Bolshev², Andrey V. Litovko¹

¹Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

[✉]o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru

Abstract

High-efficiency thermal insulation materials are widely used in permafrost engineering for the thermal protection of ice-rich structures (dams, levees, storage facilities, airfields, roads, etc.) and for controlling natural and anthropogenic cryogenic processes and hazards (e.g., icings, seasonal freeze-thaw cycles). Investigating these processes is

highly relevant task for Arctic and Subarctic regions. From 1982 to 1986, a full-scale field experiment was conducted on a dyke adjacent to the Permafrost Institute in Yakutsk. The objective was to create an impermeable frozen core within its embankment and foundation using a combination of thermosyphons and high-efficiency thermal insulation (PVC-1 foam). In 2024, a PVC-1 foam sample was retrieved from the crest of the dyke to assess its residual thermophysical properties after 40 years of service. The investigation employed thermal analysis, two-probe measurements, and steady-state technique evaluations using a Netzsch HFM 436 Lambda apparatus. The results demonstrate that the material has maintained its structural integrity and insulating performance remarkably well, confirming that PVC-1 foam constitutes a reliable and durable insulating layer under the climatic conditions of Yakutia. This finding suggests that more advanced insulating materials used to maintain foundation soils in a frozen state or to form frozen dam cores can potentially achieve a very long service life (exceeding 50 years).

Keywords: embankment dyke, frozen core, thermal properties, plastic foam, thermosyphon, high efficiency thermal insulator

Funding. This study was supported by the Comprehensive Program of Fundamental Scientific Research in the Russian Federation for the long-term period (2021–2030) under project No. 122011800076-2 of the Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The research was also conducted under a state assignment (reg. No. 1023030900073-8-2.3.3, theme No. FWRS-2024-0032).

For citation: Alekseeva O.I., Bolshev K.N., Litovko A.V. High-efficiency thermal insulation for an embankment dike in Yakutsk. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):609–617. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-609-617>

Введение

В 1982–1986 гг. был проведен уникальный натурный эксперимент по созданию противотракторной мерзлотной завесы в теле и основании дамбы с помощью совместного действия термосифонов (СОУ) и высокоэффективной теплоизоляции [1–3]. Эксперимент был проведен при создании оградительной грунтовой дамбы, представляющей собой низконапорный гидроузел (рис. 1), у искусственного озера Круглое на территории Института мерзлотоведения СО АН СССР (СО РАН) (далее института) (г. Якутск).

Для создания мерзлотной завесы в центральной 110-метровой части дамбы вдоль гребня летом 1982 г. было установлено 39 термосифонов системы В.И. Макарова на глубину 9,5–11,0 м.

Летом 1984 г. участок дамбы длиной 18 м, охватывающий зону действия семи термосифонов, был покрыт теплоизоляцией (ПХВ-1). Плиты пенопласта размером 0,5×0,5 м, толщиной 0,06 м были закреплены кольшками и засыпаны грунтом слоем 0,1 м. Теплоизолирующий слой был расположен на гребне, низовом и верховом откосах дамбы до уреза воды. Теплофизические свойства пенопласта следующие: марка пенопласта – ПХВ-1, плотность – 69 кг/м³, температура 20 °С, теплопроводность – 0,036 Вт/(м·К), удельная теплоемкость – 1,716 кДж/(кг·К), объемная теплоемкость – 118 кДж/(м³·К), температуропроводность – 0,30 м²/с.

Из опыта применения теплоизоляторов для грунтов

Теплоизоляционными называют материалы, которые имеют небольшой коэффициент теплопроводности. Для грунта теплоизоляционными считаются материалы, имеющие коэффициент теплопроводности в 5–20 раз меньше коэффициента теплопроводности самого грунта [4].

В целях защиты грунтов от промерзания-протаивания издавна применяют естественные теплоизоляторы: мох, торф, опилки, хвою, валежник, настилы из веток кустарника и др. В районах с суровым климатом для теплоизоляции мерзлотных завес применяют хлопчатобумажную вату, войлок, древесную кору, картон, пробковые и торфяные плиты, деревянные щиты. Коэффициент теплопроводности этих материалов колеблется от 0,046 до 0,35 Вт/(м·°С). Из неорганических материалов применяют плиты и маты из минеральной ваты и стекловолокна, коэффициент теплопроводности которых колеблется от 0,4 до 0,07 Вт/(м·°С) [5–7]. Более устойчивыми во времени являются высокоэффективные теплоизоляционные материалы типа пенопластов. Это материалы с системой изолированных, не сообщающихся между собой ячеек, содержащих газ или смесь газов и разделенных тонкими стенками. Наиболее известны полистирольные пенопласты марок ПСБ, ПХВ-1, ПХВ-2. Широкое распространение в строительстве получили пенополистиролы марок ПС-1, ПС-4 и ПС-5 в виде плит длиной и шириной 450, 500 и 550 мм при



Рис. 1. План озера и дамбы, сентябрь 1982 г. (а): 1 – пикетаж, 2 – термосифоны, 3 – глубина воды в озере (август 1982 г.), 4 – реперный знак; и космоснимок озера и дамбы, 2000 г. (б)

Fig. 1. a) Plan of the lake and dyke, September 1982: 1 – staking; 2 – thermosyphons; 3 – lake water depth (August 1982); 4 – bench mark; б) Satellite image of the lake and dyke, 2000

толщине от 30 до 100 мм и более, а также пенополиуретаны – трудновоспламеняемые материалы, обладающие хорошими физико-механическими и теплоизоляционными свойствами. Так, 2,5-сантиметровый слой пенопласта по теплоизоляционным свойствам соответствует 52 см кирпичной кладки, 15 см дерева и 130 см железобетона.

Теплоизоляционный слой, введенный в насыпное основание, препятствует поступлению тепла с поверхности и снижает в летний период расход холода, аккумулированного в мерзлом массиве. Причем пенопласт, обладая малой теплоемкостью, выполняет в основном функции отражения тепла. Использование пенопластов в строительстве развивает идеи теплоизоляции грунтового основания (рис. 2) [8]. Натурные наблюдения на грунтовой дамбе в Якутске и прогнозный расчет показали, что именно за счет использования пенопласта ПХВ-1 в сочетании с термосифонами в теле и основании дамбы была создана практически полнопрофильная противофильтрационная мерзлотная завеса. На практике это позволяет повысить уровень воды в водохранилище.

Экспериментальные исследования, проведенные [9–15] для районов Амдермы, Диксона и других регионов криолитозоны, показали, что использование высокоэффективных материалов позволяет полностью исключить сезонное оттаивание грунтов под зданием с проветриваемым подпольем. Отмечено, что применение пенопластов в этих целях наиболее целесообразно в районах со среднегодовой температурой грунтов ($\theta_{с.г.}$) ниже 3°C , причем меньшая толщина теплоизоляции требуется в районах с более низкими значениями $\theta_{с.г.}$

Сейчас в строительстве разработаны и широко применяются более современные и эффективные теплоизоляционные материалы, такие как конструкционно-теплоизоляционные бетоны, для изоляции и повышения устойчивости мерзлых грунтов оснований, в том числе совместно с СОУ. Рациональное соотношение компонентов наномодифицированной пеностеклобетонной смеси обеспечивает создание высокоподвижной смеси, обладающей хорошей удобоукладываемостью, и на ее основе формируется уникальный теплоизоляционно-конструкционный материал с характеристикой $\lambda = 0,14 \text{ Вт/м} \cdot ^{\circ}\text{C}$, который целесообразен для суровых регионов.

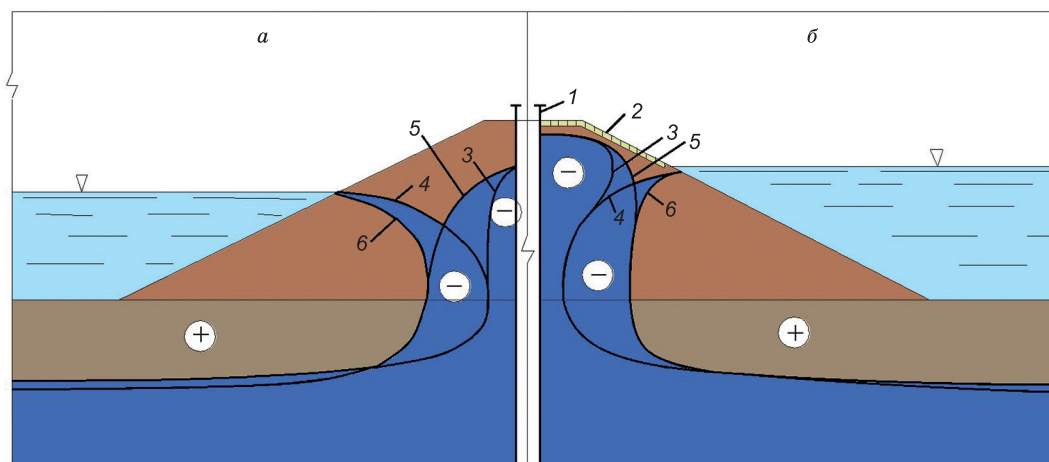


Рис. 2. Сезонное движение нулевой изотермы (расчетное) в верхней призме плотины: *а* – без пенопластового покрытия; *б* – с покрытием; 1 – термосифон; 2 – пенопластовое покрытие. Положение нулевой изотермы: 3 – в марте 1-го года после начала работы замораживающей системы; 4 – в сентябре 1-го года; 5 – в марте 10-го года; 6 – в сентябре 10-го года

Fig. 2. Modelled seasonal dynamics of the 0 °C isotherm in the upper prism: *a*) without plastic foam insulation; *б*) with plastic foam insulation; 1 – thermosyphon; 2 – plastic foam insulation. 0 °C isotherm position: 3 – March of the 1st year of thermosyphon operation; 4 – September of the 1st year; 5 – March of the 10th year; 6 – September of the 10th year

Многие компании занимаются разработкой таких материалов. Так, российская компания «ПЕНОПЛЭКС», которая начала свою деятельность в 1998 г. с запуска первой в России производственной линии по изготовлению теплоизоляционных материалов из экструзионного пенополистирола под торговой маркой «ПЕНОПЛЭКС», сегодня имеет в своем составе 13 заводов (10 в российских городах и 3 за рубежом). Экструзионный пенополистирол получают путем смешивания гранул полистирола при повышенной температуре и давлении с введением вспенивающего агента и последующим выдавливанием из экструдера. [16–19].

Преимущества этого материала для применения в качестве теплоизоляционного слоя на мерзлых грунтах следующие: очень низкая теплопроводность (0,034 Вт/м·К), обеспечивающая надежный заслон передаче тепла от фундамента или другого источника до грунта, который сохранит свое мерзлое состояние на весь период эксплуатации; высокая прочность (20 т/м²), теоретически длительный срок службы.

Исследование пенопласта ПХВ-1

В рамках работ лаборатории инженерной геокриологии (ЛИГ) института по базовому проекту «Устойчивость природно-технических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов», в числе прочих

задач 2024 г., необходимо было установить теплофизические свойства пенопласта ПХВ-1 после 40 лет его использования в качестве теплоизоляционного слоя на грунтовой дамбе для сравнения с их начальными значениями (см. выше).

В августе 2024 г. были взяты образцы пенопласта (рис. 3) с гребня грунтовой дамбы для определения его современных теплофизических свойств после 40 лет эксплуатации. Свойства были определены в лаборатории теплофизики Института физико-технических проблем Севера СО РАН [20].

Для исследования был предоставлен образец полихлорвинилового пенопласта средней толщины 0,485 мм размером 550 на 550 мм.

Определялись следующие характеристики материала: плотность, кг/м³; влажность, %; теплопроводность, Вт/(м·°C); теплоемкость удельная, кДж/(кг·K); теплоемкость объемная, кДж/(м³·K); температуропроводность, м²/с.

Для сравнения результатов определение теплопроводности проводилось тремя способами: 1) расчетным способом через определение сопротивления теплопередаче; 2) методом двухточечного зондирования (компаратор Калинина); 3) методом стационарного теплового режима на установке Netzsh HFM 436 Lambda.

1. Расчетный способ. Расчеты производились в соответствии с ГОСТ Р 56623 (Контроль неразрушающий. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций).



Рис. 3. Фрагменты взятия образца пенопластовой плиты с поверхности дамбы на территории института. Сентябрь 2024 г.

Fig. 3. Sampling of the PVC-1 board from the dyke crest, September 2024

Расчет сопротивления теплопередаче R_k производился по формуле

$$R_k = \frac{t_1 - t_2}{q_{\phi}},$$

где t_1 и t_2 – температура на теплой и холодной поверхностях образца; q_{ϕ} – средняя фактическая плотность теплового потока, определяемая по формуле

$$q_{\phi} = \frac{q(t_1 - t_2)}{(t_1 - t_2) - q(2R_T + R_c)_{\phi}},$$

где q – средняя за расчетный период измеренная плотность теплового потока, Вт/м², R_T – термическое сопротивление преобразователя теплового потока (0,004 (м²·К)/Вт), R_c – термическое сопротивление воздушной прослойки между тепломером и материалом (~ 0,002 (м²·К)/Вт)

Расчет теплопроводности материала производится по формуле

$$\lambda = d/R_k,$$

где d – толщина материала, м.

2. Метод двухточечного зондирования (компаратор Калинина).

Работа прибора основана на двухточечном тепловом зондировании поверхности образца

двумя термозондами. В ходе измерений регистрируется разность температуры в двух точках зонда, характеризующей теплообмен между зондом и образцом через зону их соприкосновения в режиме, близком к стационарному. Величина теплопроводности определяется путем сравнения с результатами измерений на стандартных образцах с известной теплопроводностью, т. е. метод определения теплопроводности относится к относительным.

3. Метод стационарного теплового режима на установке Netzsh HFM 436 Lambda.

Для определения теплопроводности методом стационарного теплового режима использовался анализатор теплопроводности строительных изоляционных материалов HFM 436 Lambda производства компании Netzsch. Калибровка прибора производится с помощью сертифицированного эталонного стандарта NIST с известной теплопроводностью. Диапазон измеряемой теплопроводности исследуемых материалов составляет соответственно от 0,03 до 0,5 Вт/(м·К) и термического сопротивления от 0,02 до 7 (м²·К)/Вт. Предел допускаемой относительной погрешности определения теплопроводности составляет ±5 %.

Таблица 1
Результаты определений влажности, плотности и теплоемкости материала

Table 1
Determination of moisture content, density and heat capacity of the material

Характеристика	Полученное значение
Влажность, %	4,3
Плотность, кг/м ³	170
Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К) (при влажности материала 4,3 %)	При T = 23,5 °C 1,26 При T = 25 °C 1,45 Ср. знач. 1,355
Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	При T = 23,5 °C 214,2 При T = 25 °C 246,5 Ср. знач. 230,35

Определение удельной теплоемкости проводилось на дифференциально-сканирующем калориметре Setaram Sensys EVO TG-DSC. Объемная теплоемкость рассчитывалась по формуле

$$c_v = \rho \cdot c,$$

где c – удельная теплоемкость, ρ – плотность материала.

Температуропроводность материала рассчитывалась по формуле

$$a = \lambda / (\rho \cdot c),$$

где λ – теплопроводность.

Результаты исследований приведены в таблицах 1 и 2.

Сравнение значений теплофизических свойств пенопласта производилось для температуры воздуха 20,0–23,5 °C (табл. 4).

Можно видеть, что за 40 лет свойства пенопласта ПХВ-1 изменились, но в части теплопроводности и температуропроводности незначительно: теплопроводность увеличилась в среднем всего на 0,02 Вт/(м·°C), а температуропроводность – на 0,04 м²/с, что говорит о достаточно высокой надежности и долговечности пенопласта ПХВ-1.

Пенопласт, находясь в деятельном слое грунта, подвергается регулярным циклическим температурным воздействиям с фазовыми переходами поровой влаги. Влага, проникая в материал и расширяясь в процессе промерзания, постепенно разрушает структуру, заполняя пустоты, и существенно ухудшает характеристики влагопроницаемости. Наблюдаемое по результатам измерений значительное изменение плотности и теплоемкости (более чем в 2 раза) можно объяснить тем, что по мере увеличения влагопроницаемости материала вместе с влагой в структуру проникают мелкодисперсные минеральные частицы, органика, соли и прочие компоненты вмещающего грунта, увеличивая его плотность и, соответственно, изменяя теплофизические характеристики. Тем не менее, полученные результаты показывают, что после 40 лет эксплуатации исследуемый материал достаточно хорошо сохранил теплоизоляционные свойства и целостность, что говорит о высокой надежности и долговечности.

Результаты определений теплопроводности материала

Determinations of the thermal conductivity of the material

Метод определения/установка	Средняя температура, °C	Полученное значение теплопроводности, Вт/(м·°C)	Рассчитанное значение температуропроводности м ² /с
Расчет теплопроводности через определение сопротивления теплопередаче	–2,7	0,05	0,217
Расчет теплопроводности через определение сопротивления теплопередаче	–3,1	0,051	0,221
Метод двухточечного зондирования/компаратор Калинина	22	0,06	0,26
Метод стационарного теплового режима/Netzsh HFM 436 Lambda	0,56	0,056	0,243
Метод стационарного теплового режима/Netzsh HFM 436 Lambda	20	0,06	0,26
Метод стационарного теплового режима/Netzsh HFM 436 Lambda	20	0,056	0,243

Таблица 3

Сравнение теплофизических свойств полихлорвинилового пенопласта (ПХВ-1)

Table 3

Comparison of thermophysical properties of polyvinyl chloride foam (PVC-1)

Номер	Марка пенопласта	Плотность, кг/м ³	Температура, °С	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	Температуропроводность, м ² /с
1	ПХВ-1	69	20	0,036	1,716	118	0,30
2	ПХВ -1	170	20	0,060	1,350	230	0,26

Примечание: 1 – перед укладкой пенопласта на дамбе в 1984 г.; 2 – после 40 лет эксплуатации в 2024 г.
Note: 1 – before the foam insulation was laid on the dyke in 1984; 2 – after 40 years of service in 2024.

сти пенопласта ПХВ-1 в качестве грунтового теплоизоляционного слоя в климатических условиях Якутии.

Заключение

Проведен уникальный эксперимент по исследованию теплофизических свойств пенопласта ПХВ-1, находившегося в течение 40 лет в качестве теплоизоляционного материала на гребне грунтовой дамбы в Якутске. Исследования показали, что за 40 лет теплоизоляционные свойства пенопласта ПХВ-1 изменились незначительно, что говорит о достаточно высокой надежности и долговечности высокоэффективного теплоизоляционного материала для условий Якутии. Это позволяет сделать вывод о том, что более современные теплоизоляционные материалы, применяемые для сохранения мерзлого состояния грунтовых оснований и создания мерзлотных завес, теоретически могут иметь длительный срок службы (более 50 лет).

Список литературы / References

1. Алексеева О.И. Экспериментальные исследования замораживающей системы. В кн.: Климовский И.В., Кузьмин Г.П. (ред.) *Исследования мерзлых толщ и криогенных явлений*. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО АН СССР; 1988. С.101–108.
Alekseeva O.I. Experimental studies of the freezing system. In: Klimovsky I.V., Kuzmin G.P. (eds.) *Studies of frozen ground and cryogenic phenomena*. Yakutsk: Publishing House of the Permafrost Institute SB USSR Academy of Sciences; 1988, pp. 101–108. (In Russ.)
2. Алексеева О.И. *Инженерные сооружения на мерзлых основаниях. Учебное пособие*. Якутск: Изд-во ФГБУН Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; 2022. 153 с.
Alekseeva O.I. *Engineering structures on frozen foundation soils: textbook*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2022. 153 p. (In Russ.)
3. Алексеева О.И. *Сезоннодействующие охлаждающие устройства (СОУ) для мерзлых оснований: аналити-*

ческий обзор. Якутск: ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; 2024. 152 с.
Alekseeva O.I. *Seasonally operating devices (SOD) for frozen foundation soils: Analytical review*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2024. 82 p. (In Russ.)
4. Павлов А.В. *Расчет и регулирование мерзлотного режима почвы*. Новосибирск: Наука; 1980. 240 с.
Pavlov A.V. *Calculation and regulation of the permafrost regime of the soil*. Novosibirsk: Nauka; 1980. 240 p. (In Russ.)
5. Перльштейн Г.З. *Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на северо-востоке СССР*. Новосибирск: Наука; 1979. 304 с.
Perlshstein G.Z. *Hydrothermal reclamation of permafrost in the northeast of the USSR*. Novosibirsk: Nauka; 1979. 304 p. (In Russ.)
6. Кацнельсон Н.Ю., Балаев Г.А. *Пластические массы*. Л.: Химия; 1978. 383 с.
Katsnelson N.Yu., Balaev G.A. *Plastics*. Leningrad: Khimya Publ.; 1978. 383 p. (In Russ.)
7. Шамаева А.П., Тимошенко А.Г. Теплофизические свойства пеноуретана марки «Рипор-12 ТН». В кн.: Иванов Н.С. и др. (ред.) *Тепловая защита инженерных сооружений и коммуникаций Крайнего Севера*. Якутск: ЯГУ; 1980. С.172–177.
Shamaeva A.P., Timoshenko A.G. Thermophysical properties of the “Ripor-12 TN” brand polyurethane foam. In: Ivanov N.S., et al. (eds.) *Thermal protection of engineering structures and utilities in the Far North*. Yakutsk: Yakut State University; 1980, pp. 172–177. (In Russ.)
8. Алексеева О.И. Исследование температурного режима низконапорных мерзлых плотин при совместном использовании термосифонов и пенопластовой теплоизоляции. В кн.: *Инженерно-геологические проблемы Забайкалья*. Чита; 1987. С. 99.
Alekseeva O.I. Investigation of the temperature regime of low-head frozen dams using thermosyphons and foam insulation in combination. In: *Engineering and Geological Problems of Transbaikalia*. Chita; 1987, p. 99. (In Russ.)
9. Чжан Р.В. Современное представление о работе грунтовых плотин среднего и низкого напоров в криолитозоне в условиях потепления климата. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2019;24(1):52–66. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-52-66>
Zhang R.V. Current understanding of the performance of medium and small embankment dams on permafrost in a warming climate. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2019;24(1): 52–66. (In Russ.) [https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-1-52-66)

10. Чжан Р.В., Якимов А.А., Чжан А.А., Заболотник П.С. К оценке устойчивости ограждающей дамбы г. Якутск. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):56–67. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-56-67>
- Zhang R.V., Yakimov A.A., Zhang A.A., Zabolotnik P.S. Assessment of flood-control dam stability in Yakutsk (Russia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):56–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-56-67>
11. Герасимов А.С. Золотарь А.И. Устройство теплоизоляции, исключающей сезонное оттаивание грунтов и фундаментов. В кн.: *Конструкции и фундаменты зданий для Арктики*. Л.; 1974. С. 59–64.
- Gerasimov A.S., Zolotarev A.I. Installation of thermal insulation preventing seasonal thawing of soils and foundations. In: *Constructions and foundations of buildings for the Arctic*. Leningrad; 1974, pp. 59–64. (In Russ.)
12. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф., Балута В.И. Геотермический критерий оценки устойчивости многолетнемерзлых пород слоя годовых теплооборотов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(4):543–552. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-543-552>
- Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F., Baluta V.I. Geothermal criterion for assessing the stability of frozen soils in seasonally active permafrost. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(4):543–552. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-543-552>
13. Чжан Р.В., Павлова Н.А., Огонеров В.В. и др. Инженерное освоение низких пойм рек криолитозоны под гражданское строительство: опыт, проблемы, перспективы. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020;25(2):89–97. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-7>
- Zhang R.V., Pavlova N.A., Ogonerov V.V., et al. Civil construction on low floodplains in permafrost regions: experience, problems, prospects. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2020;25(2):89–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-7>
14. Железняк М.Н., Литовко А.В., Жирков А.Ф. и др. Организация мониторинговых площадок на автодорогах в криолитозоне. *Дороги России XXI века: общественно-публицистический, научно-технический журнал*. 2022;129(3):70–75.
- Zheleznyak M.N., Litovko A.V., Zhirkov A.F., et al. Establishment of monitoring sites on highways in the permafrost zone. *Roads of Russia in the 21st Century: Socio-Political and Scientific-Technical Journal*. 2022;129(3):70–75. (In Russ.)
15. Патент № 2795153 Российская Федерация, МПК G01W 1/00 (2006.01); E02D 1/00 (2006.01). Способ геокриологического мониторинга и оценки состояния автомобильных дорог в криолитозоне : №2021139196 : заявл. 28.12.2021 : опубл. 28.04.2023 / А. В. Литовко, А. Ф. Жирков, И. И. Сыромятников, М. Н. Железняк ; патентообладатель ФГБУН Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН. 7 с.
- Patent No. 2795153 Russian Federation, IPC G01W 1/00 (2006.01); E02D 1/00 (2006.01). A method of geocryological monitoring and condition assessment of the roads in the permafrost zone: No. 2021139196, registered 28.12.2021; published 28.04.2023 / A. V. Litovko, A. F. Zhirkov, I. I. Syromyatnikov, M. N. Zheleznyak; patent holder Melnikov Permafrost Institute SB RAS. 7 p.
16. Экструзионный пенополистирол «ПЕНОПЛЭКС» Режим доступа: <https://www.penoplex.ru/lib/stati/teploizolyatsiya-fundamentov-na-vechnomerzlykh-gruntakh/>.
- Extruded polystyrene foam “PENOPLEX” Available at: <https://www.penoplex.ru/lib/stati/teploizolyatsiya-fundamentov-na-vechnomerzlykh-gruntakh/>.
17. Применение экструзионных пенополистиролов в дорожном строительстве в зоне вечной мерзлоты. Режим доступа: <https://rapex-org.ru/images/>
- Application of extruded polystyrene foam in road construction in permafrost zones. Available at: <https://rapex-org.ru/images/>
18. Звездов А.А. Эффективность применения экструзионного пенополистирола при зимнем бетонировании методом термоса. В кн.: *Актуальные проблемы и перспективы развития геокриологии: Материалы VIII Всероссийского научного молодежного геокриологического форума с международным участием, посвященного 125-летию и 115-летию ученых-мерзлотоведов Николая Александровича Цытовича и Петра Филимоновича Швецова, г. Мирный, 25 июня – 03 июля 2025 г.* С. 21–24.
- Zvezdov A.A. Effectiveness of extruded polystyrene foam in winter concreting using the thermos method. In: *Current issues and prospects of geocryology development: proceedings of the 8th All-Russian Scientific Youth Geocryological Forum with international participation, dedicated to the 125th and 115th anniversaries of permafrost scientists Nikolai A. Tsytoovich and Petr F. Shvetsov, Mirny, June 25 – July 3, 2025*, pp. 21–24. (In Russ.)
19. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. и др. Экономическая эффективность использования новых теплоизоляционных материалов в холодных регионах. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):404–415. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-404-415>
- Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F., et al. The economic efficiency of using new thermal insulation materials in cold climate. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):404–415. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-404-415>
20. Большев К.Н., Алексеев А.А., Иванов В.А. и др. Измерительные комплексы для натурных экспериментов. Методики и результаты. *Приборы*. 2020;245(11):30–37.
- Bolshev K.N., Alekseev A.A., Ivanov V.A., et al. Measuring complexes for field experiments. Methods and results. *Pribory*. 2020;245(11):30–37. (In Russ.)

Об авторах

АЛЕКСЕЕВА Ольга Ивановна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-3721-9204>, ResearcherID: V-5829-2018, Scopus Author ID: 17343442100, SPIN: 2136-9939, e-mail: o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru

БОЛЬШЕВ Константин Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-6348-962X>, ResearcherID: ABH-5088-2020, Scopus Author ID: 55877388400, SPIN: 6435-1792, e-mail: k.bolshev@mail.ru

ЛИТОВКО Андрей Владимирович, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-2874-4576>, Scopus Author ID: 56966735000, SPIN: 6522-8912, e-mail: lav_84@mail.ru

Вклад авторов

Алексеева О.И. – разработка концепции, методология, проведение исследования, редактирование рукописи; **Большев К.Н.** – проведение исследования, верификация данных, проведение статистического анализа; **Литовко А.В.** – проведение исследования, верификация данных, визуализация

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

ALEKSEEVA, Olga Ivanovna, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-3721-9204>, ResearcherID: V-5829-2018, Scopus Author ID: 17343442100, SPIN: 2136-9939, e-mail: o.i.alekseeva@mpi.ysn.ru

BOLSHEV, Konstantin Nikolaevich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-6348-962X>, ResearcherID: ABH-5088-2020, Scopus Author ID: 55877388400, SPIN: 6435-1792, e-mail: k.bolshev@mail.ru

LITOVKO, Andrey Vladimirovich, Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-2874-4576>, Scopus Author ID: 56966735000, SPIN: 6522-8912, e-mail: lav_84@mail.ru

Authors' contribution

Alekseeva O.I. – conceptualization, methodology, investigation, writing – review & editing; **Bolshev K.N.** – investigation, validation, formal analysis; **Litovko A.V.** – investigation, validation, visualization

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 10.09.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.11.2025

Принята к публикации / Accepted 02.12.2025