

DOI: <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-2-245-254>

Поступила 20.03.2023

Поступила после рецензирования 23.06.2023

Принята в печать 27.06.2023

© Гончарова Г. Ю., Борзов С. С., Борщев Г. В., 2023

<https://www.fsjour.com/jour>

Обзорная статья

Open access

НОВЫЕ ЛЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ ЦЕПИ В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ РОССИИ

Гончарова Г. Ю.^{1,2}, Борзов С. С.^{1,2}, Борщев Г. В.*²¹ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия² Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности, Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

непрерывная холодильная цепь, химическое модифицирование льда, армирование льда, автозимник, северные регионы, физико-механические свойства льда

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрено современное состояние зимних дорог (автозимников) и приведены данные, подтверждающие необходимость продления сроков их эксплуатации для поддержания непрерывной холодильной цепи в северных регионах России. Проанализированы нормативные документы, регулирующие проектирование и создание зимних дорог. Проведен обзор существующих методов и технологий изготовления автозимников. Рассмотрена возможность применения геосинтетических материалов для укрепления ледовых дорог, а также выявлены возможные проблемы, возникающие при их использовании. Показана перспективность применения химических модификаторов для создания конструкционных материалов на основе водного льда, в особенности в сочетании с армированием ледовых массивов. Описаны современные подходы к выбору модифицирующих соединений и материалов для армирования льда и сформированные на их основе критерии. Проведен обзор научных исследований, подтверждающих возможность значительного усиления несущей способности ледовых покрытий и, как следствие, более раннего начала их эксплуатации. Показано, что совместное применение армирования и ледовых модификаторов позволило ледовому образцу сохранить свою цельность даже при значительной деформации. Описана также возможность дополнительного упрочнения ледовых дорожно-транспортных путей в результате оптимизации режимных параметров их формирования в зависимости от погодных условий.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Статья подготовлена в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FGUS2022–0014 Федерального научного центра пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН и в рамках выполнения исследований по государственному заданию № FSN-2023–0004 МГТУ им. Баумана.

Received 20.03.2023

Accepted in revised 23.06.2023

Accepted for publication 27.06.2023

© Goncharova G. Yu., Borzov S. S., Borshev G. V., 2023

Available online at <https://www.fsjour.com/jour>

Review article

Open access

NEW TECHNOLOGIES OF ICE ROADS CONSTRUCTION TO MAINTAIN THE SUSTAINABLE COLD CHAIN OF SUPPLY IN THE NORTHERN REGIONS OF RUSSIA

Galina Yu. Goncharova^{1,2}, Sergey S. Borzov^{1,2}, Georgiy V. Borshev²¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia² All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry, Moscow, Russia

KEY WORDS:

sustainable cold chain, chemical modification of ice, reinforcement of ice, ice road, northern regions, physical and mechanical properties of ice

ABSTRACT

The article reviews the current state of winter ice roads (winter glacial roads) and presents data that confirm the necessity of their service life extension in order to maintain the uninterrupted cold chain of supply in the northern regions of Russia. The regulatory documents that regulate the design engineering and construction of winter ice roads are analyzed. The existing methods and technologies of winter roads construction have been analyzed. The possibility of using the geosynthetic materials for ice roads reinforcement is considered, as well as possible challenges arising from their use are exposed for consideration. The use of chemical modifiers for the creation of structural materials based on water ice is shown to be prospective and promising, especially in combination with the reinforcement of ice blocks. Modern approaches to choice of ice modifying compounds and materials for ice reinforcing are described, as well as criteria achieved on the basis of their application. The scientific studies confirming the possibility of a significant increase in the bearing capacity of glacial coverage and, as a result, an earlier start of their operation is carried out. It is shown that the combined use of reinforcement and ice modifiers allowed the ice sample to maintain its integrity even under exposure to significant deformation loads. The technical possibility of additional reinforcement of ice transport routes as a result of optimizing the modal parameters of their formation, depending on weather conditions, is also described.

FUNDING: The article was published as part of the research topic № FGUS2022–0014 of the state assignment of the V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS and as part of the research topic № FSN-2023–0004 of the state assignment of Bauman MSTU.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Гончарова, Г. Ю., Борзов, С. С., Борщев, Г. В. (2023). Новые ледовые технологии для поддержания непрерывной холодильной цепи в северных регионах России. *Пищевые системы*, 6(2), 245–254. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-2-245-254>

FOR CITATION: Goncharova, G. Y., Borzov, S. S., Borshev, G. V. (2023). New technologies of ice roads construction to maintain the sustainable cold chain of supply in the northern regions of Russia. *Food Systems*, 6(2), 245–254. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2023-6-2-245-254>

1. Введение

Площадь арктических территорий РФ составляет около 4,8 млн кв. км. На них проживает 2,5 млн человек, что соответствует 40% всего населения, проживающего в арктической зоне Земли. В настоящее время экономика Крайнего Севера активно развивается и составляет до 15% ВВП страны [1]. Обеспечение непрерывной холодильной цепи (НХЦ) для регионов Крайнего Севера является острой проблемой. С одной стороны, необходима транспортировка продуктов питания не только в города, но и в отдаленные селения и вахтовые поселки. Это особенно актуально, учитывая экстремальные условия жизни в данных регионах, а следовательно, и потребность в сбалансированном рационе, в котором присутствует мясная, молочная и овощная продукция. С другой стороны, важно создание благоприятных условий для экспорта редкого и весьма ценного деликатеса — оленины [2,3]. Значительная часть экспорта идет в европейские страны. В 2019 году было экспортировано 440 т оленины в Финляндию и Германию на общую сумму 2,9 млн долларов, а только за январь 2022 года ЯНАО подготовил для экспорта в Финляндию более 112 тонн оленины [4]. Дополнительно поставляются шкуры, а также субпродукты, которые перерабатываются и идут на корма животным [5]. Бурно развивающийся рынок стран Азии также заинтересован в поставках северного деликатеса и субпродуктов, особенно пантов и крови оленей [6].

Для обеспечения качества и безопасности продукции, а также с целью уменьшения ее потерь в процессе хранения и доставки необходимо применение НХЦ. Она включает в себя различные технические средства для поддержания требуемых температурных уровней транспортируемой продукции, оптимизацию логистических маршрутов и обеспечение контроля качества на всем жизненном цикле продукта питания. Ключевыми принципами функционирования НХЦ являются:

- обеспечение безопасности и сохранение качества пищевой продукции;
- уменьшение потерь на протяжении всего жизненного цикла продукта;
- оптимизация затрат на функционирование цепи, сокращение энергопотребления [7,8].

В дополнение к известным проблемам НХЦ, связанным с износом машин и оборудования, с отсутствием непосредственного контроля производства на протяжении всего жизненного цикла продукции, в северных регионах возникает также проблема логистики [9]. В условиях Крайнего Севера для транспортного сообщения используются морской, речной, железнодорожный и воздушный виды транспорта. Однако доставка груза до нужного пункта зачастую возможна исключительно при помощи автотранспорта. Зимние дороги, известные как «дороги жизни», составляют от трети до половины всех автомобильных путей в зависимости от региона [10]. Так, в частности, для республики Саха (Якутия) протяженность автозимников составляет свыше 20 тысяч километров [11]. Не менее важны и ледовые переправы, которые совместно с зимниками обеспечивают связь с большой землей. В ХМАО, Якутии, Чукотском АО от 56 до 80% населенных пунктов не имеют круглогодичного выхода на дороги с твердым покрытием, поэтому поддержание высоких эксплуатационных характеристик временных дорог является краеугольной задачей [12]. Необходимо отметить, что применение автоперевозок значительно затруднено географическими особенностями регионов [13,14]. В первую очередь это связано с тем, что зимники и ледовые переправы, будучи сезонными дорогами, становятся непригодными к использованию большую часть года. Так, в Якутии ледовые

переправы могут эксплуатироваться с 15 ноября по 15 апреля, паромные переправы — с 15 июня по 30 сентября, то есть от трех до четырех месяцев в году большая часть территории республики остается без транспортного обеспечения. В связи с этим даже незначительное продление сроков работы ледовых переправ является жизненной необходимостью для северных и арктических территорий. При этом, как правило, преждевременное закрытие автозимников обусловлено не полным отоплением и выходом их из строя, а локальным (точечным) разрушением, связанным с утончением и повреждением льда отдельных проблемных участков дороги, в первую очередь переправ через многочисленные реки и т. д. [15,16]. Разработка технологий упрочнения ледового покрытия, основанных на управлении процессами тепло-массообмена, может значительно увеличить продолжительность эксплуатации зимников и решить важнейшую задачу поддержания логистики всего Крайнего Севера. Целью представленной статьи является обзор традиционных способов увеличения прочностных характеристик автозимников и ледовых переправ, а также анализ современных научных разработок в области упрочнения ледовых структур, которые в совокупности могли бы вывести на принципиально новый уровень задачу использования водного льда в качестве полноценного конструкционного материала. Особую актуальность представляет обзор современных отечественных технологий упрочнения ледового массива как стратегически важного направления поддержания логистики северных регионов и арктической зоны РФ.

2. Материалы и методы

Объектами изучения являлись нормативные документы и научные публикации российских и зарубежных авторов в области создания и разработки современных способов упрочнения ледового покрытия и материалов для армирования на основе синтетических и природных компонентов. На платформах eLibrary.ru, Scopus, ResearchGate и в открытых интернет-источниках был проведен поиск публикаций с использованием нескольких комбинаций ключевых слов, включая следующие: непрерывная холодильная цепь, химическое модифицирование льда, армирование льда, автозимник, северные регионы, физико-механические свойства льда. Статьи, написанные не на английском и русском языках, а также без полнотекстовой информации, не рассматривались. Из подобранных материалов также были исключены статьи, не относящиеся к теме настоящего обзора.

3. Современное состояние проблемы

На протяжении долгого времени жители северных стран использовали водный лед в качестве удобного и доступного материала для создания различных оборонительных и хозяйственных сооружений. Столетия назад водный лед применялся в качестве материала для создания временных фортификационных сооружений, жилых помещений, иглу, холодных складов из льда и мерзлого грунта [17]. Исторически самое широкое распространение получили сооружения дорожно-транспортной инфраструктуры — зимники и ледовые переправы [18]. Зимники на протяжении веков использовались в качестве удобных транспортных артерий, связывающих населенные пункты северных регионов между собой [19]. Однако до настоящего времени основными препятствиями, ограничивающими применение водного льда в качестве полноценного конструкционного материала, были и остаются его недостаточная прочность и высокая хрупкость. Традиционно зимники изготавливают послойным наращиванием дорожного полотна.

Для создания автозимников применяют различные виды спецтехники: снегоочистители, вездеходы, снегогладилки, а также машины для уплотнения и разравнивания дороги. Ключевой задачей является наращивание поверхности снеголедового полотна для обеспечения необходимой толщины, при которой создаваемый участок дороги был бы выше окружающего снежного покрова. Затем со снегосборных полос на полотно дороги набрасывают снег, который в дальнейшем уплотняют [20].

При этом существенными недостатками данной технологии является низкая прочность получаемого массива, а также малая продолжительность эксплуатации подобных дорог. Для укрепления покрытия зимника его орошают водой, создавая периодически обновляемую ледяную корку, но и это не исправляет ситуацию в целом [21].

Ледовая переправа представляет собой дорогу, проложенную по ледяному покрову замерзшей реки и являющуюся участком автозимника. Одна из особенностей ледовых переправ — непостоянная толщина льда, которая требует тщательного контроля. Оценка состояния переправы проводят при помощи георадиолокационных измерений [22], подтверждаемых контрольным бурением лунок.

На сегодняшний день в России практика создания сезонных ледовых переправ и автозимников остается безальтернативной на огромных территориях Арктической зоны РФ. Введен стандарт, устанавливающий технические правила устройства и содержания зимних автомобильных дорог и ледовых переправ ГОСТ Р 58948–2020¹. Применение стандарта дополняется рекомендациями ОДМ 218.4.030–2016² и ОДН 218.4.010–98³.

Вместе с тем следует отметить, что представленные в указанных документах технические решения по укреплению ледовых переправ не менялись десятилетиями, они чрезвычайно сложны, громоздки и трудоемки. При этом в качестве укрепляющих (армирующих) элементов рекомендуется использовать ветки деревьев, доски, металлоконструкции и пр. [23–27]. Однако современные исследования уже позволяют сформулировать перечень основных критериев, в которых собственная прочность и жесткость арматуры далеко не всегда способствует упрочнению льда и усилению несущей способности создаваемых ледовых покрытий.

Исследованию эффективности применения различных армирующих материалов для упрочнения льда (от стальной арматуры [28] до синтетических волокон и сеток [29–35]) посвящено большое число публикаций. Отмечается, что использование армирующих волокон не только усиливает ледовый покров, но и способствует купированию возникающих трещин.

Армирование ледового массива с помощью различных конструктивных элементов и химических соединений в ряде работ [36,37] условно подразделяется на микроармирование и макроармирование.

1. Микроармирование представляет собой улучшение прочностных характеристик льда и наиболее слабых компонентов мерзлых грунтов путем смешивания льда с различными соединениями или дискретной фазой, предназначен-

ными для купирования возникающих трещин. В результате данного процесса получается однородная композиционная структура. В качестве микроармирующих материалов используются различные водорастворимые полимеры, волокна и дисперсные частицы.

Ледяные и льдогрунтовые композиты, улучшенные микроармированием, авторы [38] подразделяют на две группы:

- композиты, состоящие из непрерывной фазы (льда) и дисперсной фазы: частиц, солевых карманов, воздушных включений и пр.;
- композиты, включающие различные волокнистые наполнители (полимерные цепочки, дисперсные волокна и др.).

Относительное упрочнение льда при использовании дискретной фазы вместе со структурирующими соединениями в оптимальных концентрациях, по данным открытых источников, может достигать значений свыше 9 раз [39].

2. Макроармирование предполагает применение различных протяженных материалов: сеток, полотен, стальных канатов бревен, различного рода дополнительных конструктивных элементов.

С позиции описанной классификации протяженные волокна могут быть одновременно отнесены к обоим видам армирования, однако нам представляется более логичным отнести их к макроармированию, так как их использование обеспечивает связность всей конструкции и сохранение целостности всего ледового объекта даже при частичном разрушении льда.

В работах [40,41] описываются наиболее современные конструкции из пайкерита, ледяных и льдогрунтовых композитов. В 2014–2015 гг. в Финляндии были построены сооружения из пайкерита, а в 2016 г. — из армированного целлюлозой льда. Приведены определенные экспериментальным путем режимные параметры дождевания водяной пульпы с получением пайкерита повышенной прочности. Рекомендуемое содержание опилок составило 10%. Характерный размер опилок ограничивался 2 мм в связи с тем, что мелкие частицы равномернее распределяются в объеме в процессе создания пайкерита. В работе [42] представлены результаты лабораторных исследований прочности образцов льда, армированных отходами деревообработки (опилом и стружкой), на растяжение и изгиб. Образцы размером 100×100×400 мм из льда были изготовлены при помощи послойного намораживания (2 см на слой) на температурном уровне минус 16 °С с добавлением опилок, древесных стружек. В результате исследования было установлено, что наибольшее увеличение прочности в сравнении с образцами без армирования (контрольная группа) достигалось в процессе применения древесной стружки. Экологичность, доступность и простота внесения материала в лед позволяет авторам работы рекомендовать данный вид армирования для строительства различных наземных ледовых объектов.

Необходимость совершенствования технологий строительства ледовых переправ обусловила более широкое внедрение в практику методов упрочнения льда с использованием геосинтетических сеток, изготавливаемых из различных видов синтетического волокна [31,32,43–47]. В работах [31,32] описано формирование экспериментальной ледовой переправы и представлены результаты ее практической апробации. В публикациях рассмотрена система размещения и фиксации сеток, эксплуатации и удаления их перед наступлением теплых периодов года. Отмечается, что впервые были армированы не только непосредственно ледовая поверхность переправы, но и наиболее слабые места — стыки ледяной плиты с береговой зоной (Рисунок 1 и Рисунок 2).

¹ ГОСТ Р 58948–2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Дороги автомобильные зимние и ледовые переправы. Технические правила устройства и содержания». Москва, Стандартинформ, 2020. — 54 с.

² ОДМ 218.4.030–2016. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по оценке грузоподъемности ледовых переправ. Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/456055369> Дата доступа: 15.03.2023

³ ОДН 218.010–98. Отраслевые дорожные нормы. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ. Электронный ресурс: <https://docs.cntd.ru/document/1200029712> Дата доступа: 15.03.2023



Рисунок 1. Погружение геокомпозита в «майну» и протаскивание его под льдом капроновыми тросами («нижнее» армирование)

Figure 1. Immersion of the synthetic geocomposite mesh into the ice hole and its dragging under the ice with nylon cables ("lower" reinforcement)

Однако до настоящего времени фактором, препятствующим широкому внедрению описанной технологии, является недостаточное адгезионное сцепление со льдом промышленно выпускаемых геосеток в связи с их гидрофобностью. Предварительная пропитка волокон гидрофобным связующим составом («замазывание») осуществляется с целью упрощения процесса производства сеточного полотна, так как исходные волокна представляют собой пучки фибрилл, достаточно легко спутывающихся. Таким образом, искусственная гидрофобизация волокон при производстве сеток существенно снижает эффект упрочнения ледового покрытия в связи с отсутствием необходимой силы адгезии с ледовой матрицей и требует разработки новых методов их производства. Поэтому особое внимание при выборе армирующих элементов должно уделяться их адгезионной способности к ледовой матрице, что свойственно материалам, обладающим высокой гидрофильностью. В противном случае, можно наблюдать эффект расслаивания композитного материала, что приводит к его разрушению даже при незначительных нагрузках (Рисунок 3).

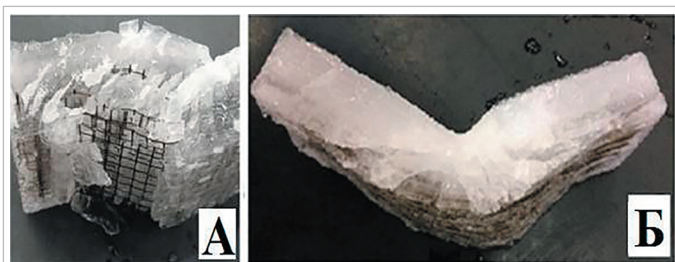


Рисунок 3. Результаты прочностных испытаний на изгиб: а) армированного заводской базальтовой сеткой, пропитанной гидрофобным связующим составом; б) армированного базальтовыми волокнами без пропитки [48]

Figure 3. Results of bending strength tests: a) ice reinforced with a factory-made basalt mesh impregnated with a hydrophobic binder; b) ice reinforced with basalt fibers without hydrophobic binder impregnation [48]

Важнейшим достоинством армирующих материалов является сокращение времени намораживания ледового слоя, требуемого для безопасного передвижения транспортных средств на ледовых переправах. В частности, в работе [49] представлен расчет длительности намораживания ледовой переправы с применением армирующих материалов. Показано, что на температурном уровне минус 15 °C для обеспечения безопасного проезда 40-тонных колесных автомобилей длительность намораживания сокращается на 44 дня.

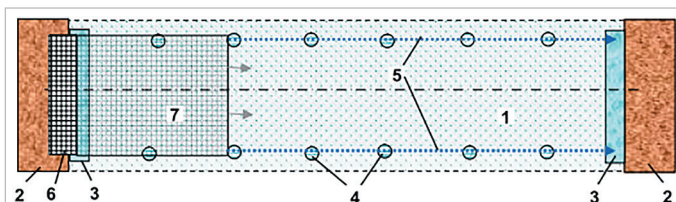


Рисунок 2. Схема, иллюстрирующая способ «нижнего» армирования ледового покрова: 1 — естественный ледовый покров; 2 — берега; 3 — «майны» во льду для подачи и приема армирующего полотна; 4 — лунки для протягивания тросов 5 под льдом; 6 — рулон геосинтетического материала; 7 — полотно геосинтетики, протаскиваемое тросами под льдом [31]

Figure 2. Schematic sketch of the "lower" reinforcement method of the ice cover: 1 — natural ice cover; 2 — coast; 3 — ice holes for submerging and receiving the reinforcement mesh; 4 — holes for pulling cables 5 under the ice; 6 — a roll of geosynthetic mesh material; 7 — geosynthetic mesh dragged by cables under the ice [31]

Несмотря на значительное разнообразие исследований, представленных в литературе, на сегодняшний день отсутствует единый и универсальный подход к выбору современных, обладающих наибольшим сходством с ледовой матрицей материалов для создания автотранспортных средств.

4. Авторские разработки в области создания конструкционных материалов на основе водного льда

Важным направлением в области упрочнения конструкционных материалов на основе водного льда является применение армирования совместно с внесением высокомолекулярных модифицирующих соединений [50,51]. Ледовые модификаторы нашли широкое применение в различных видах зимнего спорта: в хоккее, фигурном катании, шорт-треке, бобслее и др. Особую значимость успешное апробирование модификаторов имеет на санно-бобслейных трассах, где ледовое покрытие подвергается наиболее агрессивным разрушающим нагрузкам, не только соизмеримым, но и превышающим нагрузку на ледовое покрытие от колес грузового автотранспорта. Это объясняется существенным весом бобов со спортсменами, малой площадью контакта полоза со льдом и скоростью прохождения трассы, достигающей 150 км/ч (Рисунок 4) [52].

Применение модификаторов на ледовых объектах позволяет значительно повысить прочность льда, что открывает дополнительные перспективы при проектировании автотранспортных средств и ледовых переправ [53].

Ледовые модификаторы, применяемые на объектах с существенным хладоснабжением, должны соответствовать следующим критериям:

- ☐ экологическая чистота и безопасность для организма человека;
- ☐ химическая инертность;
- ☐ низкая температура кристаллизации или «стеклования»;
- ☐ гибкость молекулярной цепи, определяющая способность макромолекулы к изменению формы и линейных размеров без разрыва жестких валентных связей полимерной цепи;
- ☐ высокая молекулярная масса полимера;
- ☐ подобие выбираемых соединений структуре природных биополимеров.

Для северных регионов России в процессе проектирования сооружений на основе водного льда с добавлением ледовых модификаторов необходимо добавить еще три дополнительных критерия:

1. Минимальная вязкость модификатора, изменяющаяся незначительно вплоть до температурного уровня

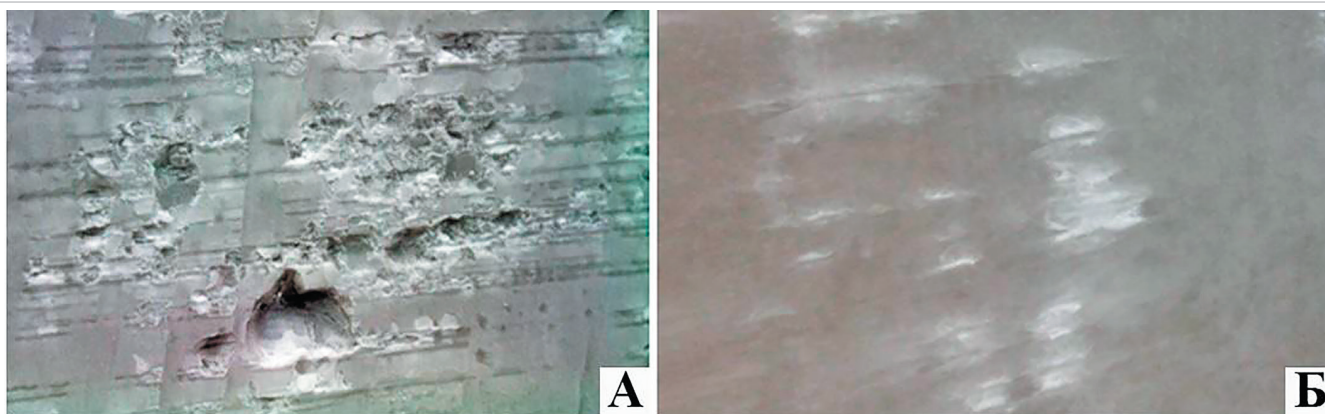


Рисунок 4. Ледовое покрытие санно-бобслейной трассы:
а) без внесения модифицирующих соединений; б) с добавлением модификаторов
Figure 4. Ice coverage of the bobsleigh track; a) without the modifying compounds; b) with the ice modifiers added

минус 70 °С, что способствует более равномерному распределению модифицирующего соединения в объеме заливаемой воды. В связи с этим облегчается процесс дальнейшего перераспределения модификатора при эксплуатации ледового объекта.

- Модификатор должен включать как поверхностно активные (ПАВ), так и поверхностно инактивные (ПИВ) соединения, молекулы которых взаимодействуют с водой сильнее, чем молекулы воды между собой, и увлекаются в глубину разлитого слоя.
- Возможность направленного увеличения или снижения фрикционного взаимодействия со льдом. Увеличение фрикционного взаимодействия необходимо для повышения управляемости транспортных средств на модифицированном ледовом покрытии, а также для снижения тормозного пути, в частности, самолетов при посадке. Уменьшение фрикционного взаимодействия может быть необходимо для снижения трения при использовании лыж или полозьев для транспортировки грузов или для ослабления интенсивности воздействия судна на припай.

На основе современных исследований, проводимых совместно с МГТУ им. Баумана и ВНИИХИ, были сформированы критерии отбора армирующих материалов, в наибольшей степени способствующих увеличению несущей способности ледовых конструкций в условиях Крайнего Севера [54]:

- максимально возможное отношение смоченной площади элементов армирования к их общей массе;
- высокий показатель собственной прочности материала армирования;
- максимально возможная адгезия армирующих элементов к ледовой матрице;
- существенное превышение длиной армирующих элементов их ширины и высоты;
- жесткость армирующего материала, не превышающая жесткость ледовой матрицы.

Также были проведены исследовательские работы по созданию конструкционных материалов на основе водного льда с учетом всех перечисленных критериев. Задачами данной работы являлись:

- Подбор оптимального состава и концентраций высокомолекулярных модификаторов;
- Подбор и оптимизация армирующего материала и его геометрических характеристик;
- Обеспечение максимальной адгезии между льдом и армирующим материалом.

Были проведены экспериментальные исследования ледовых образцов, намороженных с использованием модифицирующих соединений и армированных базальтовыми волокнами (Рисунок 5). Они подтвердили эффективность предложенных методов воздействия на физико-механические свойства водного льда.

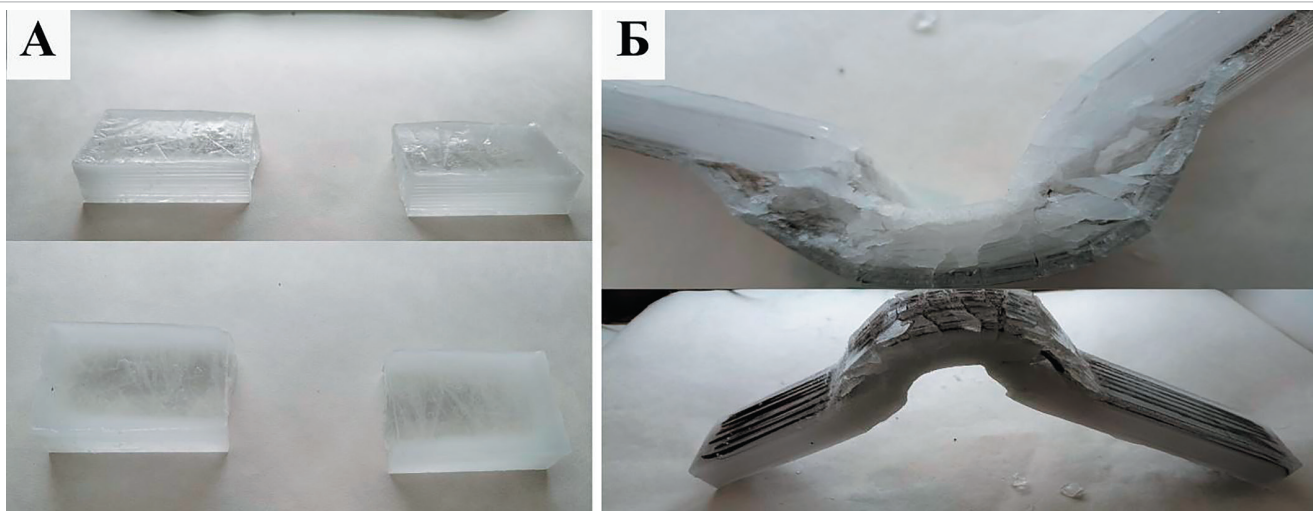


Рисунок 5. Исследуемые ледовые образцы после испытаний:
а) образец из дистиллированной воды; б) образец с модифицирующими компонентами и армированием
Figure 5. The analyzed ice samples after tests exposure:

a) sample of ice made from distilled water; b) sample of ice made with reinforcement fibers and modifying components

Как видно из представленного изображения, совместное применение армирования и ледовых модификаторов (Рисунок 5б) позволило ледовому образцу сохранить свою целостность даже при значительной деформации, образцы можно согнуть под углом 120 градусов, а в некоторых случаях — до 90 градусов. Внесение модификаторов купирует развитие трещин в образце благодаря появлению демпфирующей субстанции в межкристаллическом пространстве, а волокна способствуют сохранению целостности образца даже после частичного разрушения, в отличие от образцов на основе дистиллированной воды (Рисунок 5а). Это особенно важно при эксплуатации ледовых переправ, на которых разрушение ледового полотна приводит к наиболее тяжелым последствиям, человеческим жертвам и потерям автотранспорта.

В исследованиях последних лет [55] было также установлено, что прочностные свойства ледовых покрытий, формируемых за счет естественного холода, зависят также от третьего фактора — режимных параметров намораживания, включающих в первую очередь температуру разливаемой воды, толщину единичного слоя и периодичность проведения заливок. От сочетания этих параметров зависит эпюра распределения вносимых в лед модифицирующих соединений и, как следствие, прочностные свойства создаваемого ледового массива. В указанных работах представлен алгоритм определения оптимальных режимных параметров, а также численная модель их расчета в зависимости от изменения тепло-влажностных условий окружающей среды.

Авторами [48] установлено, что применение модифицирующих соединений и армирующих волокон при структурировании ледовых образцов привело к увеличению несущей способности льда до 10-кратного размера; деформация усилилась в 15–20 раз (до 2000%) до разрушения образца, в 100–150 раз возросла работа разрушения образца (Рисунок 6).

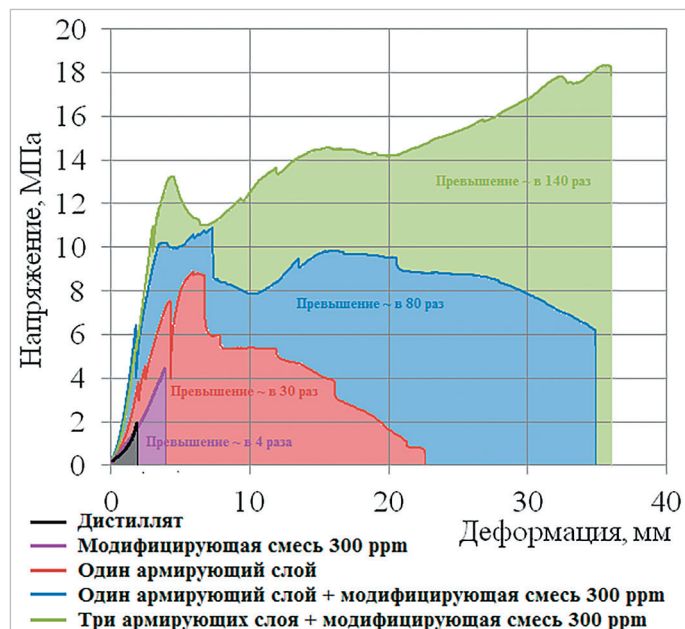


Рисунок 6. Диаграмма напряжение–деформация для различных видов ледовых образцов [48]
Figure 6. Stress-deformation diagram for various types of ice samples [48]

Полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале использования армирования совместно с внесением химических модификаторов и оптимальной настройкой процесса намораживания ледовых массивов при создании

различных объектов, включая сезонные дороги, ледовые переправы и хозяйственные сооружения. Это позволит значительно увеличить срок безопасной эксплуатации таких объектов.

Немаловажным фактором является экологическая безопасность применения модифицирующих веществ и армирования. Внесение химических модификаторов в микродозах не представляет опасности для флоры и фауны; рекомендуемые виды волоконных материалов, в частности, базальтовые волокна, имеют природное происхождение, а геосинтетические материалы не содержат опасных химических веществ, не разлагаются под воздействием тепла и влаги, а также не вступают в реакции с кислотами и щелочами. После эксплуатации зимников и ледовых переправ проводится сбор геосинтетического материала, неповрежденную часть которого возможно задействовать повторно.

Использование в различных сочетаниях представленных методов наиболее перспективно для применения в рамках поддержания НХЦ в северных регионах:

Создание временных ледовых сооружений на основе надувных конструкций или жестких элементов (Рисунок 7) [56]. Подобные быстровозводимые сооружения могут быть использованы в качестве хранилищ пищевой продукции или же в виде различных инженерных объектов, а также распределительных пунктов.



Рисунок 7. Создание ледовых куполообразных конструкций с использованием надувной опалубки [56]
Figure 7. Creation of ice dome structures with the help of inflatable formwork [56]

Увеличение продолжительности эксплуатации и повышение прочностных характеристик автозимников, ледовых переправ и взлетно-посадочных полос в условиях Крайнего Севера.

5. Заключение

В результате проведенного обзора подтверждена актуальность и востребованность современных технологий упрочнения льда при создании автозимников и ледовых переправ. В настоящем обзоре представлены различные подходы к упрочнению льда и показано, что применение современных научных разработок открывает принципиально

новые возможности для использования композиционного материала на основе водного льда в качестве полноценного строительного материала для северных регионов РФ. Важным аспектом является необходимость разработки технологии получения гидрофильных материалов для обеспечения максимальной адгезии с ледовой матрицей, что позволяет значительно повышать прочность и препятствует расслоению сформированного ледового массива. Наибольшие

перспективы имеет совместное использование всех трех факторов, способствующих упрочнению льда: внесение модифицирующих соединений, армирование и оптимизация режимных параметров структурирования ледовых покрытий. Очевидно, что спектр применения описанных разработок будет расширяться, а совершенствование технологий комплексного упрочнения льда является предметом дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Добромиров, В. Н., Фомин, К. И., Мейке, У. Н. (17 ноября 2021). *Оценка разрушающего воздействия строительных самосвалов на опорную поверхность автозимников*. Материалы международной научно-практической он-лайн конференции: Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм. Воронеж, Россия, 2021.
- Невзоров, В. Н., Мацкевич, И. В., Тепляшин, В. Н. (24–29 апреля 2019). *Формирование транспортно-логистической схемы доставки продукции убоа оленины из Красноярского края*. Материалы XIV Международной научно-практической конференции: Логистика-Евразийский мост. Красноярск, Россия, 2019.
- Шапкина, А. М., Забелин, М. М. (2017). Промысловое оленеводство Таймыра: состояние и перспективы развития. *Достижения науки и техники АПК*, 31(9), 39–47.
- Ляпустин, С. Н., Барей, Н. С. (2022). Об особенностях государственного контроля за соблюдением запретов и ограничений при экспорте продукции дикого северного оленя (*Rangifer tarandus*). *Таможенная политика России на Дальнем Востоке*, 1(98), 51–65. <https://doi.org/10.24412/1815-0683-2022-1-51-65>
- Максимов, А. А. (2019). Глубокая переработка продуктов оленеводства: возможности и направления развития. *Известия Коми научного центра УрО РАН*, 4(40), 110–118. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2019-4-110-118>
- Иванов, В. А. (2021). Состояние и направление развития сельской экономики республики Коми. *Вестник института экономических исследований*, 2 (22), 29–37.
- Белозеров, Г. А. (2012). Непрерывная холодильная цепь. *Мясные технологии*, 5(113), 26–28.
- Белозеров, Г. А., Андреев, С. П. (2013). Принципы формирования непрерывных холодильных цепей. *Мясные технологии*, 7(127), 26–28.
- Слободчиков, Н. А. (31 мая – 04 апреля 2021). *Проблемы организации температурного контроля при перевозке режимных грузов*. Материалы XXIV Международной научной конференции: Волновая электроника и инфокоммуникационные системы. Санкт-Петербург, Россия, 2021.
- Полешкина, И. О. (2018). Оценка эффективности продовольственного обеспечения районов Крайнего Севера России. *Экономика региона*, 14(3), 820–835. <https://doi.org/10.17059/2018-3-10>
- Григорьев, С. И. (2016). Автомобильные дороги Республики Саха (Якутия). *Молодой ученый*, 30(134), 47–50.
- Якименко, О. В. (2015). Армирование ледовых переправ. *Техника и технологии строительства*, 2(2), 68–73.
- Федоров, С. А. (2020). *Увеличение длительности эксплуатации автозимников (по материалам, собранным в Республике Саха (Якутия))*. Международная научно-практическая конференция: «Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса». Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2020.
- Нокелайнен, Т. С. (2021). *Картографирование сезонной автотранспортной доступности Арктического региона России*. Международная конференция ИнтерКарто. ИнтерГИС. Москва: МГУ, факультете географии, 2021. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-102-113>
- Masterson, D. M. (2009). State of the art of ice bearing capacity and ice construction. *Cold Regions Science and Technology*, 58(3), 99–112. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.04.002>
- Doudkin, M., Kim, A., Guryanov, G., Eleukenov, M., Bugaev, A., Rogovsky, V. et al. (2019). Process modeling and experimental verification of the conditions of ice coverage destruction of automobile roads. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 42(4), 1–8.
- Бузник, В. М., Пророкова, Н. П. (2020). Лед — планетарное и человеческое измерение. *Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEx)*, 1, 171–176. https://doi.org/10.47367/2413-6514_2020_1_171
- Сулейманов, А. А. (2022). Автомобильные зимники в транспортной системе Якутии в начале 1930–1991 годов. *Научный диалог*, 11(7), 467–482. <https://doi.org/10.24224/2227-1295-2022-11-7-467-482>
- Сулейманов, А. А. (2019). «Ресурсы холода» в транспортной системе Якутии. Конец XIX — нач. XXI вв. *Традиционные национально-культурные и духовные ценности как фундамент инновационного развития России*, 1(15), 60–64.
- Давыдов, Н. В., Райшев, Д. В. (14 апреля 2010). *Классификация армирующих материалов для строительства зимников*. Материалы международной научно-технической конференции: Транспортные и транспортно-технологические системы. Тюмень, Россия, 2010.
- Скрипченко, Е. А., Игнатова, О. А. (21 мая 2021). *Особенности устройства зимних дорог и переправ*. Материалы III Международной научно-технической конференции: Автомобили, транспортные системы и процессы: настоящее, прошлое и будущее. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021.
- Федорова, Л. Л., Омеляненко, А. В., Федоров, М. П., Саввин, Д. В. (2015). Результаты экспериментальных георадиолокационных обследований ледовых переправ и автомобильных дорог Якутии. *Наука и образование*, 1(77), 61–65.
- Charlebois, L., Barrette, P. (August 18–22, 2019). *Ice reinforcement: Selection criteria for winter road applications and outcomes of preliminary testing*. Proceedings of 18th International Conference on Cold Regions Engineering and 8th Canadian Permafrost Conference. Quebec, Canada, 2019. <https://doi.org/10.1061/9780784482599.014>
- Ипатов, К. И., Васильев, А. С., Земляк, В. Л. (2019). Исследование влияния поверхностного армирования на несущую способность. *Вычислительная механика сплошных сред*, 12(1), 98–105. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2019.12.1.9>
- Тимофеева, М. Г. (2017). Использование «пайкерита» для армирования ледовых переправ. *Научно-практические исследования*, 4(4), 70–72.
- Лотышева, А. А., Якименко, О. В., Лунев, А. А. (25–26 ноября 2021). *Экспериментальные исследования образцов льда армированного природными материалами*. Материалы VI Международной научно-практической конференции: Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Омск, Россия, 2021.
- Ипатов, К. И., Васильев, А. С., Земляк, В. Л., Лесков, Е. В. (2019). Несущая способность ледяного покрова при поверхностном армировании. *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*, 3(40), 3–12. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-1>
- Козин, В. М., Васильев, А. С., Земляк, В. Л., Ипатов К. И. (2019). Исследование предельного состояния ледяного покрова в условиях чистого изгиба при усилении армирующими элементами. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, 61, 61–69. <https://doi.org/10.17223/19988621/61/6>
- Васильев, Н. К., Иванов, А. А., Шаталина, И. Н. (2013). Методы упрочнения и армирования льда для конструкций гидротехнических сооружений из ледяных и льдогрунтовыми композитов. *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика*, 13(3), 31–37.
- Vasiliev, N. K., Gladkov, M. G. (June 16–19, 2003). *Ice composites: Mechanical properties and methods of creations*. Proceedings of the 17th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'03). Trondheim, Norway, 2003.
- Сиротюк, В. В., Якименко, О. В., Левашов, Г. М., Захаренко, А. А. (2015). Расширение опытно-производственного внедрения усиления ледового покрова геосинтетическими материалами. *Техника и технологии строительства*, 2(2), 58–68.
- Якименко, О. В., Сиротюк, В. В. (2014). Армирование ледовых переправ. *Криосфера земли*, 18(1), 88–91.
- Козин, В. М. (2022). Возможности увеличения прочности ледяного покрова путем его армирования. *Морские интеллектуальные технологии*, 2–1(56), 29–34. <https://doi.org/10.37220/MT.2022.56.2.003>
- Лесков, Е. В., Васильев, А. С., Родионов, С. В., Ипатов, К. И., Земляк, В. Л. (2018). Исследование деформируемости ледовых переправ при поверхностном армировании композиционными материалами. *Вестник АМГУ*, 81, 19–24.
- Müller, W., Saathoff, F. (2015). Geosynthetics in geoenvironmental engineering. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16(3), Article 034605. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/16/3/034605>
- Lou, X., Wu, Y. (2021). Splitting tensile mechanical properties of plain ice and fiber reinforcement ice. *Cold Regions Science and Technology*, 192, Article 103381. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103381>

37. Vasiliev, N. K., Pronk, A. D. C., Shatalina, I. N., Janssen, F. H. M. E., Houben, R. W. G., (2015). A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 115, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.03.006>
38. Васильев, Н. К., Шаталина, И. Н. (2011). Методы армирования льда для создания ледяных и льдогрунтовых композитов. *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*, 264, 119–129.
39. Патент № 1649418. Способ получения искусственного льда / Рогожин, С. В., Чеверев, В. Г., Вайнерман, Е. С., Гагарин, В. Е., Лозинский, В. И., Торбин, В. В., и др. Опубл. 15.05.1991. Бюлл. № 18.
40. Павлов, В. В., Гайдуллин, Р. О. (2015). Использование льда в строительстве. Новая наука: теоретический и практический взгляд, 6 (1), 36–39.
41. Васильев, Н. К., Пронк, А. Д. С. (2015). Ледяные и льдогрунтовые композиты как строительные материалы в ледяных сооружениях. *Известия всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*, 277, 35–45.
42. Лотышева, А. А., Лунев, А. А., Якименко, О. В. (2022). Экспериментальные исследования образцов льда армированного отходами деревообрабатывающего производства. Материалы V Национальной научно-практической конференции: Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Омск, Россия, 2022.
43. Трапезников, А. А., Бартоломей, И. Л. (2019). Использование геосинтетических материалов при устройстве ездового полотна ледовых переправ. *Химия. Экология. Урбанистика*, 2, 192–196.
44. Карпунин, А. А., Шабуров, С. С. (2016). Использование геосинтетических материалов при сооружении и эксплуатации ледовых переправ в Иркутской области. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*, 4(19), 113–121.
45. Karpushko, M. O., Bartolomei, I. L., Karpushko, E. N., Zhidelev, A. V. (2020). Reinforcement of ice crossings with geosynthetic materials. *Materials Science Forum*, 992, 118–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.118>
46. Barette, P. D. (2020). Reinforcement of ice covers for transportation: beam and preliminary plate testing. Technical Report (National Research Council of Canada. Ocean, Coastal and River Engineering). <https://doi.org/10.4224/8894844>
47. Васильев, Н. К., Караулина, М. М., Марченко, А. В., Сахаров, А. Н., Чистяков, П. В. (2015). Испытания консолей армированного морского льда. *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева*, 277, 46–55.
48. Buznik, V. M., Goncharova, G. Yu., Grinevich, D. V., Nuzhny, G. A., Razomasov, N. D., Turalin, D. O. (2022). Strengthening of ice with basalt materials. *Cold Regions Science and Technology*, 196, Article 103490. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103490>
49. Сыромятникова, А. С., Федорова, Л. К. (2022). Перспективы применения ледяных композиционных материалов для строительства ледовых переправ. *Арктика: экология и экономика*, 12(2), 281–287. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-2-281-287>
50. Гончарова, Г. Ю. (2007). Современные технологии создания ледового покрытия для различных видов спорта или ледовая гомеопатия. *Холодильная техника*, 7, 12–17.
51. Архаров, И. А., Гончарова, Г. Ю. (2010). Экспериментальное исследование ледовых структур, модифицированных полимерами. *Холодильная техника*, 11, 46–50.
52. Гончарова, Г. Ю., Разомасов, Н. Д., Уманский, В. Л. (2017). Новый подход к структурированию композиционных материалов на основе естественного льда применительно к ледокольным судам, шельфовым сооружениям и другим объектам арктической зоны. *Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования*, 3(12), 29–34.
53. Goncharova, G. Yu., Razomasov, N. D., Borshev, G. V. (2021). Chemically modifying ice and ice-based materials to control their properties. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 55(5), 1045–1055. <https://doi.org/10.1134/S0040579521050055>
54. Разомасов, Н. Д. (2022). Исследование влияния холодно-технологических режимов намораживания на физико-механические свойства водного льда. Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана. — 17 с.
55. Goncharova, G. Yu., Stepanov, R. O., Razomasova, T. S., Korolev, I. A., Turalin, D. O., Kulagin, Yu. A. et al. (2021). A new method of strengthening of ice blocks formed under conditions of natural cold. *Russian Journal of General Chemistry*, 91(Suppl 1), S34–S40. <https://doi.org/10.1134/S1070363221130351>
56. Pronk, A. D. C., Wu, Y., Luo, P., Li, Q., Liu, X., Brands, S. et al. (July 16–20, 2018). Design and construct of the 30.5 meter Flamenco Ice Tower. Proceedings of the IASS Symposium 2018: Creativity in Structural Design. Boston, USA, 2018.

REFERENCES

1. Dobromirov, V. N., Fomin, K. I., Meike, U. N. (November 17, 2021). *Evaluation of the destructive impact of construction dump trucks on the support surface of auto-zimers*. Processing of the International Scientific and Practical Online Conference: Arctic: Innovative technologies, Personnel, Tourism. Voronezh, Russia, 2021. (In Russian)
2. Nevzorov, V. N., Matskevich, I. V., Teplyashin, V. N. (April 24–29, 2019). *Formation of transport and logistics schemes of delivery of products of slaughter of reindeer of the Krasnoyarsk territory*. Processing of the XIV International Scientific and Practical Conference: Logistics — the Eurasian Bridge. Krasnoyarsk, Russia, 2019. (In Russian)
3. Shapkina, A. M., Zabelin, M. M. (2017). Commercial reindeer-raising of taymyr: state and prospects of development. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 31(9), 39–47. (In Russian)
4. Lyapustin, S. N., Barei, N. S. (2022). On the Peculiarities of State Control over the Observance of Prohibitions and Restrictions when Exporting Wild Reindeer (*Rangifer tarandus*) Products. *Customs policy of Russia on Long-Distance Production*, 1(98), 51–65. <https://doi.org/10.24412/1815-0683-2022-1-51-65> (In Russian)
5. Maximov, A. F. (2019). Deep processing of reindeer husbandry products: opportunities and directions for development. *Proceedings of the Komi Scientific center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 4(40), 110–118. <https://doi.org/10.19110/1994-5655-2019-4-110-118> (In Russian)
6. Ivanov, V. A. (2021). State and directions for development of the rural economy of the Komi Republic. *Herald of the Institute of Economic Research*, 2 (22), 29–37. (In Russian)
7. Belozarov, G. A. (2012). Sustainable cold chain. *Meat Technologies*, 5(113), 26–28. (In Russian)
8. Belozarov, G. A., Andreev, S. P. (2013). Principles of forming sustainable cold chains. *Meat Technologies*, 7(127), 26–28. (In Russian)
9. Slobodchikov N. A. (31 May — 04 June, 2021). *Problems of temperature control during transportation of regime cargoes*. Proceedings of the XXIV international scientific conference: Wave electronics and info communication systems. Saint Petersburg, Russia, 2021. (In Russian)
10. Poleshkina, I. O. (2018). Problems of food security in the regions of the far north of Russia. *Economy of Regions*, 14(3), 820–835. <https://doi.org/10.17059/2018-3-10> (In Russian)
11. Grigoryev, S. I. (2016). Roads of the Republic of Sakha (Yakutia). *Young Scientist*, 30(134), 47–50. (In Russian)
12. Yakimenko, O. V. (2015). Reinforcement of ice crossings. *Construction Techniques and Technologies*, 2(2), 68–73. (In Russian)
13. Fedorov, S. A. (2020). *Extended use duration ice-road ferries (according to materials collected in the Republic of Sakha (Yakutia))*. Processing Scientific and Practical Conference: Far East: Problems of Development of Architectural and Construction Complex. Khabarovsk: Pacific State University, 2020. (In Russian)
14. Nokelaynen, T. S. (2021). *Mapping of seasonal road transport accessibility in the Arctic region of Russia*. InterCarto. InterGIS, Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-102-113>. (In Russian)
15. Masterson, D. M. (2009). State of the art of ice bearing capacity and ice construction. *Cold Regions Science and Technology*, 58(3), 99–112. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.04.002>
16. Doudkin, M., Kim, A., Guryanov, G., Eleukenov, M., Bugaev, A., Rogovsky, V. et al. (2019). Process modeling and experimental verification of the conditions of ice coverage destruction of automobile roads. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 42(4), 1–8.
17. Bouznik, V. M., Prorokova, N. P. (2020). Ice — planetary and human contents. *Physics of Fibrous Materials: Structure, Properties, Science Intensive Technologies and Materials (SMARTX)*, 1, 171–176. <https://doi.org/10.47367/2413-6514.2020.1.171> (In Russian)
18. Suleymanov, A. A. (2022). Automobile winter roads in transport system of Yakutia in early 1930–1991. *Nauchnyi Dialog*, 11(7), 467–482. <https://doi.org/10.24224/2227-1295-2022-11-7-467-482>. (In Russian)
19. Suleymanov, A. A. (2019). “Resources of cold” in transport system of Yakutia. End of XIX — begin of XXI centuries. *Traditional National-Cultural and Spiritual Values Innovative Development Basis of Russia*, 1(15), 60–64. (In Russian)
20. Davydov, N. V., Raishev, D. V. (April 14, 2010). *Classification of reinforcing materials for the construction of winter roads*. Materials of the International Scientific and Technical Conference: Transport and transport-technological systems. Tyumen, Russia, 2010. (In Russian)
21. Skripchenko, E. A., Ignatova, O. A. (21 May, 2021). *Features of winter roads and crossings*. Proceedings of 3rd International Scientific and Technical Conference: Automobiles, transport systems and processes: present, past and future. Kursk: Southwest State University 2021. (In Russian)
22. Fedorova, L. L., Omelyanenko, A. V., Fedorov, M. P., Savvin D. V. (2015). Results of experimental georadar installations of ice crossings and highways of Yakutia. *Science and Education*, 1(77), 61–65. (In Russian)
23. Charlebois, L., Barrette, P. (August 18–22, 2019). *Ice reinforcement: Selection criteria for winter road applications and outcomes of preliminary testing*. Proceedings of 18th International Conference on Cold Regions Engineering and 8th Canadian Permafrost Conference. Quebec: Canada, 2019. <https://doi.org/10.1061/9780784482599.014>
24. Ipatov, K. I., Vasilyev, A. S., Zemlyak, V. L., (2019). Study of the influence of surface reinforcement on the bearing capacity of ice. *Computational Continuum Mechanics*, 12(1), 98–105. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2019.12.1.9> (In Russian)

25. Timofeeva, M. G. (2017). Use of “pykrete” for reinforcement of ice crossings. *Scientific and Practical Research*, 4(4), 70–72. (In Russian)
26. Lotysheva, A. A., Yakimenko, O. V., Lunev, A. A. (25–26 November, 2021). *Experimental studies of reinforced ice*. Proceedings of VI International Scientific and Practical Conference: Architectural, Construction and Road Transport Complexes: Problems, Prospects, Innovations. Omsk, Russia, 2021. (In Russian)
27. Ipatov, K. I., Vasilyev, A. S., Zemlyak, V. L., Leskov, E. V. (2019). Carrying capacities of the ice cover with surface reinforcement. *School of Engineering Bulletin*, 3(40), 3–12. <https://doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-1> (In Russian)
28. Kozin, V. M., Vasilyev, A. S., Zemlyak, V. L., Ipatov K. I. (2019). Research of the limiting state of ice cover under conditions of pure bending with reinforcement by reinforcing elements. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*, 61, 61–69. <https://doi.org/10.17223/19988621/61/6> (In Russian)
29. Vasilyev, N. K., Ivanov, A. A., Shatalina, I. N. (2013). Methods of hardening and reinforcing ice for structures of hydraulic structures from ice and ice-ground composites. *Bulletin of Novosibirsk State University. Series: Mathematics, Mechanics, Computer Science*, 13(3), 31–37. (In Russian)
30. Vasiliev, N. K., Gladkov, M. G. (16–19 June, 2003). Ice composites: Mechanical properties and methods of fabrication. Proceedings of the 17th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'03). Trondheim, Norway, 2003.
31. Sirotuk, V. V., Yakimenko, O. V., Levashov, G. M., Zakharenko, A. A. (2015). Extension of pilot-instant production implementation amplification of ice cover geosynthetic materials. *Construction Techniques and Technologies*, 2(2), 58–68. (In Russian)
32. Yakimenko, O. V., Sirotuk, V. V. (2014). Reinforcement of ice crossings. *Kriosfera Zemli*, 18(1), 88–91. (In Russian)
33. Kozin, V. M., (2022). The possibility of increasing the strength of the ice cover by reinforcing it. *Marine Intelligent Technologies*, 2–1(56). 29–34. <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.56.2.003> (In Russian)
34. Leskov, E. V., Vasiliev, A. S., Rodionov, S. V., Ipatov, K. N., Zemlyak, V. L. (2018). Investigation of the deformability of ice ribs at surface mounting by composite materials. *Herald of AmSU*, 81, 19–24. (In Russian)
35. Müller, W., Saathoff, F. (2015). Geosynthetics in geoenvironmental engineering. *Science and Technology of Advanced Materials*, 16(3), Article 034605. <http://dx.doi.org/10.1088/1468-6996/16/3/034605>
36. Lou, X., Wu, Y. (2021). Splitting tensile mechanical properties of plain ice and fiber reinforcement ice. *Cold Regions Science and Technology*, 192, Article 103381. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103381>
37. Vasiliev, N. K., Pronk, A. D. C., Shatalina, I. N., Janssen, F. H. M. E., Houben, R. W. G. (2015). A review on the development of reinforced ice for use as a building material in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 115, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.03.006>
38. Vasiliev, N. K., Shatalina, I. N. (2011). Methods of ice reinforcement to form ice and ice-earth composites. *Proceedings of the VNIIG*, 264, 119–129. (In Russian)
39. Rogozhin, S. V., Cheverev, V. G., Vainerman, E. S., Gagarin, V. E., Lozinskiy, V. I., Torbin, V. V. et al. Method for obtaining artificial ice. Patent RF, no. 1649418. 1991. (In Russian)
40. Pavlov V. V., Gubaidullin R. O., (2015) Use of ice in construction. *New Science: Theoretical and Practical View*, 6(1), 36–39. (in Russian)
41. Vasilyev, N. K., Pronk, A. D. C. (2015). Ice and ice-soil composites as construction materials in ice structures. *Proceedings of the VNIIG*, 277, 35–45. (In Russian)
42. Lotysheva, A. A., Lunev, A. A., Yakimenko, O. V. (2022). *Experimental studies of samples of ice reinforced with waste from woodworking production*. Processing V National Scientific and Practical Conference: Education. Transport. Innovation. Construction. Omsk, Russia, 2022. (In Russian)
43. Trapeznikov, A. A., Bartolomei, I. L. (2019). The use of geosynthetic materials in the device of the ice crossing. *Chemistry, Ecology, Urbanistics*, 2, 192–196. (In Russian)
44. Karpunin, A. A., Shaburov, S. S. (2016). Use of geosynthetic materials during the construction and exploitation of ice bridges in Irkutsk region. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real Estate*, 4(19), 113–121. (In Russian)
45. Karpushko, M. O., Bartolomei, I. L., Karpushko, E. N., Zhidelev, A. V. (2020). Reinforcement of Ice Crossings with Geosynthetic Materials. *Materials Science Forum*, 992, 118–123. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.118>
46. Barette, P. D. (2020). Reinforcement of ice covers for transportation: beam and preliminary plate testing. Technical Report (National Research Council of Canada. Ocean, Coastal and River Engineering). <https://doi.org/10.4224/8894844>
47. Vasilyev, N. K., Karulina, M. M., Marchenko, A. V., Sakharov, A. N., Chistyakov, P. V. (2015). Testing of cantilevers of reinforced sea ice. *Proceedings of the VNIIG*, 277, 46–55. (In Russian)
48. Buznik, V. M., Goncharova, G. Yu., Grinevich, D. V., Nuzhny, G. A., Razomasov, N. D., Turalin, D. O. (2022). Strengthening of ice with basalt materials. *Cold Regions Science and Technology*, 196, Article 103490. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103490>
49. Syromyatnikova, A. S., Fedorova, L. K. (2022). Prospects for the application of ice composite materials for the construction of ice crossings. *Arctic: Ecology and Economy*, 12(2), 281–287. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-2-281-287> (In Russian)
50. Goncharova, G. Yu. (2007). Modern technologies for creation of ice coating for different kinds of sports, or the ice homeopathy. *Kholodilnaya Tekhnika*, 7, 12–16. (In Russian)
51. Arkharov, I. A., Goncharova, G. Yu. (2010). Experimental investigation of ice structures modified by polymers. *Kholodilnaya Tekhnika*, 11, 46–50. (In Russian)
52. Goncharova, G. Yu., Razomasov, N. D., Umanskiy, V. L. (2017). A new approach to the structuring of composite materials based on natural ice in relation to icebreaking ships, offshore structures and other objects of the Arctic zone. *Problems of Development of Ship Armament and Shipborne Radio-Electronic Equipment*, 3(12), 29–34. (In Russian)
53. Goncharova, G. Yu., Razomasov, N. D., Borshev, G. V. (2021). Chemically modifying ice and ice-based materials to control their properties. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 55(5), 1045–1055. <https://doi.org/>
54. Razomasov, N. D. (2022). Research examination of refrigeration-technological modes of freezing physical and mechanical properties of water ice. Author's abstract of the dissertation for the scientific degree of Candidate of Technical Sciences. Moscow, Bauman University, 17 p. (In Russian)
55. Goncharova, G. Yu., Stepanov, R. O., Razomasova, T. S., Korolev, I. A., Turalin, D. O., Kulagin, Yu. A. et al. (2021). A new method of strengthening of ice blocks formed under conditions of natural cold. *Russian Journal of General Chemistry*, 91(Suppl 1), S34–S40. <https://doi.org/10.1134/S1070363221130351>
56. Pronk, A. D. C., Wu, Y., Luo, P., Li, Q., Liu, X., Brands, S. et al. (July 16–20, 2018). Design and construct of the 30.5 meter Flamenco Ice Tower. Proceedings of the IASS Symposium 2018: Creativity in Structural Design. Boston, USA, 2018.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	AUTHOR INFORMATION
Принадлежность к организации	Affiliation
Гончарова Галина Юрьевна — доктор технических наук, профессор, кафедра «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения», Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, 5/1 Заведующая лабораторией систем хладоснабжения и теплофизических измерений, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 Тел.: +7–985–233–49–31 E-mail: galinagoncharova@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4270-819X Борзов Сергей Сергеевич — инженер, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана 105005, Москва, 2-я Бауманская улица, 5/1 Младший научный сотрудник, лаборатория систем хладоснабжения и теплофизических измерений, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 Тел.: +7–495–610–41–61 E-mail: donsб@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4431-1815 Борщев Георгий Владимирович — младший научный сотрудник, лаборатория систем хладоснабжения и теплофизических измерений, Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности 127422, Москва, ул. Костякова, 12 Тел.: +7–495–610–41–61 E-mail: razorleaf.619@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8878-1571 * автор для контактов	Galina Y. Goncharova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of “Refrigerating and Cryogenic Technology, Systems of Air Conditioning and Life Support”, Bauman Moscow State Technical University 5/1, Second Bauman str., 105005, Moscow, Russia Head of the Laboratory of Refrigeration Systems and Thermophysical Measurements, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostykova str., 127422, Moscow, Russia Tel.: +7–985–233–49–31 E-mail: galinagoncharova@mail.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4270-819X Sergey S. Borzov, Engineer, Bauman Moscow State Technical University 5/1, Second Bauman str., 105005, Moscow, Russia Junior Researcher, Laboratory of Refrigeration Systems and Thermophysical Measurements, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostykova str., 127422, Moscow, Russia Tel.: +7–495–610–41–61 E-mail: donsб@bk.ru ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4431-1815 Georgiy V. Borshchev, Junior Researcher, Laboratory of Refrigeration Systems and Thermophysical Measurements, All-Russian Scientific Research Institute of Refrigeration Industry 12, Kostykova str., 127422, Moscow, Russia Tel.: +7–495–610–41–61 E-mail: razorleaf.619@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8878-1571 * corresponding author
Критерии авторства	Contribution
Авторы в равных долях имеют отношение к написанию рукописи и одинаково несут ответственность за плагиат.	Authors equally relevant to the writing of the manuscript, and equally responsible for plagiarism.
Конфликт интересов	Conflict of interest
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.	The authors declare no conflict of interest.