

ТЕХНОЛОГИИ СОХРАНЕНИЯ МЕРЗЛОТНИКОВ (ЛЕДНИКОВ) ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ СЕВЕРНЫХ ПОСЕЛЕНИЙ

Е. Ю. Локтионов¹, Е. С. Шараборова², А. В. Клоков¹, А. А. Маслаков³, К. С. Сотникова³,
А. А. Коршунов⁴

¹ Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (Москва, Российская Федерация)

² École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Лозанна, Швейцария)

³ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

⁴ Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова (Архангельск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 30 октября 2023 г.

Для цитирования

Локтионов Е. Ю., Шараборова Е. С., Клоков А. В. и др. Технологии сохранения мерзлотников (ледников) для обеспечения устойчивого развития северных поселений // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 1. — С. 116—126. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-116-126.

В Арктике традиционным способом долговременного хранения мяса и рыбы вблизи мест их промысловой добычи в теплое время года являются мерзлотники (лédники). В связи с деградацией вечной мерзлоты эти сооружения повсеместно приходят в аварийное состояние. На примере чукотского национального села Лорино, где сохраняется традиционная охота на морского зверя, рассмотрены варианты решения проблемы сохранения добытого мяса. Экономические оценки показывают, что использование мерзлотника целесообразно при хранении свыше 100 т продукции, при меньших объемах имеет смысл переходить на рефрижераторные контейнеры с питанием от возобновляемых источников энергии. Продажа излишков электроэнергии и теплоты, отводимой холодильной машиной, может способствовать генерации значительных доходов. Особенно если эта энергия направляется на создание максимальной в данных условиях добавленной стоимости, например, в овощеводстве.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, холодильная техника, термостабилизация грунтов, возобновляемые источники энергии, фотоэлектрические модули, солнечные батареи, тепловые насосы, утилизация энергии, агротехнологии, тригенерация.

Введение

Мерзлотник или лédник — это подземное хранилище пищевых продуктов, прорубленное в многолетней мерзлоте. Такие хранилища используются коренными народами Арктики с древних времен: старейший мерзлотник был обнаружен в 2005 г. на острове Гамбелл (Аляска, США), и его возраст — около 1000 лет [1]. Крупнейший в России и мире построенный вручную мерзлотник объемом 3200 м³, вмещающий 1750 т рыбы (с температурой хране-

ния –10...–15°C), находится в поселке Новый порт Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО). Также известны мерзлотники в Якутии [2], на Таймыре, в Канаде, на Чукотке [3] и Аляске [1; 4]. Даже о мерзлотниках, расположенных в населенных пунктах, данных в литературе крайне мало. Большое количество лédников было создано при факториях, рыболовецких базах, отдельных промысловых стоянках — об этих объектах сведений в литературе практически нет.

Большинство подземных хранилищ уже уничтожено временем, оставшиеся разрушаются в основном в связи с изменением климата и вызванными

им экзогенными геологическими процессами. Наблюдаемое потепление климата происходит с беспрецедентной скоростью: с 1850 по 2020 гг. рост приповерхностной температуры воздуха в среднем по Земному шару составил 0,84—1,10°C, а к концу XXI в., согласно данным по ансамблю моделей CMIP6, она может подняться еще на 1,0—5,7°C в зависимости от климатического сценария [5]. При этом приземная температура воздуха в Арктике растет почти в шесть раз быстрее, чем в среднем по Земному шару [6]. В результате наблюдаемых изменений происходят увеличение мощности сезонно талого (деятельного) слоя грунта (СТС) и рост температуры мерзлых пород [7; 8]. Растепление и деградация мерзлоты провоцируют активизацию процессов термокарста и термоэрозии [9], эмиссию парниковых газов [10]. Для экономически освоенных территорий фиксируются снижение несущей способности свайных фундаментов, деформация инженерных сооружений и разрушение объектов инфраструктуры, ведущие к росту экономических потерь [11]. Прогнозные оценки свидетельствуют, что к середине XXI в. около 70% инженерных сооружений Арктики, включая мерзлотники, будет подвержено негативному влиянию деградации мерзлоты, а финансовый ущерб будет достигать десятков миллиардов долларов [12—14].

Нередко дополнительный негативный эффект оказывает неправильное обслуживание мерзлотников — отсутствие проветривания зимой, проникновение теплого воздуха летом, недобросовестные мероприятия по очистке помещений и их наполнению свежим льдом, общее ухудшение финансовой обстановки в сфере обслуживания хранилищ. В поселениях Аляски зафиксированы многочисленные случаи затопления и разрушения мерзлотников в связи со строительством на смежных участках [4].

Поддержание хранилищ пищевых продуктов в рабочем состоянии позволяет коренным жителям изолированных поселений Арктики заниматься традиционными промыслами (охотой на морских млекопитающих и пушным звероводством), что обеспечивает рабочие места и позволяет получать государственные субсидии. Использование естественного холода многолетней мерзлоты для хранения продуктов летом существенно дешевле рефрижераторных контейнеров и регулярных счетов за электричество, тарифы по которым в десятки раз выше, чем на «материке» [15]. Сохранение и использование мерзлотников также позволяет обеспечивать продовольственную безопасность в условиях перебоев с поставкой энергоресурсов в отдаленные районы Крайнего Севера.

Ранее в результате численного моделирования грунтов вокруг хранилища было показано [16], что температура мерзлоты будет повышаться, что приведет к дальнейшим разрушениям хранилища. Таким образом, в будущем проблема будет усугубляться и уже сейчас нуждается в решении. Для

сохранения мерзлотника можно использовать сезонные охлаждающие устройства (COU) [17; 18], экраны [19], теплоизоляцию, расчистку снега зимой, холодильные машины [20; 21]. Численное моделирование для некоторых из этих способов проведено в [22] для компактных ледников, расположенных близко к поверхности. Возможен также отказ от дальнейшего использования ледника в пользу рефрижераторных контейнеров, в том числе питаемых от возобновляемых источников энергии (ВИЭ), также соответствующих принципам «зеленой» логистики [23].

Целью данной работы является определение наиболее экономически выгодного способа термостабилизации грунтов вокруг ледника для сохранения его от дальнейшего разрушения на основе полученных результатов, а также с точки зрения стоимости хранения продукции и обеспечения продовольственной безопасности, степени целесообразности отказа от ледника в пользу рефрижераторных контейнеров, который происходит в настоящее время.

Объект и методы исследования

Лорино — крупнейшее национальное село на востоке Чукотки с населением около 1000 человек. Промысел морского зверя составляет около 50 серых китов в год. Функционирует песцовая звероферма, для нужд которой и содержится ледник (подробнее см. в [16]). В настоящее время Лоринский ледник — один из двух сохранившихся в регионе, он построен более 50 лет назад [3]. Объем камер хранения составляет около 350 м³ (185 м²). В прежние годы одновременно хранилось 500 т продуктов, а в настоящее время не более 150 т. Максимальная толщина мерзлой засоленной породы над штольнями составляет 7,5 м, средняя — около 4 м, ежегодно оттаивают верхние 1,2—1,5 м. Наиболее уязвимые места для растепления перекрывающей породы — области вблизи выхода штолен (приток тепла вследствие движения воздуха и через тонкий слой грунта на потолке) и в меньшей мере — шурфа на дневной поверхности. Температура хранения в мерзлотнике зимой –4...–6°C, поднимается до –1°C в конце лета, что не позволяет обеспечить качественное хранение мяса (по ГОСТу температура должна быть не выше –10°C). По этой причине запасы мяса, предназначенные для употребления населением в пищу, в селе хранятся в рефрижераторных контейнерах, питаемых от сети.

Стоимость электроэнергии для организаций (наиболее близкий показатель к себестоимости на фоне значительного дотирования тарифов в регионе) в Лорине составляет 0,5 долл./кВт·ч, этот параметр важен при расчете эксплуатационных расходов для рефрижераторных контейнеров. Стоимость тепловой энергии для организаций в Лорине точно не известна, но по аналогии с другими селами района можно предположить, что она составляет около 230 долл./Гкал = 0,2 долл./кВт·ч. Этот показатель

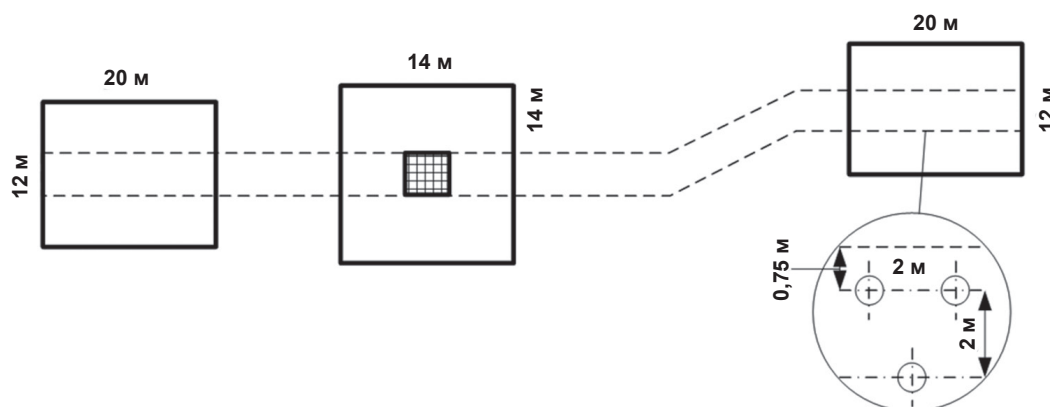


Рис. 1. Схема применения защитных мероприятий (вид сверху). Жирными линиями показаны площади расположения теплоизоляции, навесов, солнечных батарей, грунтовых зондов. Пунктиром показаны штольни; выход шурфа на дневную поверхность заштрихован. Расположение СОУ с длиной подземной части 6 м в два ряда с каждой стороны вдоль всей длины штолен показано на вставке. Составлено авторами

Fig. 1. Scheme of protective measures (top view). Bold line shows areas of thermal insulation, canopies, solar panels, ground probes. The dotted line shows the drifts; the exit of the pits to the day surface is shaded. The location of the SCD (seasonal cooling devices) with a length of the underground part of 6 m in two rows on each side along the entire length of the tunnels is shown in the inset. Compiled by the authors

важен с точки зрения целесообразности утилизации тепла, отводимого холодильными машинами.

Мы рассмотрели классические способы термостабилизации мерзлых грунтов с помощью теплоизоляции, СОУ, холодильной машины с горизонтальными грунтовыми зондами. Солнцезащитные навесы не рассматривались для данного случая, поскольку в [19] было показано, что на Аляске наибольший эффект от них достигается зимой за счет лучшего промораживания грунта, а не летом за счет экранирования. Поскольку Лорино находится в пурговом районе, навесы будут заметены снегом, и эффект от них зимой будет незначительным, кроме того, ледник зимой проветривается. По той же причине негативный эффект от теплоизоляции в зимнее время будет минимальным, поскольку толстый слой снега и без того уменьшает охлаждение грунта. Более подробно методы расчетов описаны в [3; 20].

Термостабилизации подлежат в первую очередь наиболее уязвимые участки пород — вблизи выходов штолен и шурфа на дневную поверхность (горизонтальных и вертикальной выработку соответственно). Мы выбрали для этого участки длиной 12 м от входов в штольни и 6 м вокруг шурфа (рис. 1). СОУ мы предлагаем использовать двумя рядами по обе стороны от штолен (см. вставку на рис. 1).

Методы расчета теплового состояния грунта и климатические условия приведены в [16]. Расчетная модель была усовершенствована путем учета воздействия прямой солнечной радиации и эвапотранспирации. На рис. 2 приведены результаты расчета, полученные для естественных условий (здесь и далее — для сентября, когда достигается максимальная мощность СТС), которые использовались в качестве исходных для планирования защитных мероприятий. Способ термостабилизации грунтов с использованием тепловых насосов, питаемых

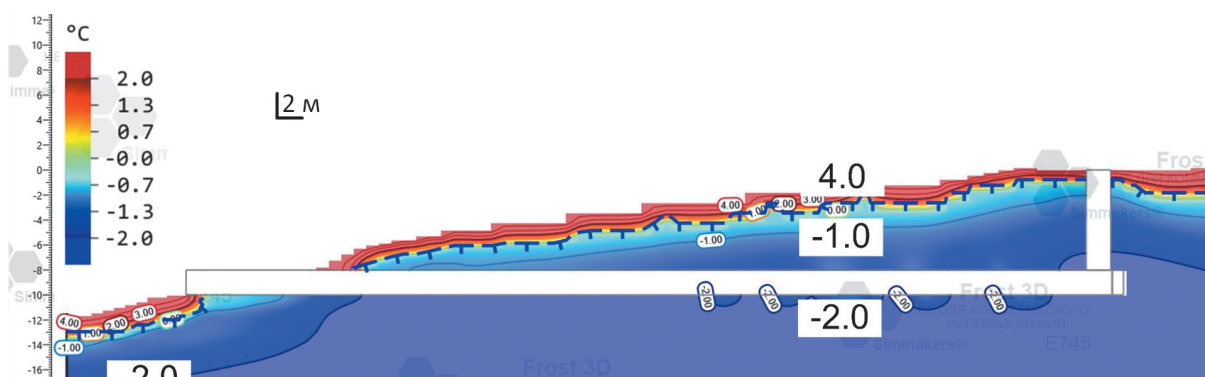


Рис. 2. Распределение температур вокруг штолен и шурфа в естественных условиях. Составлено авторами

Fig. 2. Temperature distribution around the drifts and pits under natural conditions. Compiled by the authors

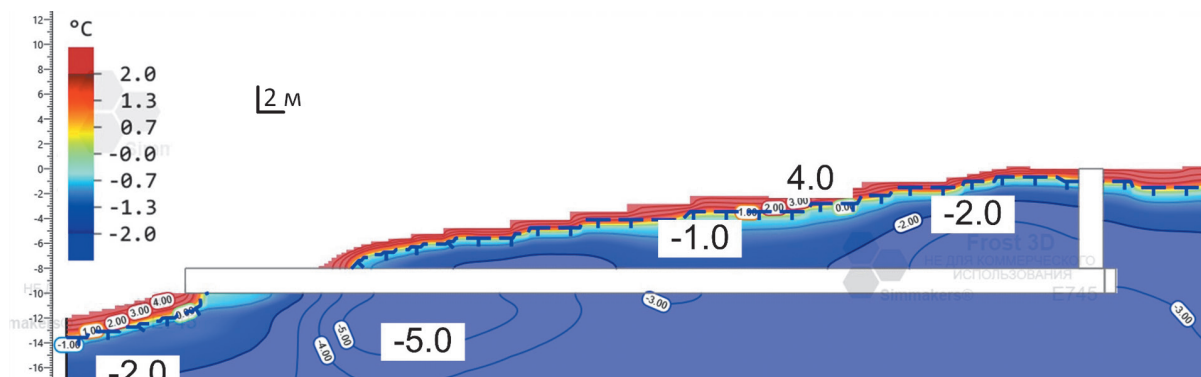


Рис. 3. Распределение температур вокруг штолен и шурфа при использовании СОУ, расположенных по схеме, которая изображена на рис. 1. Составлено авторами

Fig. 3. Temperature distribution around the drifts and pits when using thermosyphons placed according to the layout in Figure 1. Compiled by the authors

от солнечных батарей, подробно описан в [20]. На рис. 2 видно, что у выхода штольни на дневную поверхность нижняя граница СТС достигает потолка, где в действительности и произошло обрушение свода. В этих результатах учтено, что ледник проветривается зимой, поэтому видно, что мощность СТС над штольной меньше, чем справа от шурфа. Также видно, что температура над потолком штольни везде выше -2°C , а значит, высока вероятность наличия незамерзшей воды в засоленной песчано-глинистой породе или ее пребывания в опасном для обрушений пластично-мерзлом состоянии.

Результаты и их обсуждение

Результат расчета распределения температур в породе в случае использования СОУ приведен на рис. 3. Очевиден эффект снижения температуры грунтов вокруг штолен и шурфа ледника, при этом изменение мощности СТС по сравнению с естественными условиями незначительное. Важно отметить, что на достаточно большом участке вблизи выхода штольни на дневную поверхность (около 10 м, слева) температура грунта остается высокой, т. е. сохраняется опасность обрушения. С учетом

интенсивного снегопереноса в этом районе СОУ будут способствовать задержанию снега, поэтому необходимо поднимать выше конденсаторную часть устройства. Глубокий снежный покров также будет способствовать увеличению мощности СТС.

Применение теплоизоляции из 50-миллиметрового экструдированного пенополистирола (рис. 4) позволяет значительно уменьшить мощность СТС на наиболее уязвимом участке, однако температура грунта над большей частью штолен остается выше -2°C , т. е. возможны дальнейшие обрушения. При этом из-за подавления теплообмена грунт при таких недостаточно низких температурах находится дольше, чем при реализации других способов, а значит, выше вероятность обрушений.

На рис. 5 показано распределение температур в сентябре при использовании системы термостабилизации на части поверхности вдоль штолен и вокруг шурфа, где располагаются солнечные батареи и проложены грунтовые зонды из РЕ-Х трубы диаметром 25 мм с антифризом на основе водного раствора этиленгликоля, отводящие тепло из приповерхностного слоя грунта. Видно, что мощность сезонно-талого слоя уменьшается по меньшей мере

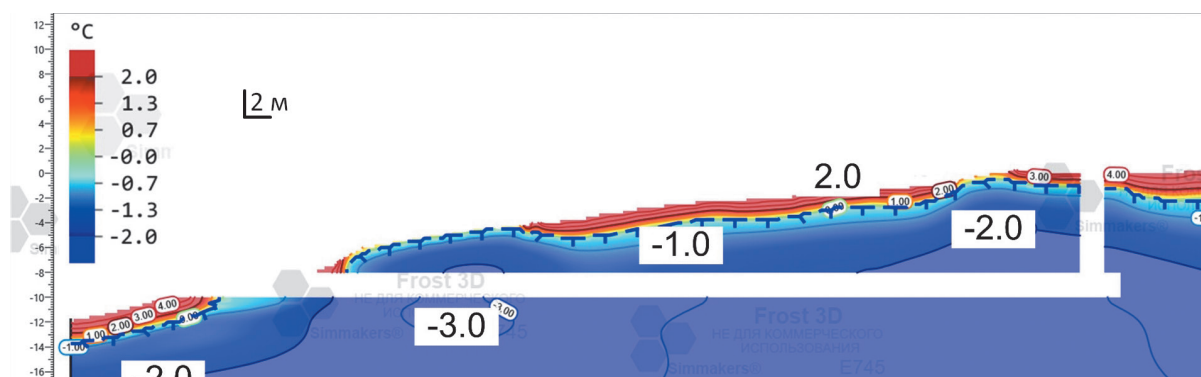


Рис. 4. Распределение температур вокруг штолен и шурфа при использовании теплоизоляции, расположенной по схеме, которая изображена на рис. 1. Составлено авторами

Fig. 4. Temperature distribution around the drifts and pits when using thermal insulation placed according to the layout in Figure 1. Compiled by the authors

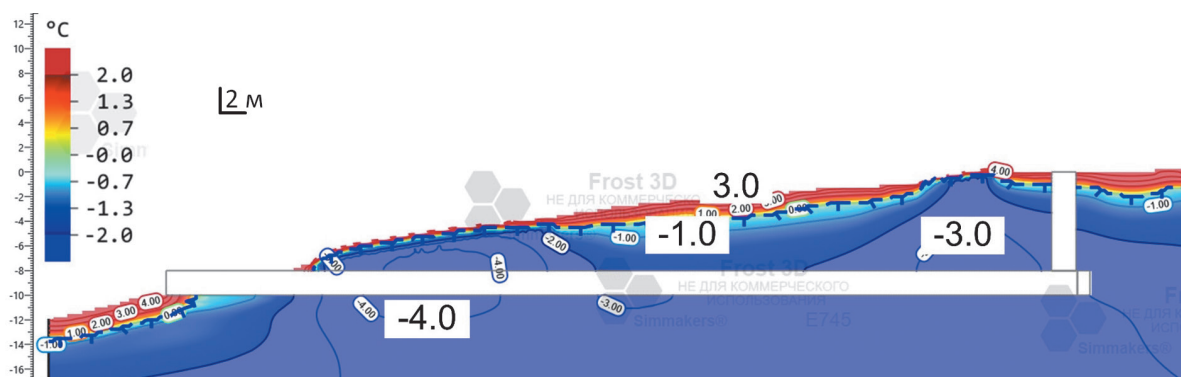


Рис. 5. Распределение температур вокруг штолен и шурфа при использовании солнечных батарей и теплового насоса с горизонтальными грунтовыми зондами, расположенными по схеме, которая изображена на рис. 1. Составлено авторами
Fig. 5. Temperature distribution around the drifts and pits when using solar panels and a heat pump with horizontal ground probes placed according to the layout in Figure 1. Compiled by the authors

в четыре раза по сравнению с естественными условиями, и уже на небольшой глубине достигаются температуры ниже -3°C , в том числе и в зоне начавшихся обрушений слева, что делает маловероятным их дальнейшее развитие.

Однако для мерзлотника, если исходить из его функционального назначения, наиболее важным является охлаждение воздуха, находящегося в нем (в данном случае температура воздуха принята равной -15°C). Это будет способствовать не только охлаждению окружающего грунта, но и хранимых в нем продуктов (для качественного их хранения необходима температура не выше -10°C), а также избавляет от необходимости дополнительных работ (в том числе по расчистке снега над штольнями), которые могут привести к нарушению растительного покрова, растеплению и подвижкам пород. Кроме того, охлаждение воздуха более энергоэффективно по сравнению с грунтом, так как отсутствует промежуточный теплоноситель. В теплицах же целесообразно нагревать грунт, а не воздух, поскольку грунт является бесплатным накопителем энергии, а его слой в 30 см, как показано ниже, создает фазовый сдвиг в подводе тепла в 6—8 ч (в зависимо-

сти от температурного напора), т. е. максимум тепла воздуху в теплице будет отдаваться в ночное время, когда оно и нужно.

На рис. 6 приведены результаты для случая, когда охлаждается не приповерхностный слой грунта, а воздух в леднике (такой подход уже используется для восстановления ледника под Обдорским острогом в Салехарде). Тепловая инерция системы в таком случае становится еще большей. Мы принимали в качестве располагаемой электрической мощности такую же, как и в предыдущем случае, с поправкой на снижение холодильного коэффициента (EER) с 3,3 до 2,5 для более низкой температуры. Результаты показывают, что грунт значительно охлаждается, причем достаточно равномерно, а значит, можно снизить мощность системы и соответственно ее стоимость. Стоит отметить, что слишком низкие температуры грунта также нежелательны, поскольку миграция влаги в сторону фронта промерзания приведет к пучению. Кроме того, на мощность СТС в данном случае практически не влияет экранирование грунта солнечными модулями. Это значит, во-первых, что их не обязательно располагать горизонтально над штольнями, поэтому конфигурацию

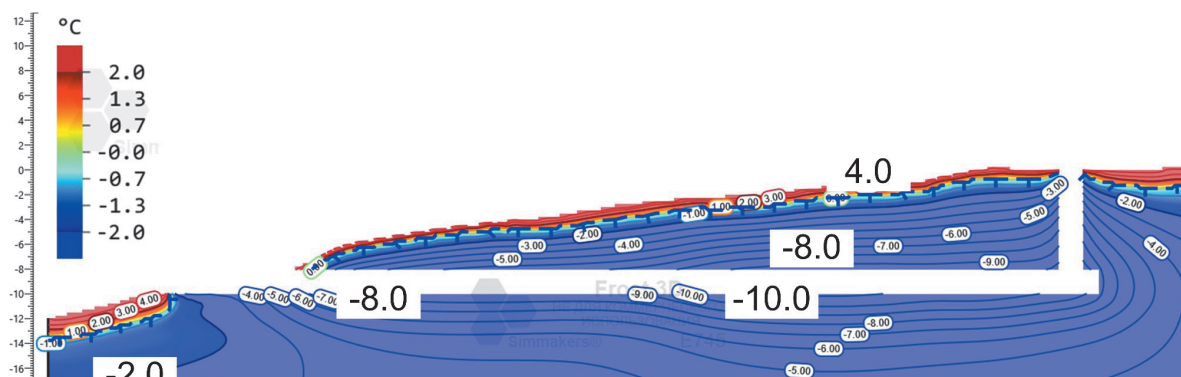


Рис. 6. Распределение температур вокруг штолен и шурфа при использовании солнечных батарей и охлаждения воздуха в леднике. Составлено авторами
Fig. 6. Temperature distribution around the drifts and pits when using solar panels and air-cooling in the ice cellar. Compiled by the authors

солнечной электростанции можно оптимизировать разными способами. Во-вторых, можно запитать тепловой насос от ветрогенераторов (ВЭУ), имеющих значительно (более трех раз) больший коэффициент использования установленной мощности на побережье, чем солнечные модули. Для охлаждения воздуха в штольнях, например, вдоль нижних углов можно проложить перфорированные трубы, из которых выдувается холодный воздух, а вдоль верхних — трубы, с помощью которых он отбирается. При обледенении труб, особенно верхних, в них одновременно может подаваться нагретый воздух от тепловой пушки. Такая схема позволяет не загромождать и без того стесненное пространство в штольнях. Холодильная машина при этом располагается у одного из входов в ледник, где достаточно пространства.

Целесообразно максимально попутно использовать инфраструктуру [24]. Контейнеры могут быть использованы в качестве основания как для солнечных батарей, так и для ветроэнергетических установок. Для побережья ВЭУ являются предпочтительным источником энергии, однако самые жаркие дни преимущественно являются солнечными и безветренными, что необходимо учитывать при питании холодильных машин. Использование накопителей энергии в данном случае не представляется целесообразным, так как рефконтейнеры обладают тепловой инерцией [25], позволяющей демпфировать нестабильную выработку электроэнергии от ВИЭ.

В связи с высокой себестоимостью тепловой и электрической энергии в отдаленных (и тем более временных) северных поселках в случае использования рефрижераторных контейнеров целесообразно питать их от ВИЭ, а отводимое тепло не сбрасывать в атмосферу, но утилизировать. Также важно отметить, что тепловая нагрузка на системы охлаждения сильно коррелирует с интенсивностью солнечного излучения, поэтому питание таких систем от солнечных модулей наиболее целесообразно. При использовании рефрижераторных контейнеров, обладающих относительно низкой тепловой инерцией, особенно в условиях частых туманов на побережье, когда выработка энергии солнечными батареями практически отсутствует, целесообразно также осуществлять питание от ветрогенераторов. При охлаждении грунта и особенно воздуха в штольнях ледника высокая тепловая инерция полностью компенсирует нестабильность солнечной генерации. При питании холодильных машин от ВИЭ использование частотно-регулируемого привода компрессоров дает значительный эффект для наиболее полного использования неравномерно поступающей энергии [26].

Ускорить окупаемость позволит создание добавленной стоимости с использованием отводимого тепла, например, при выращивании овощей [27], в настоящее время доставляемых авиатранспортом. Утилизация теплоты для холодильной машины с коэффициентом преобразования (КОП) от 2,5 (в наших

экспериментах он составлял 4,3) позволяет компенсировать затраты на электроэнергию, используемую для ее работы, при этом температура нагреваемой воды будет достаточна для нужд горячего водоснабжения. Срок окупаемости системы, питаемой от ВИЭ, составляет с учетом продажи излишков электроэнергии от 9 лет (13,5 лет при ставке дисконтирования 5%), а экономическая выгода по сравнению с питанием от сети возникает уже через 2,1 года. В детских дошкольных учреждениях температура разбора горячей воды должна быть не выше 37°C. С учетом относительно невысокой тепловой производительности холодильных систем и достаточно больших размеров детского сада в селе Лорино целесообразно отводить тепло именно на его горячее водоснабжение.

Для выяснения эффекта отвода тепла из охлаждаемого грунта в теплицу и досветки с использованием фитоламп на урожайность нами была построена в Архангельской области экспериментальная установка (рис. 7) по схеме, аналогичной приведенной в [20; 28]. Это две стандартные теплицы (6×3 м) с покрытием из поликарбоната (6 мм) — экспериментальная и контрольная, в них был засыпан одинаковый грунт, смонтирована система автоматического капельного полива, установлены автоматические форточки. Одновременно высажена одинаковая рассада огурцов и помидоров. В экспериментальной теплице на глубине 30 см (это обеспечивало задержку выхода тепловой волны на поверхность грунта около 12 ч, т. е. ночью) был смонтирован грунтовый теплообменник (температура в нем поднималась до 55°C) из РЕ-Х трубы (16 мм) с шагом между трубами 30 см. На трубы были уложены стандартные для теплых полов теплораспределительные пластины из оцинкованной стали (они также защищали трубы от случайного повреждения садовым инструментом), были установлены 6 фитоламп по 18 Вт и автомобильный радиатор (для непосредственного нагрева воздуха в холодные зори), подключенный к контуру грунтового теплообменника. Полив осуществлялся водой, собираемой с наклоненной под углом около 5° поверхности (7×5 м) солнечных батарей (Хевел HVL-330/HJT — 21 шт.), подключенных к специальному преобразователю частоты для солнечных водяных насосов (Veichi SI23-D3-004G-A). Такой преобразователь позволяет получать переменный ток любой частоты непосредственно из постоянного для согласования текущей мощности компрессора теплового насоса (создан специально для данного проекта ООО Броск, тепловая мощность 7,8 кВт) и доступной от солнечных батарей энергии [27]. При недостаточной для работы теплового насоса освещенности энергия направлялась на питание фитоламп. Под солнечными батареями был смонтирован грунтовый теплообменник, заполненный антифризом Thermagent-60 (температура в рабочем цикле опускалась до -10°C), аналогичный тепличному, но без теплораспределительных пластин, — для отбо-



Рис. 7. Экспериментальная установка с отводом тепла из охлаждаемого грунта в теплицу в Архангельской области: а — грунтовые зонды холодного контура до отсыпки площадки, б — общий вид. Составлено авторами
 Fig. 7. Experimental setup with heat removal from cooled soil to a greenhouse in Arkhangelsk region: а — soil probes of cold loop before filling the site, б — general view. Compiled by the authors

ра тепла из приповерхностного слоя грунта и создания запирающего слоя [20]. Управление установкой осуществляется программируемым реле ПР-200 (Овен). За сезон в теплицу было отведено 2,9 Гкал. Урожай огурцов в экспериментальной теплице составил 43,225 кг, в контрольной 19,494 кг. Мы предполагаем, что в экспериментальной теплице можно значительно раньше высаживать рассаду.

Мы предлагаем рассмотреть использование тепла для овощеводства с целью генерации большего эффекта. При этом следует учитывать имеющийся опыт. Теплица, располагавшаяся более 30 лет назад на горячих ключах в 13 км от села Лорино, давала до 1 кг/м² овощей за сезон, при этом использовалось около 800 м² из возможных 1000 м². Стоит отметить, что для южных регионов современной нормой является 40 кг/м² за год, для подмосковных дач — 6 кг/м². При этом даже в южных регионах отопление теплиц — наиболее затратная статья расходов. Проблемами существования теплицы на горячих ключах являлись нехватка квалифицированного персонала для ее обслуживания и удаленность от села. Современный уровень автоматизации и интенсификации сельхозпроизводства позволяет значительно снизить требования к персоналу на местах и увеличить урожайность. В частности, выращивание на гидромембранах не требует завоза больших объемов плодородного грунта и удобрений и успешно применяется в экстремальных для растениеводства условиях [29]. Для нас важным параметром является стоимость овощей в Лорине, которая определяется авиадоставкой и практически независимо от характера продукции составляет около 12 долл./кг, при этом завозятся они всего несколько раз в год. Отходы морзверобойного и рыбного промыслов, песцовой зверофермы могут быть использованы для переработки в удобрения с помощью

личинок мух [30], что также улучшит санитарную обстановку в окрестностях села.

Как видно из табл. 1 (основные данные взяты из [28]), наиболее дешевым способом решения проблемы термостабилизации пород является применение теплоизоляции. Однако этот способ дает наименьший технический эффект. Самоокупаемость в обозримом будущем возможна в принципе только при утилизации тепловой энергии. Сроки окупаемости рефрижераторных контейнеров зависят от их загрузки, а капитальные затраты (без учета стоимости доставки) становятся сопоставимыми с использованием СОУ и тепловых насосов уже при 100 т хранящейся продукции. Сроки окупаемости возрастут при учете ставки дисконтирования. Стоимость доставки рефконтейнеров можно сократить при попутной доставке в них других товаров. При этом доступный для этого объем в случае питания от ВИЭ будет уменьшен необходимым оборудованием (примерно на 15%), еще около 10% объема займут материалы для постройки теплиц, это было учтено в расчетах капитальных затрат. Для расчета доходов от сельхозпродукции принята ее стоимость в размере 50% нынешней (при этом ее качество ожидается значительно выше).

Капитальные затраты на реализацию способа, использующего тепловой насос для охлаждения грунта, будут выше, чем для воздуха, однако разница не настолько очевидна велика в настоящий момент, поэтому оба случая сведены в один столбец в табл. 1. Для случая с охлаждением воздуха все приведенные показатели и кроме того срок окупаемости можно разделить на 2, так как расчетом теплового состояния грунта определено, что достаточно и половины холодильной мощности по сравнению с грунтовыми зондами. При делении на 4 уже создается зона риска около 5 м длиной вблизи выхода штольни на поверхность, однако она может быть уменьшена ор-

Таблица 1. Сравнение экономических показателей для различных способов хранения (при нулевой ставке дисконтирования)**Table 1. Comparison of economic indicators for different storage methods (at zero discount rate)**

Параметр	СОУ	Теплоизоляция	Тепловой насос ^{3*}	Рефконтейнер + ВИЭ (для 100 т)	Рефконтейнер (для 100 т)
Капитальные затраты, долл. (без логистики)	30 000	4 000	110 000 ^{1*} 100 000 ^{2*}	115 000 ^{1*} 105 000 ^{2*}	85 000 ^{1*} 75 000 ^{2*}
Объемный вес, т (доставка около 1 долл./кг)	3	7	9 ^{1*} 6,5 ^{2*}	38	38
Эксплуатационные затраты, долл./год	3 000	3 000	17 000 ^{1*} 10 000 ^{2*}	13 000 ^{1*} 10 000 ^{2*}	18 000 ^{1*} 15 000 ^{2*}
Возможный доход, долл./год	Нет	Нет	150 000 ^{1*} 50 000 ^{2*}	39 000 ^{1*} 13 000 ^{2*}	15 000 ^{1*} 5 000 ^{2*}
Срок окупаемости, лет (с учетом логистики)	Нет	Нет	1 ^{1*} 3 ^{2*}	5 ^{1* 4*} 35 ^{2* 4*}	Нет

^{1*} При утилизации тепла в теплицы.^{2*} То же в сети.^{3*} При полной мощности.^{4*} Без учета полных затрат на логистику.

ганизацией более интенсивного охлаждения (в расчете оно принималось равномерным).

При использовании теплоизоляции вдоль всей протяженности штолен (удорожание в 3 раза) температура грунтов вблизи шурфа станет ниже -2°C , однако на протяжении около 25 м от выхода штолен на поверхность она все равно будет оставаться опасно высокой. Таким образом, достигнутый технический эффект не будет оправдывать кратного увеличения стоимости, как и в случае с расположением СОУ вдоль всей протяженности штолен.

По данным Росрыболовства, на 2023 г. дефицит холодильных мощностей в портах Севера и Дальнего Востока России составляет 50 и 80 тыс. т соответственно [31]. На ликвидацию последнего планируется за 3—5 лет потратить около 8—10 млрд руб. в обмен на квоты на вылов краба. Предлагаемый нами подход позволил бы сэкономить львиную долю и капитальных, и эксплуатационных затрат.

Выводы

В случае села Лорино использование ледника для хранения продукции морзверобойного промысла остается экономически целесообразным. Наиболее дешевым способом термостабилизации грунтов вокруг ледника является применение теплоизоляции. Хотя оно значительно уменьшает мощность СТС, но дает недостаточный технический эффект. Более выгодным в долгосрочной перспективе становится сохранение мерзлотника с использованием тепловых насосов, питаемых от солнечных батарей, при охлаждении воздуха в самом мерзлотнике и утилизации отводимого тепла и излишков электроэнергии

в коммунальные сети. В связи с высокой себестоимостью энергии такая система начнет приносить доход уже через три года. При использовании же тепла для производства овощей, учитывая высокую стоимость их авиадоставки, окупаемость может наступить еще раньше, а также будет значительно улучшено качество жизни местных жителей.

Широко применяемые сейчас рефрижераторные контейнеры, обеспечивающие лучшие условия хранения и удобный доступ к содержимому, даже при питании от ВИЭ едва выходят на самоокупаемость, а также сильнее зависят от высококвалифицированного обслуживания, недоступного там в сжатые сроки (в случае технического отказа системы охлаждения температура в леднике заметно изменится через многие недели, а в контейнере — в течение дней).

В связи с этим мы предлагаем рассматривать более комплексное решение: не только сохранение мяса, но и возрождение местного производства овощей, которое может быть реализовано с использованием способа, описанного в [28]. В 40 км от Лорино находится связанный с ним автодорогой административный центр Чукотского района Чукотского автономного округа — село Лаврентия. Суммарно в этих двух населенных пунктах проживают около 2500 человек. Всего же продукция может доставляться вдоль побережья местным (в пределах 250 миль) транспортом примерно для 7000 человек. Наличие модернизированного ледника с температурой хранения -10°C значительно снижает зависимость поселений на Чукотском полуострове от внешних поставок энергоресурсов для сохранения

больших объемов продовольствия, что крайне важно для их устойчивости в различных чрезвычайных обстоятельствах. Приведение к нормам температуры хранения продуктов в леднике также позволит сократить затраты на содержание имеющихся сейчас рефконтейнеров, питаемых от сети.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Архангельской области (грант 22-19-20026, <https://rscf.ru/project/22-19-20026/>).

Благодарность

Использовано вычислительное оборудование УНУ «Пучок-М» и лицензия на программный комплекс Frost 3D, бесплатно предоставленная МГТУ им. Н. Э. Баумана его разработчиком — ООО НТЦ Симмэйкерс (благодарим Д. В. Евланова и Г. В. Грибовского за организационную помощь в проведении расчетов). Мы также признательны А. П. Гынону и Г. М. Зеленскому за предоставленные сведения об объекте исследования.

Литература/References

- George J. C., Wetzel D., O'Hara T. M. et al. An Analysis of Ancient Bowhead Whale Mandibles from Gambell Alaska: What can it Tell Us? International Whaling Commission Scientific Committee Documents. Santiago, Chile, International Whaling Commission, 2008.
- Yoshikawa K., Osipov D., Serikov S. et al. Traditional Ice Cellars (Lednik, Bulus) in Yakutia: Characteristics, Temperature Monitoring, and Distribution. Arctic 21 Century. Environmental Sciences, 2016, 1 (4), pp. 15—22.
- Maslakov A., Nyland K., Komova N. et al. Community Ice Cellars in Eastern Chukotka: Climatic and Anthropogenic Influences on Structural Stability. Geography, Environment, Sustainability, 2020, 13 (3), pp. 49—56. DOI: 10.24057/2071-9388-2020-71.
- Nyland K., Klene A., Brown J. et al. Traditional Inupiat Ice Cellars (SIĆJUAQ) in Barrow, Alaska: Characteristics, Temperature Monitoring, and Distribution. Geographical Rev., 2017, 107, pp. 143—158. DOI: 10.1111/j.1931-0846.2016.12204.x.
- Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, 2021.
- Huang J., Zhang X., Zhang Q. et al. Recently amplified arctic warming has contributed to a continual global warming trend. Nature Climate Change, 2017, 7, pp. 875—879. DOI: 10.1038/s41558-017-0009-5.
- Biskaborn B. K., Smith S. L., Noetzli J. et al. Permafrost is warming at a global scale. Nature Communications, 2019, 10, pp. 1—11. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
- Vasiliev A. A., Drozdov D. S., Gravis A. G. et al. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic. Environmental Research Letters, 2020, 15 (4), p. 045001. DOI: 10.1088/1748-9326/ab6f12.
- Farquharson L. M., Romanovsky V. E., Cable W. L. et al. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian High Arctic. Geophys. Research Letters, 2019, 46 (12), pp. 6681—6689. DOI: 10.1029/2019GL082187.
- Miner K. R., Turetsky M. R., Malina E. et al. Permafrost carbon emissions in a changing Arctic. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3, pp. 55—67. DOI: 10.1038/s43017-021-00230-3.
- Streletskiy D. A., Suter L. J., Shiklomanov N. I. et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. Environmental Research Letters, 2019, 14, p. 025003. DOI: 10.1088/1748-9326/AA5E6.
- Hjort J., Karjalainen O., Aalto J. et al. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century. Nature Communications, 2018, 9 (1), pp. 1—9. DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4.
- Melnikov V. P., Osipov V. I., Brouchkov A. V. et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. Natural Hazards, 2022, p. 1—21. DOI: 10.1007/s11069-021-05179-6.
- Badina S., Pankratov A. Assessment of the Impacts of Climate Change on the Russian Arctic Economy (including the Energy Industry). Energies, 2022, 15 (8), p. 2849. DOI: 10.3390/en15082849.
- Weingartner K. A., Antonov E. V., Maslakov A. A. Assessing Energy Security in Nome and Lavrentiya. Urban Sustainability in the Arctic: Measuring Progress in Circumpolar Cities. Providence, USA, Berghahn Books, 2020, pp. 165—195. DOI: 10.2307/j.ctv1tbhq16.
- Maslakov A., Sotnikova K., Gribovskii G., Evlanov D. Thermal Simulation of Ice Cellars as a Basis for Food Security and Energy Sustainability of Isolated Indigenous Communities in the Arctic. Energies, 2022, 15, p. 972. DOI: 10.3390/en15030972.
- Wang G.-F., Lin C., Zhu L. et al. Performance analyses of two-phase closed thermosyphons for road embankments in the high-latitude permafrost regions. J. of Mountain Science, 2023, 20, pp. 3138—3153. DOI: 10.1007/s11629-023-8215-2.
- Zhi W., Yu S., Wei M., Wu J. Analysis on effect of permafrost protection by two-phase closed thermosyphon and insulation jointly in permafrost regions. Cold Regions Science and Technology, 2005, 43 (3), pp. 150—163. DOI: 10.1016/j.coldregions.2005.04.001.
- Gagnon S., Fortier D., Sliger M., Rioux K. Air-convection-reflective sheds: A mitigation technique that stopped degradation and promoted permafrost recovery under the Alaska Highway, south-western Yukon, Canada. Cold Regions Science and Technology, 2022, 197, p. 103524. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103524.
- Loktionov E., Sharaborova E., Shepitko T. A sustainable concept for permafrost thermal stabilization. Sus-

- tainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52, p. 102003. DOI: 10.1016/j.seta.2022.102003.
21. Локтионов Е. Ю., Шараборова Е. С., Клоков А. В. и др. О возможности продления сроков эксплуатации автозимников с использованием возобновляемых источников энергии // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 4. — С. 570—578. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-570-578.
22. Loktionov E. Yu., Sharaborova E. S., Klovov A. V., Bakmadov A. V., Korshunov A. A. On the possibility of extending the service life of winter roads using renewable energy sources. Arctic: Ecology and Economy, 2023, vol. 13, no. 4, pp. 570—578. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-4-570-578. (In Russian).
23. Peterson R., Wendler K. Preservation of traditional ice cellars. A modeling study of zero-energy solutions for enhancing thermal resilience. Fairbanks, Univ. of Alaska, 2011. Available at: <https://acep.uaf.edu/media/260236/IceCellarsModelingFinalReport.pdf>.
24. Seroka-Stolka O., Ociepa-Kubicka A. Green logistics and circular economy. Transportation Research Procedia, 2019, 39, pp. 471—479. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.06.049.
25. Asanov I., Loktionov E. Possible benefits from PV modules integration in railroad linear structures. Renewable Energy Focus, 2018, 25, pp. 1—3. DOI: 10.1016/j.ref.2018.02.003.
26. Naumenko S., Nabatchikova T., Gusev G., Polivoda F. Impact of External Conditions on Selecting Special Transport Vehicle for Perishable Cargo Transportation. Transportation Research Procedia, 2021, 54, pp. 445—454. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.02.094.
27. Klovov A. V., Tutunin A. S., Sharaborova E. S., Korshunov A. A., Loktionov E. Y. Inverter Heat Pumps as a Variable Load for Off-Grid Solar-Powered Systems. Energies, 2023, 16, p. 5987. DOI: 10.3390/en16165987.
28. Klovov A. V., Loktionov E. Y., Loktionov Y. V., Panchenko V. A., Sharaborova E. S. A Mini-Review of Current Activities and Future Trends in Agrioltaics. Energies, 2023, 16, p. 3009. DOI: 10.3390/en16073009.
29. Sharaborova E., Shepitko T., Loktionov E. Experimental Proof of a Solar-Powered Heat Pump System for Soil Thermal Stabilization. Energies, 2022, 15, p. 2118. DOI: 10.3390/en15062118.
30. Mori Y. New agro-technology (Imec) by hydrogel membrane. Reactive and Functional Polymers, 2013, 73, pp. 936—938. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2012.11.015.
31. Lopes I., Yong J., Lalander C. Frass derived from black soldier fly larvae treatment of biodegradable wastes. A critical review and future perspectives. Waste Management, 2022, 142, pp. 65—76. DOI: 10.1016/j.wasman.2022.02.007.
32. Дефицит холодильных мощностей в портах России составляет порядка 130 тыс. тонн. — URL: <https://portnews.ru/news/354180/>.
33. The shortage of refrigeration capacities in Russian ports is about 130 thousand tons. Available at: <https://portnews.ru/news/354180/>. (In Russian).

Информация об авторах

Локтионов Егор Юрьевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), e-mail: eloktionov@mail.ru.

Шараборова Елизавета Сергеевна, аспирант, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Швейцария, Lausanne, Rte Cantonale), e-mail: elizaveta.sharaborova@epfl.ch.

Клоков Александр Валерьевич, магистрант, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1), e-mail: klovov2000@inbox.ru.

Маслаков Алексей Алексеевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, м-к Ленинские горы, 1-52), e-mail: alexey.maslakov@geogr.msu.ru.

Сотникова Ксения Сергеевна, студент, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, м-к Ленинские горы, 1-52), e-mail: ks.sotnikova@geogr.msu.ru.

Коршунов Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой, Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова (163002, Россия, Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17), e-mail: a.korshunov@narfu.ru.

ICE CELLARS PRESERVATION TECHNOLOGIES TO ENSURE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF NORTHERN SETTLEMENTS

Loktionov, E. Yu.¹, Sharaborova, E. S.², Klovov, A. V.¹, Maskakov, A. A.³, Sotnikova, K. S.³, Korshunov, A. A.⁴

¹ Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)

² École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Lausanne, Switzerland)

³ Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

⁴ Northern (Arctic) Federal University (Arkhangelsk, Russian Federation)

The article was received on October 30, 2023

For citing

Loktionov E. Yu., Sharaborova E. S., Klovov A. V., Maslakov A. A., Sotnikova K. S., Korshunov A. A. Ice cellars preservation technologies to ensure sustainable development of northern settlements. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 116—126. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-116-126. (In Russian).

Abstract

Ice cellars are a traditional way of long-term storage of meat and fish near the places of their commercial production in the Arctic during warm season. Due to the degradation of permafrost, these structures are in a state of disrepair everywhere. Using the example of the Chukchi national village of Lorino, where traditional hunting of sea animals is preserved, we have considered options for solving the problem of preserving the caught meat. Economic assessments show that the use of a permafrost storage facility is reasonable for storing more than 100 tons of products; for smaller volumes, it makes sense to switch to refrigeration containers powered by renewable energy sources. Selling excess energy and heat from a chiller can generate significant revenue. Especially if this energy is used to create the maximum benefit under the given conditions, e.g. in vegetable growing.

Keywords: *permafrost soils, refrigeration technology, soil thermal stabilization, renewable energy sources, photovoltaic modules, solar panels, heat pumps, energy recovery, agro-technologies, trigeneration.*

Funding

The work was supported financially by the Russian Science Foundation and the Arkhangelsk Region (grant 22-19-20026, <https://rscf.ru/project/22-19-20026/>).

Acknowledgements

We used the computing equipment “Beam-M” and the license for the Frost 3D software package, provided free of charge by its developer NTCs Simmakers LLC to Bauman Moscow State Technical University. And we are grateful to D. V. Evlanov and G. V. Gribovsky for organizational assistance in the calculations. The authors also thank A. P. Gynon and G. M. Zelensky for providing information about the object of study.

Information about the authors

Loktionov, Egor Yurievich, PhD of Engineering, Lab head, Bauman Moscow State Technical University (5-1, 2nd Baumanskaya str., Moscow, Russia, 105005), e-mail: eloktionov@mail.ru.

Sharaborova, Elizaveta Sergeevna, Postgraduate Student, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Switzerland, Lausanne), e-mail: elizaveta.sharaborova@epfl.ch.

Klovov, Alexander Valerievich, Graduate Student, Bauman Moscow State Technical University (5-1, 2nd Baumanskaya str., Moscow, Russia, 105005), e-mail: kav181174@student.bmstu.ru.

Maslakov, Alexey Alexeyevich, PhD of Geography, Senior Researcher, Lomonosov Moscow State University (1-52, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: alexey.maslakov@geogr.msu.ru.

Sotnikova, Ksenia Sergeevna, Student, Lomonosov Moscow State University (1-52, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: ks.sotnikova@geogr.msu.ru.

Korshunov, Alexey Anatolievich, PhD of Engineering, Head of Department, Northern (Arctic) Federal University (17, Nab. Severnoy Dvini, Arkhangelsk, Russia, 163002), e-mail: a.korshunov@narfu.ru.

© Loktionov E. Yu., Sharaborova E. S., Klovov A. V., Maslakov A. A., Sotnikova K. S., Korshunov A. A., 2024