

УДК 551.345: [621.565.532:639 2] (571.121)

НОВОПОРТОВСКИЙ МЕРЗЛОТНИК — УНИКАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ЯМАЛА: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НА ФОНЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

© 2024 г. Л. П. Кузякин^{а, *}, С. А. Огородов^{а, **}, А. А. Маслаков^{а, ***},
Г. А. Кажукало^{а, ****}, Д. М. Богатова^{а, *****}

^аМосковский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия

*E-mail: kuziakin@geogr.msu.ru

**E-mail: ogorodov@geogr.msu.ru

***E-mail: alexey.maslakov@geogr.msu.ru

****E-mail: kazhukalo@geogr.msu.ru

*****E-mail: aleksyutina@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 17.05.2024 г.

После доработки 30.08.2024 г.

Принята к публикации 03.12.2024 г.

Новопортовский мерзлотник — крупнейшее хранилище в вечной мерзлоте на Ямале. В связи с климатическими изменениями и усиливающимся антропогенным воздействием вблизи мерзлотника активизируются деструктивные экзогенные процессы. За последние десятилетия в связи с увеличением глубины протаивания произошло обрушение двух из трех входов в мерзлотник, наблюдаются просадки и деформации кровли тоннелей. Углубление бухты Новый порт и ликвидация старых причалов и молов привели к усилению волнового воздействия на береговой уступ вблизи мерзлотника и к активизации термоабразии и термоденудации. Во время нагонов высота волн практически достигает входа в мерзлотник, из-за чего он может быть затоплен и разрушен. В связи с этим, для сохранения уникального объекта культурного наследия ЯНАО необходимо организовать мониторинг за природными процессами вблизи мерзлотника, а также разработать ряд мер для нивелирования воздействия негативных экзогенных процессов.

Ключевые слова: Обская губа, Новопортовский мерзлотник, техногенез в береговой зоне, геокриологический мониторинг, термоабразия, береговые процессы

DOI: 10.31857/S0869607124040078, **EDN:** MODUJO

ВВЕДЕНИЕ

Лёдник (“ice cellar”) — это форма хранения пищевых продуктов, при которой туннели и/или камеры выкапываются в вечной мерзлоте, которая используется в качестве пассивного охлаждения [17, 18, 27]. В некоторых случаях подобные объекты называют “мерзлотниками” [4,5]. Такие хранилища широко распространены в арктических районах Евразии и Северной Америки [20,26]. Достоверно известно, что лёдники использовались в качестве местной технологии хранения пищи как минимум тысячу лет назад в районе Берингова моря, что подтверждают радиоугле-

родные датировки китового мяса из заброшенного погреба в пос. Гамбелл, Аляска, США [14]. Традиционные погреба в мерзлоте, подобные обнаруженному в Гамбелле, варьируются по размеру от небольших камер (около 1 м³) до семейных погребов (около 10 м³). Они до сих пор распространены в Якутии [26] и на севере Аляски [20]. Реже встречаются общественные лёдники с несколькими камерами. Например, общественный погреб пос. в Туктояктук, Канада, построенный в конце 1960-х годов на государственное финансирование, состоит из трех коридоров с 19 боковыми комнатами (около 9 м³ каждая) [13]. Лёдники на востоке Чукотки, построенные в 1950—1960-е годы, достигают еще больших размеров: наиболее крупный в пос. Лорино имеет длину коридора 114 м и 14 камер с полезной площадью 330 м². Такие хранилища предназначены как для размещения продукции местных промысловых охотничьих хозяйств, так и в качестве кормовых складов для песцовых звероферм [17].

Лёдники на Ямале появились в связи с потребностями народного хозяйства в середине прошлого века [7]. Крупнейший из них (“Новопортовский мерзлотник”) был построен в поселке Новый Порт. Строительство шло под руководством Густава Юльевича Бекмана. Работы велись преимущественно силами спецпереселенцев и ссыльных. Долгие пять лет (с 1952 по 1956 г/в) в мерзлых породах топором и кайлом вырубались тоннели и штольни. Новопортовский мерзлотник (рис. 1) является уникальным объектом на Ямале, а также крупнейшим в мире лёдником, который был создан с использованием только ручного труда. Основная функция сооружения — обслуживание рыбного завода Нового Порта, в частности — хранение рыбных ресурсов в зимний и летний период. Несмотря на то что большинство “колхозных” лёдников к настоящему времени прекратили свое существование, Новопортовский мерзлотник продолжает нести свою службу. Однако значительное сокращение вылова рыбы в Обской губе в последние годы может привести к закрытию Новопортовского рыбзавода, и судьба мерзлотника может пойти по непредсказуемому пути. Тем не менее в 2012 году распоряжением правительства ЯНАО № 361-РП “Новопортовский мерзлотник” был включен в реестр объектов культурного наследия народов Российской Федерации.

Суммарная длина штолен составляет 1177 м, а объем мерзлотника — 19537 м³. Поселок долгое время являлся важнейшим центром рыбного промысла в Обской губе, а в настоящее время основной отраслью специализации поселка является нефтегазодобыча. В 1964 г. геологоразведочными экспедициями было открыто Новопортовское нефтегазоконденсатное месторождение [7]. Несмотря на весьма высокие выявленные запасы газа, решение о разработке месторождения было принято лишь в 2009 г., а полноценная эксплуатация началась лишь в 2014 г. Современное изменение климата [11] и социально-экономические проблемы угрожают устойчивости подземных сооружений в криолитозоне. Потепление климата оказывает влияние на состояние и интерьер мерзлотника. В тыловой части мерзлотника, расположенной непосредственно под поселком, из-за повышения температуры грунтов, увеличения глубины сезонного протаивания и снижения их несущей способности происходит просадка верхних и боковых сводов. Профиль штольни из аркообразного преобразовался в П-образный, что угрожает обрушением. Еще большую угрозу несет активизация береговых криогенных процессов со стороны Обской губы, ускорившихся в последние два десятилетия на фоне потепления и снижения ледовитости акватории. Сложенный льдистыми дисперсными грунтами береговой уступ, в котором, собственно, и заложены выходы из штолен, активно разрушается под

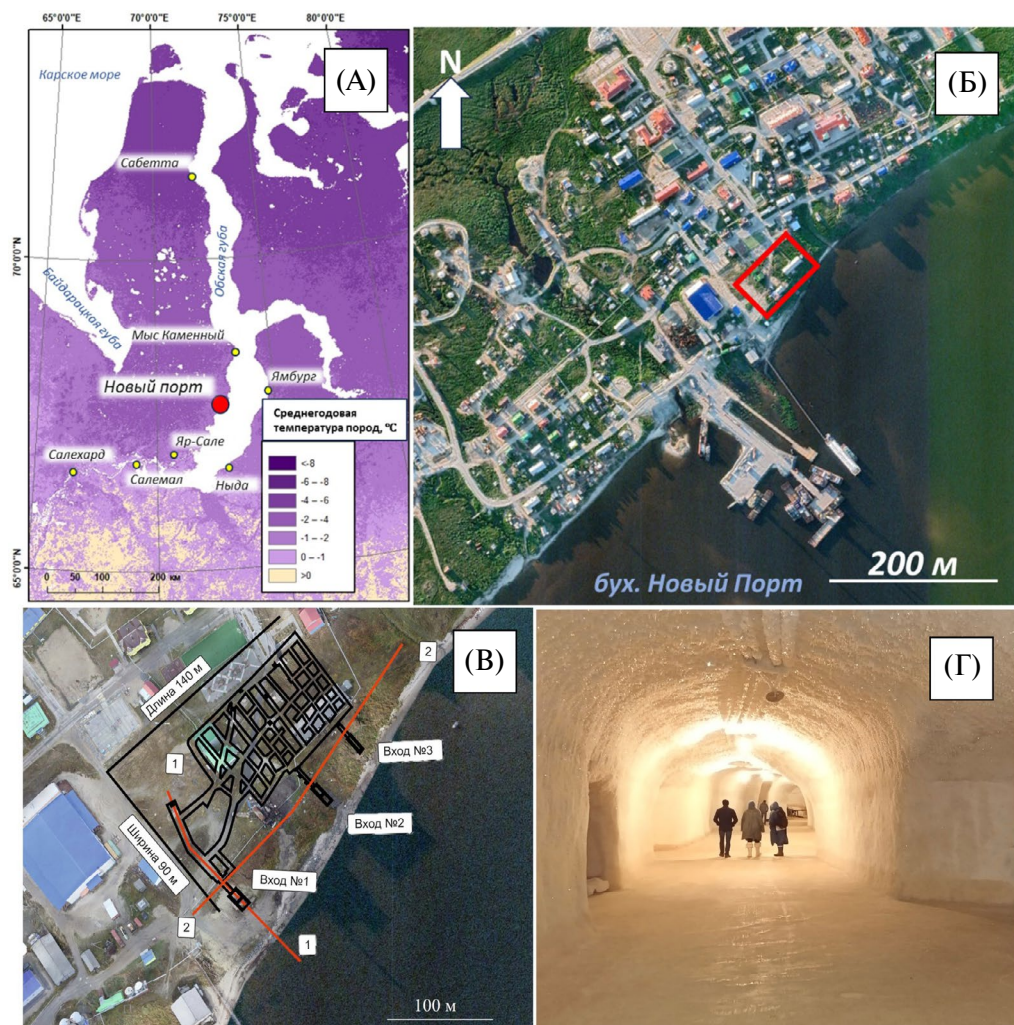


Рис. 1. А — Расположение поселка Новый порт на полуострове Ямал (с использованием материалов [21]). Б — Расположение мерзлотника в поселке Новый Порт. В — Положение и принципиальная схема тоннелей Новопортовского мерзлотника. Суммарная длина тоннелей — 1177 м. Вход № 2 и вход № 3 ликвидированы в связи с угрозой обрушения кровли. Красными линиями обозначены профили: 1–1 — поперечный, 2–2 — фронтальный. В подложке использован снимок, полученный авторами с использованием беспилотного летательного аппарата. Г — интерьер центральной галереи мерзлотника, высота потолка около 5 м. Высота потолка в боковом проходе — 1.5 м.

Fig. 1. “A” — Location of the village of New Port on the Yamal Peninsula (using materials from [21]). “Б” — location of ice cellar in the village of Novy Port. “В” — Position and schematic diagram of the tunnels of the Novy Port ice cellar. The total length of the tunnels is 1177 m. Entrance No. 2 and Entrance No. 3 were eliminated due to the threat of roof collapse. Red lines indicate profiles: 1–1 — transverse, 2–2 — frontal. The backing uses a photograph taken by the authors using an unmanned aerial vehicle. “Г” — interior of the central gallery of the ice cellar, ceiling height is about 5 m. Ceiling height in the side passage is 1.5 m.

действием термоденудации, термоабразии и блокового отседания. В результате из-за обрушения берега два из трех входов в мерзлотник в настоящее время не эксплуатируются. Во время штормовых нагонов уровень воды находится практически вровень с оставшимся входом, отчего существует реальная угроза затопления мерзлотника. После ликвидации мола и пирсов при реставрации порта вблизи мерзлотника размыв берега усилился. Предпринимавшиеся без научного обоснования попытки проведения берегозащитных мероприятий не дали должного эффекта. В частности, широкомасштабное строительство и эксплуатация объектов нефтегазовой отрасли в Обской губе за последние десятилетия привели к увеличению техногенной нагрузки. Строительство причальных сооружений и иных объектов инфраструктуры привело к неблагоприятным последствиям в береговой зоне в створе поселка Новый Порт. Вкупе с повышением среднегодовой температуры грунтов, увеличением сезонно-талого слоя и снижением ледовитости арктических акваторий [8, 19, 24] безаварийная эксплуатация Новопортовского мерзлотника без надлежащего мониторинга криогенных и береговых процессов представляется невозможной. Проблемы мерзлотника, связанные с природными процессами, усугубляются экономическим спадом в рыбной промышленности: в связи с активизацией морских перевозок и проведением дноуглубительных работ, в Обской губе значительно сократились популяции ценных видов рыб. Сокращение уловов приводит к снижению рентабельности как самого завода, так и Новопортовского мерзлотника. И к настоящему времени хранимые объемы рыбы составляют около 10% от вместимости мерзлотника.

Из вышесказанного следует актуальная научная проблема необходимости разработки научно обоснованных рекомендаций для сохранения Новопортовского мерзлотника, как уникального объекта культурного наследия и криосферы Земли. Проводившиеся до настоящего момента реконструкции мерзлотника в большей степени носили косметический характер и имели цель минимизировать последствия воздействия климатически обусловленных изменений и антропогенного вмешательства. Новизна нашей задачи заключается в том, чтобы на основе результатов мониторинга криогенного состояния мерзлотника, натурных наблюдений за опасными криогенными процессами и геокриологического прогноза, учитывающего тенденции климатических изменений, впервые дать научно обоснованные рекомендации для мероприятий по стабилизации состояния мерзлотника и берегового уступа, тем самым обеспечить условия, чтобы сохранить этот уникальный комплекс сооружений для будущих поколений.

Таким образом, становится очевидна необходимость изучения Новопортовского мерзлотника с целью определения и прогнозирования основных деструктивных процессов, угрожающих существованию объекта культурного наследия регионального значения. Цель данной статьи — изложить общие характеристики современного состояния мерзлотника и определить направления дальнейших исследований.

Регион исследования

Новый Порт (67°4' 32" с.ш. 72°53' 58" в.д.) расположен в юго-западной части Обской губы Карского моря, в пределах юго-восточной части Ямала (см. рис. 1А) и в 300 км к северо-востоку от столицы субъекта — Салехарда, в зоне субарктического континентального климата, в природных условиях южной тундры [2]. Рельеф побережья низменный, слаборасчлененный, амплитуда высот в пределах обследуемого участка не превышает 15–20 м.

Четвертичные отложения представлены чередующимися аллювиально-морскими песками, супесями и суглинками каргинского возраста (МИС 3). Низменные дельтовые и лайдовые поверхности сложены голоценовыми песками, супесями и торфами. Территория характеризуется сплошным распространением многолетнемерзлых пород мощностью около 100 м. Среднегодовая температура грунтов варьирует от -3 до -7°C . Грунты пластичномерзлые льдистые и твердомерзлые малольдистые, отличаются слабой степенью засоления. Преобладающие криотекстуры в суглинках и глинах: слоистые и сетчатые. На торфяниках распространены голоценовые полигонально-жильные льды, пластовые льды не характерны, кроме инъекционных ядер бугров пучения [12]. Льдистость грунтов обуславливает развитие криогенных процессов: солифлюкция, термоденудация, термоэрозия, формирование криогенных оползней скольжения на береговых уступах.

Гидродинамика Обской губы характеризуется сильной как межгодовой, так и внутрисезонной изменчивостью [3]. Это обусловлено специфичным взаимодействием различных факторов в эстуарии: величиной речного стока, приливно-отливными явлениями, а также сгонно-нагонными явлениями, амплитуда которых в несколько раз превышает приливную [3]. По немногочисленным литературным данным [9], величина приливов по геоморфологическим наблюдениям не превышает 0.5 м, а по данным, взятым из таблиц приливов, медианные приливно-отливные колебания составляют 0.1–0.2 м [25]. Суммарная же суточная величина приливно-отливных и сгонно-нагонных колебаний, по инструментальным измерениям, за последние 10 лет достигала 1.25 м. Несмотря на малую величину безледного периода (в среднем 3.5 месяца) и отmelость подводного берегового склона Восточного Ямала [1], рекордная амплитуда штормовых нагонов может приводить к существенному абразионному воздействию, сопоставимому с открытыми участками акватории Карского моря. За счет этого даже низменные аккумулятивные берега могут быть подвержены размыву [10].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В 2023 г. сотрудниками НИЛ геоэкологии Севера в рамках экспедиции в поселок Новый Порт было проведено рекогносцировочное обследование состояния Новопортовского мерзлотника. Маршрутные наблюдения включали в себя геоморфологическую съемку, сопровождаемую аэровизуальным обследованием с помощью беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 Pro (БПЛА), а также мерзлотные исследования.

Мерзлотные исследования включали в себя измерение мощности слоя сезонного оттаивания над мерзлотником и в его окрестностях, на береговом уступе и на пляже. Измерение сезонно-талого слоя проводилось в конце периода оттаивания (14 октября) с использованием мерзлотного шупа. В самом мерзлотнике был установлен логгер, фиксировавший изменения температуры воздуха в течение трех суток (в конце сентября).

В ходе геоморфологической съемки получены сведения о морфологических особенностях основных элементов рельефа (высота и крутизна пляжа, уступа, характер поперечного профиля и пр.), литологическая характеристика отложений пляжа, лайды или уступа, а также наличие осложняющих форм рельефа, на основании чего определялся морфогенетический тип берега и спектр преобладающих экзогенных процессов. Помимо морфологических характеристик, фиксировался уровень при-

лива (полводы, большая вода, малая вода), наличие поверхностей или объектов, маркирующих линию заплеска, что позволяло корректно интерпретировать морфологию надводной части береговой зоны с учетом прилива или нагона. Кроме того, оценивался характер техногенной трансформации рельефа береговой зоны, наличие берегозащитных сооружений и/или бытового и промышленного мусора. Описания сопровождалось геолого-геоморфологическим профилированием.

Кроме того, благодаря содействию директора муниципального предприятия “Новопортовский рыбзавод” Сергея Степановича Юсько, были получены архивные сведения о конструктивных особенностях мерзлотника. Непосредственно информация о геологическом и криолитологическом строении второй лагунно-морской террасы, в отложениях которой обустроен мерзлотник, была взята из отчета по инженерно-геологическим изысканиям, проведенным ООО “ТАИС-С” в 2009 г¹.

По полученным архивным фотоматериалам удалось сопоставить состояние берегового уступа и пляжа в 2016 и 2023 гг².

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общая площадь Новопортовского мерзлотника — около 1 га. Структурно мерзлотник состоит из трех главных галерей протяженностью 100–140 м, вытянутых с юго-востока на северо-запад (параллельно береговой линии). Главные галереи соединены несколькими перпендикулярными тоннелями (см. рис. 1Б). Суммарная длина тоннелей составляет 1177 м. Площадь непосредственно подземной части мерзлотника равна 7602.1 м², причем полезная площадь составляет всего 4134 м². Объем мерзлотника — 19537 м³, в то время как полезный объем составляет 10624 м³. Высота главных галерей — около 4 м, второстепенных тоннелей — около 1.5 м. Кровля главных галерей расположена на глубине 10 м, второстепенных галерей — до 13 м. Мерзлотник имеет 6 вентиляционных шахт, которые открываются в зимнее время для активизации циркуляции воздуха и выхолаживания.

По результатам бурения³ разрез верхних 16 м выглядит достаточно однородным (рис. 2А). С поверхности до глубины 2 м (при условии отсутствия техногенной подсыпки) залегают верхнеплейстоцен-голоценовые коричнево-серые суглинки. Ниже сезонно-талого слоя суглинки пластичномерзлые со слоистой криогенной текстурой (ширы мощностью 0.1–0.4 см через 0.2–2.5 см). Редко внутри суглинков встречаются линзы и прослои пылеватого песка, мощностью до 0.3 м. Суглинки подстилаются темно-серыми твердо- и пластичномерзлыми верхнеплейстоценовыми глинами с сетчатой криотекстурой (толщина шпиров 0.1–0.6 см). Склоны покрыты чехлом серо-коричневых суглинков, ожелезненных. Лучшая дренированность, а также наличие склоновых процессов (солифлюкция, оплывание, крип) позволяет выделить чехол склоновых отложений в отдельную фацию относительно верхней толщи суглинков, залегающих на плоских поверхностях. Грунты слабозасоленные с морским типом засоления (0.062–0.393%) и с незначительным содержанием органики

¹ Герасимов С. В. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на объекте “Многokвартирный жилой дом по ул. Школьная, 36 в пос. Новый Порт, Ямальского района ЯНАО. ООО “ТАИС-С”, 2009.

² Икизли И. Г., Юсько С. С., Силантьев В. А., Аверин А. Я. Технический отчет о состоянии объекта культурного наследия (памятника истории и культуры) Российской Федерации. Тюмень, 2016.

³ Герасимов С. В. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на объекте “Многokвартирный жилой дом по ул. Школьная, 36 в пос. Новый Порт, Ямальского района ЯНАО. ООО “ТАИС-С”, 2009.

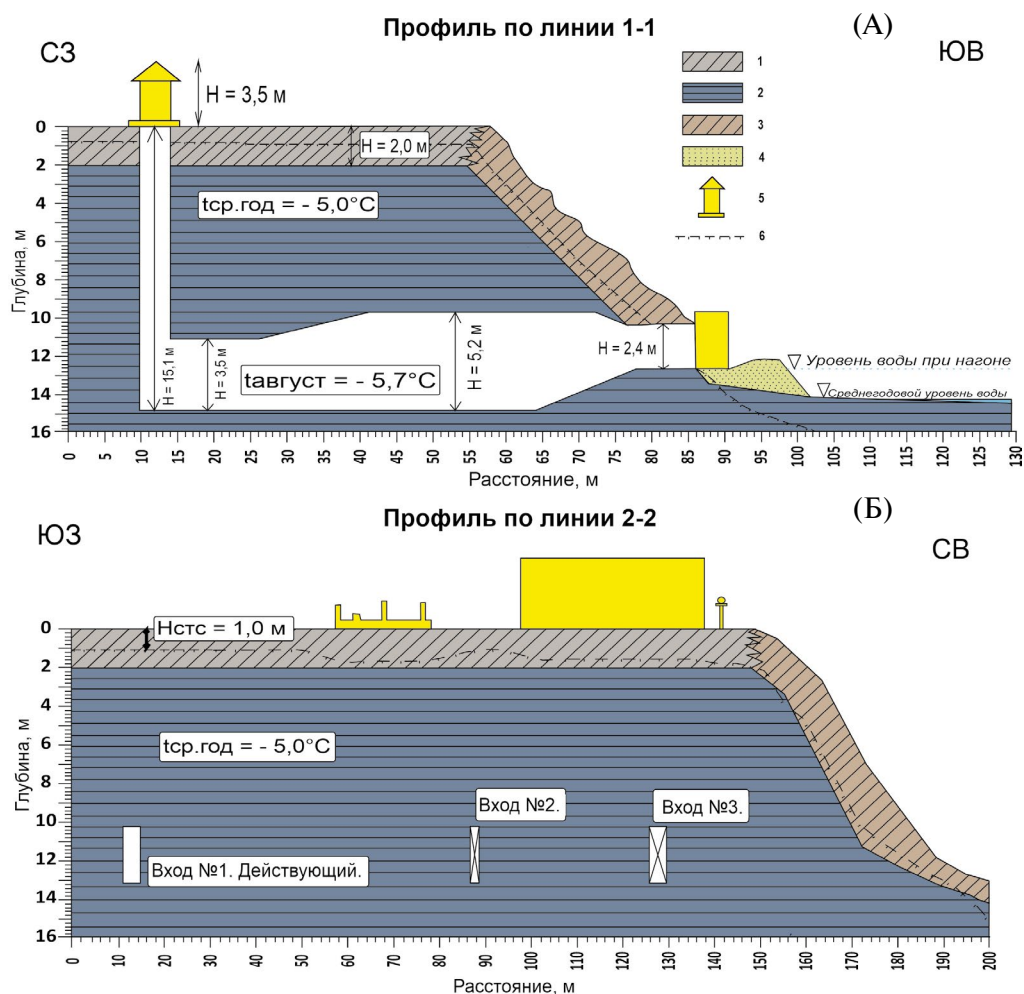


Рис. 2. А — Поперечный профиль (линия 1–1, см. рис. 1) через главную штольню Новопортовского мерзлотника. Вход № 1 оборудован транспортером для рыбы. Б — Продольный (параллельно берегу) профиль (линия 2–2, см. рис. 1). Склон в северо-восточной части профиля относится к долине ручья, протекающего через поселок. Условные обозначения: 1 — суглинок, 2 — глина, 3 — суглинок, переработанный склоновыми процессами, 4 — песок, 5 — инженерные сооружения и постройки, 6 — подошва сезонноталого слоя.

Fig. 2. “А” — Transverse profile (line 1–1, see Fig. 1) through the main adit of the Novy Port ice cellar. Entrance No. 1 is equipped with a fish conveyor. “Б” — Longitudinal (parallel to the shore) profile (line 2–2, see Fig. 1). The slope in the north-eastern part of the profile belongs to the valley of the stream flowing through the village. Legend: 1 — loam, 2 — clay, 3 — loam processed by slope processes, 4 — sand, 5 — engineering structures and buildings, 6 — base of the seasonally thawed layer.

(2.3–2.9%). Разрезы отложений, в которых обустроен мерзлотник, представлены на рис. 2А и 2Б. По данным термометрии⁴, среднегодовые колебания температуры затухают на глубине 16 м при температуре грунта –5°C. Соответственно, почти весь мерзлотник расположен в зоне годовых колебаний температуры грунта.

По результатам промеров глубины сезонного протаивания в сентябре 2023 г. мощность сезонно-талого слоя составила в среднем 1.07 м (результат 30 измерений). Минимальное значение 0.8 м было отмечено вблизи вентиляционной шахты № 4, максимальное значение (1.54 м) — вблизи трубопровода у северо-восточной границы мерзлотника (см. рис. 2Б). Протаивание на склоне (по нормали) составило 1.06 м (по результатам 10 измерений). На пляже (бенче) глубина протаивания более 2 м (кровля мерзлоты не зафиксирована). При этом в естественных условиях в тот же период (площадка CALM) средняя глубина протаивания составила 0.7 м.

Изначально мерзлотник был оборудован тремя входами со стороны бухты Новый порт, однако в последнее десятилетие входы № 2 и № 3 пришли в аварийное состояние и к 2016 г. были ликвидированы: проведено искусственное обрушение кровли и блокировка выхода (рис. 3Г). Действующий вход № 1 оборудован транспортером для подачи продукции в мерзлотник и из него. Для предотвращения затопления мерзлотника в период штормов и нагонов перед входом № 1 оборудована антропогенная песчаная насыпь, укрепленная строительным мусором (арматуры, мешки с цементом, бетонные, деревянные и железные обломки сооружений).

Интерьер мерзлотника состоит из деревянных стен и перекрытий, которые покрыты слоем изморози мощностью до 5–7 см (сентябрь 2023 г.), которая периодически счищается. В помещении входов полы деревянные, дощатые, отделки не имеют. Полы штолен покрыты льдом. Термометрические измерения внутри мерзлотника на протяжении трех суток показали практическое отсутствие суточных колебаний температуры (менее 0.02°C), причем у пола температура составила –5.97°C, а на высоте 1.7 м –5.7°C. По устному сообщению директора Новопортовского рыбзавода С. С. Юсько, в зимний период внутри мерзлотника поддерживается температура не выше –20°C. Терморегуляция проводится путем закрытия или открытия вентиляционных шахт.

Над мерзлотником расположены заброшенное одноэтажное здание заводоуправления, а также несколько разрушенных хозяйственных построек. Автомобильное движение над тоннелями запрещено, однако по территории сооружения проходит ряд пешеходных необорудованных тропинок.

Входы мерзлотника расположены в береговой зоне, на поверхности уступа размыва. Ущерб уникальному сооружению наиболее интенсивно проявляется в пределах входов в результате комплексного воздействия береговых, склоновых и посткриогенных процессов. При относительно однородном гидродинамическом воздействии как в пределах мерзлотника, так и поселка в целом, морфология берегов и характер разрушения берега определяется преимущественно литологической мозаичностью строения уступа размыва. Так, к западу от причальных сооружений (вне территории мерзлотника) наблюдаются преимущественно термоабразионные берега с узким (4–7 м) пляжем и крутым (до 30–35°) уступом, выработанным в песчаных отложениях.

⁴ Герасимов С. В. Отчет об инженерно-геологических изысканиях на объекте “Многokвартирный жилой дом по ул. Школьная, 36 в пос. Новый Порт, Ямальского района ЯНАО. ООО “ТАИС-С”, 2009.

Непосредственно же в створе мерзлотника уступ относительно пологий (местами до 12–15°), осложнен многочисленными циркообразными стенками срыва и оползневыми микротеррасами. Уступ переходит в маломощный прислоненный пляж (шириной не более 3–4 м), который по мере движения от входа № 1 ко входу № 3 полностью выклинивается и замещается бенчем из суглинистого материала. Берег в створе поселка, таким образом, имеет преимущественно термоденудационную морфологию. Это обусловлено почти повсеместным распространением глинистых грунтов у подножья уступа. Ввиду климатических изменений большее оттаивание слабозасоленных грунтов способствует развитию оползневых процессов и ведет к потере устойчивости склона, что усугубляется еще и термоабразией.

О значительной интенсивности береговых процессов в последние 10 лет можно судить по сопоставлению полученных наблюдений и архивных фотоматериалов 2016 года (рис. 3А, 3Б).

В качестве берегоукрепления на ряде участков у бровки склона построены подпорные стенки с термостабилизаторами, а в тыловой части пляжа — хаотичная берегозащита из труб, металлоконструкций, набросок мешков с бетоном или глиной. Далее на северо-восток, вне зоны активной застройки, термоабразионные и термо-



Рис. 3. А — Состояние берега вблизи мерзлотника в 2016 г., вид с северо-востока. Наблюдаются осушка и участки лайды. Б — Состояние берега вблизи мерзлотника в 2023 г., вид с северо-востока. Лайда размывта и замещена маломощным пляжем. В — Вход № 3 в 2016 г. Не используется в связи с угрозой обрушения и переоборудован в вентшахту. Г — Вход № 3 в 2023 г. Ликвидирован.

Fig. 3. “А” — Condition of the coast near the ice cellar in 2016, view from the northeast. The mudflat and laida surfaces are observed. “Б” — State of the coast near the ice cellar in 2023, view from the northeast. Laida is eroded and replaced by thin beach. “В” — Entrance No. 3 in 2016. Not used due to the threat of collapse and converted into a ventilation shaft. “Г” — Entrance No. 3 in 2023. Liquidated.

денудационные берега замещаются лайдой шириной от 50–70 м до первых километров.

На значительной части береговой линии вдоль мерзлотника берег был представлен относительно широким песчаным пляжем или низкой аккумулятивной терра-сой (лайдой), проективное покрытие растительности на которой достигало 100%. В настоящее же время лайдовых поверхностей к востоку от причала не наблюдается вовсе, а входы № 2 и № 3 разрушены (рис. 3В, 3Г).

ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования хранилищ в зоне мерзлоты в Якутии, на Чукотке и Аляске показали, что основным фактором, влияющим на их устойчивость и сохранность, является социально-экономическая ситуация в поселениях [15, 20, 26]. Т.е. разрушение лёдника (затопление или обвал кровли) происходит при прекращении действий по поддержанию объекта в рабочем состоянии: при отсутствии зимнего проветривания, очищении стен от наростшего льда и уборки испортившейся продукции (лёдник в селе Инчоун, древние лёдники на Чукотке и Аляске). Реже обрушения лёдников происходят при нарушении норм эксплуатации, при чрезмерном отоплении в летнее время (лёдник в селе Лорино) [17]. Для Якутии характерны небольшие “семейные” лёдники, расположенные на глубине 4–6 м, которые более чувствительны к климатическим изменениям и в особенности к увеличению глубины сезонного протаивания. Основную опасность для них представляет затопление тальми или речными водами в период половодий или паводков [26]. На Аляске, в районе поселения Барроу лёдники также являются небольшими сооружениями, имеющимися почти в каждом хозяйстве (по оценкам около 70 лёдников на поселение около 4000 человек). По данным [20] лёдники подвержены затоплению грунтовыми водами, которые формируются в мерзлых засоленных грунтах при повышении их температуры до температуры начала замерзания. Увеличение температуры грунтов может быть связано с климатическими изменениями, а также с увеличением антропогенного воздействия (изменение снегонакопления, проезд транспорта и т.д.).

Для Новопортовского мерзлотника на Ямале увеличение глубины сезонного оттаивания, вероятно, не будет носить критического эффекта, так как тоннели мерзлотника заложены на глубине 10–14 м, не будут подвержены протаиванию в ближайшем будущем. Прекращение обслуживания мерзлотника, как и нарушения в эксплуатации, негативно скажутся на его состоянии и приведут к необратимым деструктивным процессам внутри объекта. Но наибольшую опасность, судя по рекогносцировочному исследованию, представляет затопление мерзлотника водами Обской губы в период нагонов и штормов. Для подобного рода сооружений, описанных в литературе, данная проблема нехарактерна, так как они преимущественно расположены на удалении от водных объектов (на территории индивидуальных хозяйств) и не связаны с берегом. Новопортовский же мерзлотник предполагался как хранилище рыбы, для чего все входы были обустроены вблизи береговой линии, в береговом уступе, для удобства транспортировки продукции. На протяжении десятилетий гидродинамические и литодинамические условия в береговой зоне вблизи мерзлотника оставались относительно стабильными и не вызывали деструктивных процессов. Однако за последнее десятилетие ситуация поменялась.

Исходя из результатов геоморфологического обследования, устных сообщений местных жителей, а также архивных фото, свидетельствующих о размыве фрагмен-

тов лайд на термоабразионных и термоденудационных берегах, можно заключить, что в последние 5–7 лет абразионная нагрузка на берега Нового Порта существенно увеличилась. Непосредственно в створе поселка разрушение берегового уступа реализуется преимущественно за счет активизации склоновых процессов на термоденудационных сегментах с последующим выносом пляжеобразующего материала сгонно-нагонными явлениями. Это может быть связано как с естественным увеличением сезонно-талого слоя в пределах уступа и возрастающей штормовой активностью [8], так и с возросшей техногенной нагрузкой на берег и подводный береговой склон. В 2017 г. был реализован проект строительства нового причала для нужд нефтегазовой отрасли, что сопровождалось дноуглубительными работами на осушке, подрезкой склонов и, возможно, изъятием пляжеобразующих наносов. О росте волновой нагрузки на берега Нового Порта свидетельствует и повсеместный размыв поверхности лайды даже вне зоны активного техногенного воздействия. В обзорных работах [16, 22] берега Юго-Восточного Ямала не рассмотрены или же представлены стабильными морфодинамическими типами берегов. Представленные результаты подтверждают и подчеркивают повсеместную абразионную тенденцию, выявленную, в том числе, и для низких аккумулятивных берегов [10]. При современных климатических тенденциях вполне вероятно увеличение скорости размыва до сопоставимой (2–3 м/год) с техногенно-освоенными участками на открытых побережьях Карского моря [22, 23].

Однако, несмотря на предположение о незначительном влиянии изменяющихся геокриологических условий на состояние мерзлотника, необходимость их мониторинга не отпадает, так как повышение температуры грунтов и увеличение глубины сезонного протаивания повлекут за собой активизацию склоновых процессов: солифлюкция, оползнеобразование, термоденудация. Также повышение температуры грунтов может вызвать локальные просадки в грунтовом массиве, перераспределение нагрузок и деформацию перекрытий мерзлотника. Вероятно, именно активизация склоновых процессов, вызванная увеличением глубины протаивания, привела к выходу из строя двух из трех входов в мерзлотник. Для прогнозирования и предотвращения подобных процессов необходима закладка системы геокриологического мониторинга мерзлотника. В частности, для наблюдения за температурой грунтового массива требуется заложить ряд термометрических скважин на различном удалении от мерзлотника. Также возможна закладка горизонтальных термометрических скважин и скважин ниже подошвы штолен. Мониторинг сезонно-талого слоя должен проводиться в конце периода оттаивания (конец сентября) либо по регулярной сетке, либо в репрезентативных точках. Также требуется установить термометрические и влажностные логгеры внутри тоннелей мерзлотника в нескольких частях для наблюдения за ходом температуры внутри объекта. Заложение системы мониторинга позволит провести более точное моделирование температурного поля вокруг мерзлотника для выявления слабых участков, наиболее подверженных растеплению. Предполагается поставить и решить как плоскую, так и объемную задачу. Определение динамики температурного поля в грунтах позволит предложить наиболее оптимальный путь предотвращения негативных изменений в грунтах: очистка снега, затенение в летнее время, установка сезонно-охлаждающих устройств и т.д. [18].

Дальнейшие работы по оценке динамики береговых процессов в районе исследования будут сопровождаться сравнительным анализом материалов дистанционного зондирования и гидрометеорологических наблюдений с полученными

геодезическими и геоморфологическими данными. Кроме того, преобладание термоденудационного механизма разрушения берегов в условиях литологической неоднородности морской террасы в створе мерзлотника обуславливает необходимость проведения и крупномасштабной геокриологической съемки с выявлением фациальной дифференциации грунтов. Отсутствие надлежащего мониторинга и организации берегоукрепительных работ, нарушение функционирования Новопортовского мерзлотника, памятника культурного объекта и уникального сооружения, может произойти в считанные годы.

Охранный статус Новопортовского мерзлотника, как объекта культурного наследия регионального значения, подразумевает выделение средств из регионального бюджета на сохранение и реставрацию объекта. При условии поддержания (сохранения) мерзлотника в рабочем состоянии и обеспечении его устойчивого функционирования на фоне изменений климата, а также проведении научно обоснованных мероприятий по сохранению мерзлоты (по поддержанию приемлемого температурного режима и физико-механических свойств мерзлых грунтов) можно расширить сферу использования этого объекта. Так, для развития экономики региона помимо традиционного использования мерзлотника в качестве хранилища для рыбы представляется весьма перспективным использование мерзлотника для рекреационно-туристической деятельности. Ряд ледников в Якутии, на Чукотке и в ЯНАО уже используются в качестве музеев краеведения, ледяных скульптур, мерзлоты, “ледникового периода”, отелей для туристов-экстремалов. В ледниках устраиваются гастрономические туры, различные шоу-представления с участием национальных ансамблей песни и пляски. Это реальный путь для восстановления рентабельности ледников, включая Новопортовский, на фоне снижения рентабельности от рыбного промысла.

В целом программа по разработке мер инженерной защиты Новопортовского мерзлотника будет включать несколько этапов. На первом этапе должен проводиться сбор, обработка и обобщении информации о литологическом составе и физико-механических свойствах грунтов, слагающих береговые уступы в районе расположения мерзлотника. Изучение температурного режима мерзлых пород в районе п. Новый Порт по опубликованным и фондовым материалам. Полевые инструментальные наблюдения за опасными криогенными и береговыми процессами с применением GNSS и БПЛА-оборудования. Закладка серии скважин с термокосоми для автоматизированного мониторинга температурного режима грунтов вокруг над тоннелями, в стенах и основании мерзлотника. На втором этапе необходимо подключить инструментальные наблюдения за опасными криогенными и береговыми процессами с применением GNSS и БПЛА-оборудования. Мониторинг температурного режима вокруг над тоннелями, в стенах и основании мерзлотника. Моделирование температурного режима мерзлых грунтов вокруг тоннелей мерзлотника для различных сценариев изменения климата к 2050 г. в программах q-Frost и Frost 3D Термо. На третьем этапе будут продолжены инструментальные наблюдения за опасными криогенными и береговыми процессами с применением GNSS и БПЛА-оборудования. Мониторинг температурного режима вокруг над тоннелями, в стенах и основании мерзлотника. Разработка рекомендации по составу научно-технических и технологических мероприятий, направленных на сохранение мерзлых грунтов вокруг Новопортовского мерзлотника, на стабилизацию опасных береговых и криогенных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам предварительного обследования состояния Новопортовского мерзлотника в сентября 2023 г. и работы с архивными материалами можно сделать следующие выводы.

1. Новопортовский мерзлотник является уникальным среди объектов своего класса: он продолжает выполнять свою изначальную функцию (хранение рыбы), в то время как большая часть ледников такого размера к настоящему времени заброшены и разрушены.

2. Мерзлотник заложен в позднеплейстоцен-голоценовых глинистых лагунно-морских льдистых отложениях, со среднегодовой температурой -5°C . В период максимального потепления (сентябрь) температура внутри мерзлотника не подвержена суточным колебаниям и составляет -5.75°C , при этом в зимний период она опускается до -20°C и ниже. Глубина протаивания над мерзлотником составляет в среднем 107 см, тогда как на фоновых поверхностях равна 70 см.

3. Совокупное воздействие техногенеза (перестройка портовых сооружений) и, вероятно, климатических изменений, привело к активизации размыва и термоденудации берегов в районе мерзлотника. Обновление портовых сооружений (в особенности разбор старых пирсов и молов) обусловило усиление волнового воздействия и последующему размыву пляжа и лайды в створе мерзлотника. Вследствие этого волнению подвергается непосредственно подножье уступа, на котором расположен мерзлотник, из-за чего существует риск затопления мерзлотника во время штормовых нагонов. Активизация склоновых процессов и размыва уже привела к разрушению двух из трех входов в мерзлотник.

4. Для сохранения Новопортовского мерзлотника в условиях активизации хозяйственного освоения и климатических изменений в Обской губе, необходимо установить систему мониторинга, включающую в себя ряд термометрических скважин на различном удалении от объекта и ряд логгеров внутри мерзлотника. Также для наблюдения за экзогенными процессами следует ежегодно составлять цифровые модели местности на основе ортофотограмметрических данных с БПЛА. Данные мониторинга будут использованы для моделирования температурного поля грунтов и прогноза негативных изменений природной среды вблизи мерзлотника. Результаты моделирования могут быть применены при организации инженерной защиты объекта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 22-7-00097. Участие в исследовании А.А.Маслакова осуществлялось в рамках госбюджетной темы НИР № 121051100167-1. Авторы выражают благодарность директору Новопортовского рыбзавода С.С. Юсько за предоставленные архивные материалы, а также за обеспечение доступа к объекту исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов А. А., Кажукало Г. А., Носков А. И., Огородов С. А. Рельеф дна Обской губы Карского моря // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2024. Т. 79, № 1. С. 89–102.
2. Кашперук П. И. Климат. // Геокриология СССР. Западная Сибирь. / Под ред. Э. Д. Ершова. М.: Недра, 1989. С. 40–45.

3. *Лалин С. А.* Гидрологическая характеристика Обской губы в летне-осенний период // *Океанология*. 2011. Том 51, № 6. С. 1–10.
4. *Мавлюдов Б. Р.* Мерзлотник — хранилище в вечной мерзлоте // *Спелеология и спелеология*. 2022. № 2. С. 92–96.
5. *Локтионов Е. Ю., Шараборова Е. С., Клоков А. В., Маслаков А. А., Сотникова К. С., Коршунов А. А.* Технологии сохранения мерзлотников (лёдников) для обеспечения устойчивого развития северных поселений // *Арктика: экология и экономика*. 2024. Т. 14. № 1. С. 116–126.
6. *Огородов С. А., Шабанова Н. Н., Кессель А. С., Баранская А. В., Разумов С. О.* Изменение гидрометеорологического потенциала термоабразии берегов морей Российской Арктики // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2022. № 1. С. 26–42.
7. *Осин М.* Месторождение Новопортовское // *Энергия: экономика, техника, экология*. 2013. № 10. С. 55–57.
8. *Платонов В. С., Мысленков С. А., Архипкин В. С., Кислов А. В.* Высокорастворяющее моделирование гидрометеорологических полей в прибрежных районах Карского моря в условиях сложной конфигурации береговой линии // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2022. № 1. С. 87–106.
9. *Романенко Ф. А.* Региональные особенности развития берегов арктических морей в голоцене // *Геоморфология*. 2012. № 4. С. 81–92.
10. *Романенко Ф. А., Баранская А. В., Ермолов А. А., Кокин О. В.* Низкие берега западно-арктических морей: происхождение, возраст и современная динамика // *Вопросы географии*. 2015. Т. 140. С. 275–306.
11. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / Росгидромет. — Санкт-Петербург: Научные технологии, 2022. 124 с.
12. *Шполянская Н. А.* Западносибирский район. // *Региональная криолитология* / Под ред. А. И. Попова. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 62–87.
13. *Genest M.* Cold Storage Solutions: Tuktoyaktuk Ice House // *First We Eat. Food Security North of 60*. 2016. URL: www.firstweeat.ca [Accessed on 12 April 2020].
14. *George J. C., Wetzel D., O'Hara T. M., Robertson K., Dehn L., Leduc R., Reynolds J.* An Analysis of Ancient Bowhead Whale Mandibles from Gambell Alaska: What can it Tell Us? // *International Whaling Commission Scientific Committee Documents*, SC-60-E2, Santiago, Chile: International Whaling Commission. 2008.
15. *Kintisch E.* These Ice Cellars Fed Arctic People for Generations. Now They're Melting // *National Geographic*. 2015. URL: <https://www.nationalgeographic.com/news/2015/10/151030-ice-cellar-arctic-melting-climate-change/> [Accessed 02.03.2020].
16. *Lantuit H., Overduin P. P., Couture N., Wetterich S., Aré F., Atkinson D., Brown J., Cherkashov G., Drozdov D., Forbes D. L., Graves-Gaylord A., Grigoriev M., Hubberten H. W., Jordan J., Jorgenson T., Ødegård R. S., Ogorodov S., Pollard W. H., Rachold V., Sedenko S., Solomon S., Steenhuisen F., Streletskaia I., Vasiliev A.* The Arctic Coastal Dynamics database. A new classification scheme and statistics on arctic permafrost coastlines // *Estuaries and Coasts*. 2012. V. 35. P. 383–400.
17. *Maslakov A. A., Nyland K. E., Komova N. N., Yurov F. D., Yoshikawa K., Kraev G. N.* Community ice cellars in eastern Chukotka: climatic and anthropogenic influences on structural stability // *Geography, Environment, Sustainability*. 2020. 13(3). P. 49–56.
18. *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. <https://doi.org/10.3390/15030972>.

19. Nielsen D. M., Pieper P., Barkhordarian A., Overduin P., Ilyina T., Brovkin V., Baehr J., Dobrynin M. Increase in Arctic coastal erosion and its sensitivity to warming in the twenty-first century // Nat. Clim. Chang. 2022. 12. P. 263–270. <https://doi.org/10.1038/41558-022-01281-0>
20. Nyland K. E., Klene A. E., Brown J., Shiklomanov N. I., Nelson F. E., Streletskiy D. A., Yoshikawa K. Traditional Iñupiat Ice Cellars (SIGIUAQ) in Barrow, Alaska: Characteristics, Temperature Monitoring, and Distribution // Geographical Review. 2017. 107(1). P. 143–158.
21. Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H. H., Dashtseren A., Khomutov A. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // Earth-Science Reviews. 2019. V. 193. P. 299–316.
22. Ogorodov S., Aleksyutina D., Baranskaya A., Shabanova N., Shilova O. Coastal erosion of the russian arctic: An overview // Journal of Coastal Research. 2020. No. 95. P. 599–604.
23. Ogorodov S., Badina S., Bogatova D. Sea Coast of the Western Part of the Russian Arctic under Climate Change: Dynamics, Technogenic Influence and Potential Economic Damage // Climate. 2023. V. 11, № 7. P. 143.
24. Vasiliev A. A., Drozdov D. S., Gravis A. G., Malkova G. V., Nyland K. E., Streletskiy D. A. Permafrost degradation in the western Russian arctic // Environmental Research Letters. 2020. V. 15, № 4. P. 045001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6f12>
25. WXTide32 — a free Windows tide and current prediction program.
URL: <http://www.wxtide32.com> (дата обращения: 10.07.2024).
26. Yoshikawa K., Osipov D., Serikov S., Permyakov P., Stanilovskaya J., Gagarin L., Kholodov A. Traditional Ice Cellars (Lednik, Bulus) in Yakutia: Characteristics, Temperature Monitoring, and Distribution // Arctic 21 Century. Environmental Sciences. 2016. V. 1 (4). P. 15–22.
27. Yoshikawa K., Maslakov A. A., Kraev G., Ikuta H., Romanovsky V. E., George J. C., Klene A. E., Nyland K. E. Food storage in permafrost and seasonally frozen ground in Chukotka and Alaska communities // Arctic. 2022. V. 75. № . 2. P. 225–241.

Novoportovsky Ice Cellar, the Unique Object of Historical and Cultural Heritage of Yamal Region: the Current State and Prospects of Stability Due to Climate Change

L. P. Kuziakin^{1,*}, S. A. Ogorodov^{1,**}, A. A. Maslakov^{1,***},
G. A. Kazhukalo^{1,****}, D. M. Bogatova^{1,*****}

¹Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow, Russia

*E-mail: kuziakin@geogr.msu.ru

**E-mail: ogorodov@geogr.msu.ru

***E-mail: alexey.maslakov@geogr.msu.ru

****E-mail: kazhukalo@geogr.msu.ru

*****E-mail: aleksyutina@geogr.msu.ru

Abstract — The Novy Port ice cellar is the largest permafrost storage facility in Yamal. Due to climate change and increasing anthropogenic impacts, destructive exogenous processes are intensifying near the ice cellar. Over the past decades, due to an increase in the depth of thawing, two of the three entrances to the ice cellar have collapsed, and subsidence and deformation of the roof of the tunnels have been observed. The deepening of the Novy Port Bay and the elimination of old berths and piers led to increased wave action on the coastal ledge near the ice cellar and to the intensification of thermal erosion and thermal denudation. During surges, the height of the waves almost

reaches the entrance to the ice cellar, which is why it can be flooded and destroyed. In this regard, in order to preserve the unique cultural heritage site of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug, it is necessary to organize monitoring of natural processes near the ice cellar, as well as develop a number of measures to level out the impact of negative exogenous processes.

Keywords: Ob Bay, Novy Port ice cellar, technogenesis in the coastal zone, geocryological monitoring; thermic erosion; coastal processes

REFERENCES

1. Ermolov A. A., Kazhukalo G. A., Noskov A. I., Ogorodov S. A. Rel'ef dna Obskoy guby Karskogo morja // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2024. T. 79, № 1. P. 89–102.
2. Kashperjuk P. I. *Klimat. // Geokriologija SSSR. Zapadnaja Sibir'.* / Pod red. Je. D. Ershova. M.: Nedra, 1989. P. 40–45.
3. Lapin S. A. Gidrologicheskaja harakteristika Obskoy guby v letne-osennij period // *Okeanologija*. 2011. Tom 51, № 6. P. 1–10.
4. Mavludov B. R. Merzlotnik — khranilishe v vечноi merzlotte // *Speleologija*. 2022. № 2. P. 92–96.
5. Loktionov E. U., Sharaborova E. S., Klovov A. V., Maslakov A. A., Sotnikova K. S., Korshunov A. A. Tekhnologii sokhraneniya merzlotnikov (lednikov) dlya obespecheniya ustoychivogo razvitiya severnykh poselenij // *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2024. T. 14. № 1. P. 116–126.
6. Ogorodov S. A., Shabanova N. N., Kessel' A. S., Baranskaja A. V., Razumov S. O. Izmenenie gidrometeorologicheskogo potentsiala termoabrazii beregov morej Rossijskoj Arktiki // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2022. № 1. P. 26–42.
7. Osin M. Mestorozhdenie Novoportovskoe // *Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija*. 2013. № 10. P. 55–57.
8. Platonov V. S., Myslenkov S. A., Arhipkin V. S., Kislov A. V. Vysokorazreshajushhee modelirovanie gidrometeorologicheskikh polej v pribrezhnykh rajonah Karskogo Morja v uslovijah slozhnoj konfiguracii beregovoj linii // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografija*. 2022. № 1. P. 87–106.
9. Romanenko F. A. Regional'nye osobennosti razvitiya beregov arkticheskikh morej v golocene // *Geomorfologija*. 2012. № 4. P. 81–92.
10. Romanenko F. A., Baranskaja A. V., Ermolov A. A., Kokin O. V. Nizkie berega zapadno-arkticheskikh morej: proishozhdenie, vozrast i sovremennaja dinamika // *Voprosy geografii*. 2015. T. 140. P. 275–306.
11. Tretij ocenochnyj doklad ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii. Obshhee rezjume / Rosgidromet. — Sankt-Peterburg: Naukoemkie tehnologii, 2022. 124 pp.
12. Shpoljanskaja N. A. Zapadnosibirskij rajon. // *Regional'naja kriolitologija* / Pod red. A. I. Popova. M.: Izd-vo MGU, 1989. S. 62–87.
13. Genest M. Cold Storage Solutions: Tuktoyaktuk Ice House // *First We Eat. Food Security North of 60*. 2016. URL: www.firstweeat.ca [Accessed on 12 April 2020].
14. George J. C., Wetzel D., O'Hara T. M., Robertson K., Dehn L., Leduc R., Reynolds J. An Analysis of Ancient Bowhead Whale Mangtak from Gambell Alaska: What can it Tell Us? // *International Whaling Commission Scientific Committee Documents*, SC-60-E2, Santiago, Chile: International Whaling Commission. 2008.
15. Kintisch E. These Ice Cellars Fed Arctic People for Generations. Now They're Melting // *National Geographic*. 2015. URL: <https://www.nationalgeographic.com/news/2015/10/151030-ice-cellar-arctic-melting-climate-change/> [Accessed 02.03.2020].

16. Lantuit H., Overduin P. P., Couture N., Wetterich S., Aré F., Atkinson D., Brown J., Cherkashov G., Drozdov D., Forbes D. L., Graves-Gaylord A., Grigoriev M., Hubberten H. W., Jordan J., Jorgenson T., Ødegård R. S., Ogorodov S., Pollard W. H., Rachold V., Sedenko S., Solomon S., Steenhuisen F., Streletskaia I., Vasiliev A. The Arctic Coastal Dynamics database. A new classification scheme and statistics on arctic permafrost coastlines // *Estuaries and Coasts*. 2012. V. 35. P. 383–400.
17. Maslakov A. A., Nyland K. E., Komova N. N., Yurov F. D., Yoshikawa K., Kraev G. N. Community ice cellars in eastern Chukotka: climatic and anthropogenic influences on structural stability // *Geography, Environment, Sustainability*. 2020. 13(3). P. 49–56.
18. 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. <https://doi.org/10.3390/15030972>
19. Nielsen D. M., Pieper P., Barkhordarian A., Overduin P., Ilyina T., Brovkin V., Baehr J., Dobrynin M. Increase in Arctic coastal erosion and its sensitivity to warming in the twenty-first century // *Nat. Clim. Chang.* 2022. 12. P. 263–270. <https://doi.org/10.1038/41558-022-01281-0>
20. Nyland K. E., Klene A. E., Brown J., Shiklomanov N. I., Nelson F. E., Streletskiy D. A., Yoshikawa, K. Traditional Iñupiat Ice Cellars (SIĠĠUAQ) in Barrow, Alaska: Characteristics, Temperature Monitoring, and Distribution // *Geographical Review*. 2017. 107(1). P. 143–158.
21. Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H. H., Dashtseren A., Khomutov A. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // *Earth-Science Reviews*. 2019. V. 193. P. 299–316.
22. Ogorodov S., Aleksyutina D., Baranskaya A., Shabanova N., Shilova O. Coastal erosion of the Russian Arctic: An overview // *Journal of Coastal Research*. 2020. No. 95. P. 599–604.
23. Ogorodov S., Badina S., Bogatova D. Sea Coast of the Western Part of the Russian Arctic under Climate Change: Dynamics, Technogenic Influence and Potential Economic Damage // *Climate*. 2023. V. 11, №. 7. P. 143.
24. Vasiliev A. A., Drozdov D. S., Gravis A. G., Malkova G. V., Nyland K. E., Streletskiy D. A. Permafrost degradation in the western Russian Arctic // *Environmental Research Letters*. 2020. V. 15, № 4. P. 045001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab6f12>
25. WXTide32 – a free Windows tide and current prediction program. URL: <http://www.wxtide32.com> (access date: 10.07.2024).
26. Yoshikawa K., Osipov D., Serikov S., Permyakov P., Stanilovskaya J., Gagarin L., Kholodov A. Traditional Ice Cellars (Lednik, Bulus) in Yakutia: Characteristics, Temperature Monitoring, and Distribution // *Arctic 21 Century. Environmental Sciences*. 2016. V. 1 (4). P. 15–22.
27. Yoshikawa K., Maslakov A. A., Kraev G., Ikuta H., Romanovsky V. E., George J. C., Klene A. E., Nyland K. E. Food storage in permafrost and seasonally frozen ground in Chukotka and Alaska communities // *Arctic*. 2022. V. 75. № 2. P. 225–241.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кузякин Лев Павлович

Аспирант, МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет

e-mail: kuziakn@geogr.msu.ru

тел.: +7 909 121-38-39

Kuziakin Lev Pavlovich

PhD student, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow state University.

e-mail: kuziakn@geogr.msu.ru

tel.: +7 (909) 121-38-39

Огородов Станислав Анатольевич

Д.г.н., Профессор РАН, гл.н.с., МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет

e-mail: ogorodov@geogr.msu.ru

Ogorodov Stanislav

Doctor of Geography Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Head. Research Faculty of Geography Lomonosov Moscow state University.

e-mail: ogorodov@geogr.msu.ru

Маслаков Алексей Алексеевич

К.г.н., в.н.с. МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет

e-mail: alexey.maslakov@geogr.msu.ru

Maslakov Alexey

Ph.D., senior researcher, Faculty of Geography Lomonosov Moscow state University.

e-mail: alexey.maslakov@geogr.msu.ru

Кажукало Георгий Анатольевич

Инженер, МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет

e-mail: kazhukalo@geogr.msu.ru

Kazhukalo Georgy

Engineer, Faculty of Geography Lomonosov Moscow state University.

e-mail: kazhukalo@geogr.msu.ru

Богатова Дарья Максимовна

К.г.-м.н., с.н.с. МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет

e-mail: aleksyutina@geogr.msu.ru

Bogatova Daria

Ph.D., Senior Researcher, Faculty of Geography Lomonosov Moscow state University.

e-mail: aleksyutina@geogr.msu.ru