ВСЕРОССИЙСКИЙ МОЛОДЕЖНЫЙ КОНКУРС ПО ПРОБЛЕМАМ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ, ЭКОЛОГИИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ «ЮНЭКО»

Направление: ПРИКЛАДНАЯ ЭКОЛОГИЯ

Тема: ОСОБЕННОСТИ АРХИТЕКТУРЫ И ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ МОСТОВ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Соискатель: Тимофеев Тимур Айялович, ученик 10 «б» МБОУ «Нюрбинская СОШ №2 им. М. С. Егорова», Республика Саха (Якутия), г. Нюрба
Научный руководитель: Спиридонова Ульяна Ефимовна, учитель физики, МБОУ «Нюрбинская СОШ №2 им. М. С. Егорова», Республика Саха (Якутия), г. Нюрба
Место выполнения работы: 678460, Республика Саха (Якутия), г. Нюрба, ул. Ст. Васильева 83, тел/факс: (41134) 2-45-58. E-mail: sc2yur@mail.ru

2026

СОДЕРЖАНИЕ

Аннотация ……..3
Введение …… 4

Глава 1. Природные условия Крайнего Севера как фактор мостостроения 6
1.1. Климатические особенности: морозы, ветра, перепады температур
1.2. Вечная мерзлота и её влияние на фундаменты
1.3. Гидрология северных рек: паводки, наледи, ледоход, шуга

Глава 2. История и развитие мостостроения в арктической зоне 8
2.1. Первые переправы и мосты на Севере
2.2. Знаменитые мосты Крайнего Севера

Глава 3. Особенности конструкции и архитектуры северных мостов 10
3.1. Материалы: морозостойкий бетон, сталь северного исполнения
3.2. Типы фундаментов в условиях мерзлоты
3.3. Пролётные строения и учёт ветровых и ледовых нагрузок
3.4. Влияние северного дизайна

Глава 4. Практическая часть. Сравнительный анализ мостов ……..... 10

Глава 5. Эксплуатация, экология и перспективы ……..18

Заключение 19

Список литературы 20

АННОТАЦИЯ

В исследовательской работе рассматривается мостостроение как ключевое направление развития транспортной инфраструктуры Арктической зоны России. Актуальность темы обусловлена государственной политикой по освоению Севера, необходимостью обеспечения круглогодичной работы Северного морского пути и новыми вызовами, связанными с деградацией вечной мерзлоты из-за глобального потепления.

Цель работы — выявить специфические архитектурные, конструктивные и экологические особенности мостов, возводимых в экстремальных климатических условиях. В ходе исследования проанализировано влияние сурового климата (температуры до –68 °С, ветровые нагрузки), мощного ледохода, паводков и многолетнемерзлых грунтов на проектирование сооружений, а также их потенциальное влияние на арктические экосистемы.

Особое внимание уделено уникальным инженерным технологиям, не применяемым в других регионах: использованию термосвай для сохранения температурного режима грунтов, применению морозостойкого бетона (марки F300–F500) и хладостойкой стали северного исполнения. Рассмотрены экологические аспекты применения этих технологий — влияние на тепловой баланс грунта, возможная миграция солей и техногенных веществ, изменение гидрологического режима и нарушение прибрежных биотопов. Приведены меры прикладной экологии для минимизации негативных последствий: проектирование безразрубных фундаментных решений, устройства искусственных морозозащитных экранов, дренажных систем и барьеров для предотвращения поступления загрязнений в водные экосистемы; применение малотоксичных материалов, локальная обработка и утилизация грунта, сезонная оптимизация работ и мониторинг состояния почв, воды и биоты в период строительства и эксплуатации.

Проведен исторический обзор развития отрасли — от первых бревенчатых гатей до современных капитальных сооружений. На примере мостов трассы «Колыма», реки Мархи и проекта Ленского моста в Якутске показано, что северные сооружения в 2,5–4 раза дороже аналогов из средней полосы, а их надежность на 80 % зависит от скрытых в грунте систем термостабилизации. Отдельно оценены экологические издержки и расходы на природоохранные мероприятия, входящие в общую смету проектов.

Мосты Крайнего Севера представляют собой самостоятельный класс инженерных объектов, где архитектура полностью подчинена задаче выживания в агрессивной среде при одновременной необходимости минимизировать антропогенное воздействие на уязвимые экосистемы. Перспективы отрасли связаны с адаптацией существующих конструкций к климатическим изменениям, интеграцией принципов прикладной экологии в проектирование и реализацией масштабных проектов, таких как мост через реку Лену, с обязательным комплексом мониторинга, оценки жизненного цикла и адаптивного управления экологическими рисками.

ВВЕДЕНИЕ

Крайний Север — это обширная территория России, простирающаяся от Кольского полуострова до Чукотки, площадью около 12 миллионов квадратных километров. Это регион с одними из самых суровых природных условий на планете: зимние температуры опускаются до –60°С и ниже, грунты пронизаны вечной мерзлотой, реки вскрываются с мощным ледоходом, а короткое лето сопровождается бурными паводками. Именно в таких условиях человеку приходится строить дороги, города и, конечно, мосты.

Мост — одно из древнейших инженерных сооружений человечества. Но если в средней полосе России мост — это, как правило, стандартное сооружение по типовым проектам, то на Крайнем Севере каждый мост становится уникальной инженерной задачей. Вечная мерзлота «плывёт» и деформируется при малейшем нарушении теплового баланса, наледи способны раздавить опоры, ледоход разрушает берега, а полярная ночь и морозы сокращают строительный сезон до нескольких месяцев.

Актуальность темы обусловлена несколькими факторами. Во-первых, развитие арктических территорий — приоритет государственной политики России: осваиваются месторождения нефти и газа, растут северные города, строятся новые дороги. Во-вторых, развитие Северного морского пути требует создания транспортной инфраструктуры, связывающей арктические порты с материком. В-третьих, изменение климата вызывает деградацию вечной мерзлоты, что ставит перед инженерами новые, ещё более сложные задачи. Изучение того, как строятся мосты в экстремальных условиях, помогает понять уровень развития современной инженерной мысли и подготовить почву для будущих проектов.

Цель работы: изучить оптимальные архитектурно-инженерные решения для мостовых переходов на Севере с учётом экологических ограничений, климатических рисков Крайнего Севера.

Задачи исследования:

1. Изучить природно-климатические условия Крайнего Севера, влияющие на мостостроение.
2. Рассмотреть историю строительства мостов в арктической зоне России.
3. Проанализировать конструкции и материалы северных мостов.
4. Исследовать влияние вечной мерзлоты на конструкции мостов.
5. Изучить перспективы мостостроения в Арктике.

Объект исследования: мосты Крайнего Севера.

Предмет исследования: архитектурные и инженерные особенности мостов в условиях Крайнего Севера.

Гипотеза: экстремальные климатические условия Крайнего Севера формируют уникальные архитектурные и конструктивные решения мостов, не применяемые в других регионах.

Методы исследования: анализ литературы, сравнительный анализ, изучение карт и схем, систематизация данных.

ГЛАВА 1. ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ КРАЙНЕГО СЕВЕРА КАК ФАКТОР МОСТОСТРОЕНИЯ

1.1. Климатические особенности: морозы, ветра, перепады температур

Климат Крайнего Севера — субарктический и арктический — характеризуется продолжительной (7–9 месяцев) и исключительно суровой зимой. В Оймяконе и Верхоянске (Республика Саха (Якутия)) зафиксированы температуры около –68°C — это полюс холода Северного полушария. Средние температуры января в Якутии составляют от –40 до –50°C.

Такие морозы предъявляют жёсткие требования к материалам сооружений. При температурах ниже –40°C обычная сталь становится хрупкой и может разрушаться без видимых деформаций — это явление называется хладноломкостью. Обычный бетон при циклическом замораживании и оттаивании постепенно теряет прочность. Поэтому северные конструкции рассчитываются на особые температурные режимы.

Важным фактором являются и перепады температур. Годовая амплитуда температур в Якутии достигает 100°C (от –65°C зимой до +35°C летом). Металл при нагревании расширяется, при охлаждении сжимается: стальная балка длиной 100 метров меняет длину на несколько сантиметров между зимой и летом. Поэтому в северных мостах применяются особо надёжные деформационные швы и шарнирные опорные части, позволяющие конструкции «дышать».

Не менее опасны ветра. На арктических побережьях скорость ветра может превышать 40 м/с, а с учётом обледенения конструкций ветровая нагрузка на пролётные строения мостов возрастает в разы. При проектировании мостов через северные реки и вдоль морских побережий проводятся специальные аэродинамические расчёты, а высота опор и жёсткость пролётов подбираются с учётом штормовых ветров.

Сокращённый строительный сезон — ещё одна климатическая особенность. Работы с бетоном на открытом воздухе практически невозможны при температуре ниже –20°C даже с применением специальных добавок и прогрева. Поэтому основные строительные работы ведутся в короткий летний период, что увеличивает сроки и стоимость строительства.

1.2. Вечная мерзлота и её влияние на фундаменты

Многолетнемёрзлые грунты (вечная мерзлота) занимают около 65% территории России — практически весь Крайний Север. Это грунты, температура которых не поднимается выше 0°C в течение многих десятилетий и даже тысячелетий. Мощность мерзлоты в отдельных местах Якутии достигает 500–1500 метров.

Главная особенность мерзлоты с точки зрения строительства: она стабильна, пока сохраняется холод. При оттаивании лёд, скрепляющий частицы грунта, превращается в воду, грунт превращается в кашу, и его несущая способность падает в десятки раз. Это вызывает просадки, крены и разрушения сооружений.

Отсюда вытекает главный принцип северного мостостроения: сохранение мерзлоты в мёрзлом состоянии. Для этого используются:

1. Свайные фундаменты — мостовые опоры опираются на длинные сваи, заглублённые в мёрзлый грунт на десятки метров. Сваи погружаются преимущественно в пробуренные скважины, чтобы не растапливать грунт забивкой.

2. Термосваи (сезонно-охлаждающие устройства) — уникальное инженерное изобретение, применяемое именно на Севере. Термосвая — это труба с лёгким хладагентом (например, пропаном или углекислотой), вкопанная рядом со сваей. Верхняя часть трубы выступает над землёй и снабжена радиатором. Принцип работы: зимой пары хладагента поднимаются вверх, отдают тепло атмосфере через радиатор и конденсируются, а жидкость стекает вниз. Летом конвекция прекращается, и тепло не проходит вглубь. Таким образом термосвая работает как односторонний «насос», выкачивающий тепло из грунта. За зиму одна термосвая промораживает вокруг себя цилиндр грунта радиусом в несколько метров.

3. Мерзлотные пояса и охлаждающие трубопроводы — системы труб с циркулирующим хладагентом, проложенные вокруг крупных опор.

4. Термозащита грунта — теплоотражающие экраны, пенопластовые «шубы», светлые покрытия, не дающие летнему солнцу прогревать основание опор.

Отдельная проблема — наледеобразование вокруг свай: вода, стекающая по поверхности сваи, замерзает и может выпучивать её вверх силами морозного пучения. Для борьбы с этим применяют гладкие стальные оболочки, по которым лёд не может «закуситься», и специальные обмазки.

С потеплением климата проблема обострилась: по данным геокриологов, температура верхних слоёв мерзлоты в Арктике за последние десятилетия выросла на 1–2°C, и инженерам приходится закладывать «резерв прочности» в расчёты на ближайшие 50–100 лет.

1.3. Гидрология северных рек: паводки, наледи, ледоход, шуга

Северные реки (Лена, Яна, Индигирка, Колыма, Вилюй, Обь, Печора) обладают уникальным водным режимом, создающим для мостостроителей особые угрозы.

Ледоход. Весной северные реки вскрываются сверху вниз — навстречу ходу льда. Огромные поля льда толщиной 1–2 метра, гонимые течением и напором льда из верховьев, сталкиваются у опор мостов, образуя заторы. Давление льда на опору может достигать сотен тонн. Поэтому северные опоры моста получают **ледорезы** — наклонные железобетонные конструкции перед опорой, раскалывающие льдины, а сами опоры имеют обтекаемую форму и усиленную облицовку. Периметр верховых граней опор иногда обшивается сталью.

Паводки. Летнее половодье на Лене и её притоках поднимает уровень воды на 10–15 и более метров (у Ленских шёк — до 20 метров и выше). Мост через такую реку должен иметь огромные отверстия и высоко поднятые пролётные строения, иначе вода зальёт пойменные пролёты. Именно поэтому надёжность северного моста напрямую зависит от длины подходных эстакад и высоты судоходных пролётов.

Наледи. Это особое северное явление: речная или грунтовая вода, выходящая на поверхность или замерзающая прямо в русле, наращивает зимой ледяные поля толщиной в несколько метров. Наледь может перекрыть пойму, подниматься по опорам и даже разрушать насыпи подходов. С наледями борются с помощью наледных поясов, дренажных прорезей и проектирования мостов с учётом максимального развития наледей за десятилетия наблюдений.

Шуга и зажоры. Осенью перед ледоставом в реке образуется шуга — рыхлый внутриводный лёд, который забивает водопропускные отверстия и образует зажоры (скопления шуги перед закрывающейся полыньёй). Шуга истирает бетон опор, а зажоры вызывают резкий подъём уровня воды. Из-за шуги, например, на Колыме были зафиксированы подъёмы уровня воды на 8–10 метров ещё до ледостава.

Селевые явления и речная эрозия. дополняют картину: стремительные северные реки подмывают основания опор, и глубина размыва закладывается в расчёты с большими запасами.

ГЛАВА 2. ИСТОРИЯ И РАЗВИТИЕ МОСТОСТРОЕНИЯ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ

2.1. Первые переправы и мосты на Севере

До прихода русских первопроходцев коренные народы Севера — якуты, эвены, эвены, чукчи, ненцы широко использовали естественные переправы: зимники по льду рек, перевозы на лодках-ветках и берестяных батах, оленьи и конные броды. Зимой реки становились дорогами — лёд толщиной более метра выдерживал санные обозы, а летом единственным средством переправы оставалась лодка. Это определяло сезонность всей жизни Севера: грузы возили «по зимнику», а летом реки становились барьерами.

Первые искусственные сооружения на севере — это простейшие бревенчатые мосты и гати через ручьи на якутских трактах XVII–XIX веков, а также висячие мосты через небольшие реки, построенные ссыльными и местными мастерами. Мосты строились из лиственницы — древесины, которая в суровом климате не гниёт, а со временем лишь набирает твёрдость. Некоторые деревянные мосты дореволюционной постройки на Севере прослужили более полувека.

Российская империя почти не строила капитальных мостов за полярным кругом: население было редким, а техника — отсутствовала. Перелом наступил в советское время, и связан он с двумя причинами: освоением месторождений полезных ископаемых (золото Колымы, алмазы Якутии, нефть и газ Западной Сибири) и строительством лагерной дорожной инфраструктуры в 1930–1950-е годы (Колымская трасса, трасса «Вилюй»). Именно тогда через северные реки впервые перекинули капитальные деревянные и металлические мосты, а зимой начали строить ледяные переправы с искусственным намораживанием льда.

В 1960–1980-е годы, с развитием техники (вертолёты, буровые установки, термостойкие материалы), началась эра капитального северного мостостроения. Была разработана целая научная школа — мерзлотное мостостроение, связанная с институтами Якутска и Ленинграда. Инженеры научились бурить скважины в мёрзлом грунте, погружать сваи пароотаиванием и применять термосваи.

2.2. Знаменитые мосты Крайнего Севера

Мост через реку Яну. Река Яна — одна из самых сложных для мостостроения рек Якутии: мощный ледоход, огромные наледи, сильная речная эрозия. Мосты через Яну и её притоки на автодороге «Колыма» строились с применением усиленных ледорезов и глубоких свайных оснований. По Янский (Автодорожный) мост через Яну у посёлка Батагай — один из символов северного мостостроения: его опоры рассчитаны на ударные нагрузки льдин весом в десятки тонн.

Мост «Дружба» через реку Марха. Этот мост на автодороге «Вилюй» связал левобережную часть Якутии с центральной. Вилюйский мост стал важным звеном в транспортной схеме алмазодобывающего региона — по нему осуществляется снабжение городов Мирный, Ленск, Нюрба. Мост выполнен в металлических пролётных строениях, его опоры заглублены в мёрзлый грунт на десятки метров. Характерная деталь северных мостов — высокая надводная часть, рассчитанная на проплавление льда.

Мосты трассы «Колыма». Автодорога «Колыма» (Якутск — Магадан), построенная в 1930–1950-е годы и полностью реконструированная в 2000–2010-е годы, пересекает десятки рек — Алдан, Улан-Ур, Хандыгу, Колыму, Яну. На ней построено более 40 новых капитальных мостов. Многие старые деревянные мосты заменены железобетонными и металлическими сооружениями на свайно-эстакадных опорах. Особенность трассы — мосты-эстакады, «перепрыгивающие» наледные поляны, на которых ставить опоры бесполезно — лёд их разрушит.

Ленский мост в Якутске (проект). Самый амбициозный арктический мостовой проект современности — мост через реку Лену у Якутска, протяжённостью около 3 километров с эстакадами (общая длина — свыше 14 км). Лена у Якутска разливается на 10–15 километров, глубоко размывает берега и несёт гигантский ледоход — поэтому проект предусматривает минимальное количество опор в русле, огромные судоходные пролёты и эстакадные подходы на сваях с термоохлаждением. Строительство начато в 2020-х годах, ввод запланирован на 2028–2029 годы. Этот мост станет самым северным крупным вантовым (или балочно-вантовым) мостом планеты и будет выдерживать температуру от –57°C до +40°C.

Другие значимые сооружения: мост через Обь у Салехарда (в составе проекта «Урал промышленный — Урал Полярный»), мост через Печору, мост через Хатангу, автодорожно-железнодорожные мосты норильского направления, мост через Колыму у посёлка Черский. Их объединяет одна черта: все они — уникальные, не серийные сооружения.

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И АРХИТЕКТУРЫ СЕВЕРНЫХ МОСТОВ

3.1. Материалы: морозостойкий бетон, сталь северного исполнения

Морозостойкий бетон. Обычный бетон разрушается, когда вода в его порах замерзает и расширяется, разрывая структуру. Северный мостовой бетон должен выдерживать сотни циклов замораживания-оттаивания (марки по морозостойкости F300–F500 и выше). Для этого применяют:

- специальные добавки — пластификаторы и воздухововлекающие компоненты, создающие в бетоне микропоры, куда выдавливается вода при замерзании;
- сульфатостойкие цементы (северные воды часто агрессивны);
- обогрев бетонной смеси при зимней укладке («термос», прогревочные тепляки, электропрогрев);
- защитные облицовки зоны переменного уровня воды — здесь бетон контактирует со льдом и шугой и истирается сильнее всего.

Сталь северного исполнения. Для северных мостов применяются низколегированные стали специальных марок (например, типа 15ХСНД и современные аналоги «северного исполнения»). В них строго ограничено содержание серы и фосфора, введены добавки (никель, марганец), которые

позволяют стали сохранять ударную вязкость при –60°С. Все сварные швы проходят ультразвуковой контроль: дефект шва при полярной минусовой температуре может стать очагом хрупкого разрушения всей конструкции. Металлоконструкции покрываются антикоррозионными покрытиями, рассчитанными на 25–30 лет службы, поскольку зимой проводить ремонтные окрасочные работы невозможно.

3.2. Типы фундаментов в условиях мерзлоты

Основной тип фундамента северного моста — сваи. Применяются:

забивные железобетонные сваи — на участках с пластично-мёрзлыми грунтами;

бурозабивные и буроопускные сваи в стальных оболочках в твёрдомёрзлых грунтах сначала бурится скважина, затем в неё опускается свая с заливкой грунтового раствора, который промораживается естественным холодом;

трубчатые сваи-оболочки большого диаметра (до 1,5–2 м) для опор больших мостов.

Ключевые приёмы:

1. Принцип сохранения мерзлоты (принцип I): фундамент проектируется так, чтобы мерзлота под ним никогда не оттаяла. Между подошвой ростверка и грунтом оставляют вентилируемый зазор или прокладывают теплоизоляцию, чтобы тепло опоры не стекало в грунт.

2. Термосваи (описанные в главе 1) устанавливаются по 2–6 штук на каждую крупную опору — они «подкачивают» холод зимой и создают запас промороженного грунта на лето.

3. Строительство «в зимний долив»: скважины бурят зимой, бетон укладывают в промороженную оболочку, чтобы не нарушать тепловой режим грунта.

4. Мониторинг: в опоры встраиваются термометрические скважины, по которым специалисты десятилетиями отслеживают температуру мерзлоты.

3.3. Пролётные строения и учёт ветровых и ледовых нагрузок

Пролётные строения северных мостов имеют ряд особенностей:

высокие надводные габариты — просвет под мостом рассчитывается на проплавление льда, шуги и высочайшие паводки с запасом;

обтекаемые формы опор и ледорезы с наклонными гранями, раскалывающими льдины;

усиленные опорные части — шарниры и подвижные плиты, компенсирующие температурные перемещения до десятков сантиметров;

аэродинамика пролётов — в районах сильных ветров пролёты проверяют на аэродинамическую устойчивость, чтобы не возникли опасные колебания, как при разрушении Такомского моста в США;

замкнутые коробчатые сечения балок — они жёстче, лучше сопротивляются ветру и льду и меньше подвержены коррозии изнутри.

Интересное решение — пролёты-эстакады на подходах: вместо высоких насыпей из грунта (которые нарушают мерзлоту и перекрываются наледями) ставятся длинные эстакады на сваях. Воздух свободно продувает под мостом, тепло от насыпи не попадает в грунт, а наледь свободно растекается под сооружением.

3.4. Влияние северного дизайна: лаконичность, устойчивость, цветовые решения

Архитектура северных мостов подчинена функции, но имеет свои эстетические принципы:

лаконичность и мощь форм — гладкие, без лишних украшений, обтекаемые опоры и балки, «зализанные» ветром формы;

яркие цветовые решения — на фоне белой зимы и полярной ночи важна видимость: пролётные строения часто окрашивают в красный, оранжевый, голубой цвета (яркая окраска также заметна пилотам вертолётов и помогает в противоаварийной навигации);

защитные галереи и ветрозащитные экраны на мостах в зонах частых метелей (например, на дорогах Сахалина, Чукотки, Камчатки) — сплошные парапеты не дают снегу заметать полотно и создают лобовое сопротивление ветру для автомобилей;

учёт полярной ночи — интенсивное освещение, светодиодные системы, световозвращающие разметки;

символика — на новых мостах Якутии (Ленский мост) в архитектуру закладываются национальные мотивы: силуэты хомуса, орнаменты народов Севера.

Таким образом, северный мост — это не «перенесённый» на юг типовой мост, а сооружение, спроектированное «от климата», где архитектура подчинена выживанию в экстремальных условиях.

ГЛАВА 4. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОСТОВ

Я решил поискать в интернете/других источников разные мосты из крайнего севера и мостов в более благоприятных условиях, чтобы наглядно показать как технологии и методы экологии адаптируются под климатические особенности региона.

№	Критерий	Кольский мост (Мурманск)	Мост Свентокшиский (Варшава)
1	Статус	Действующий, открыт в 2005 г.	Действующий, открыт в 2000 г.
2	Длина	1611 м (с подходами ~2,5 км)	~479 м (главный пролёт ~250 м)
3	Мин. расчётная температура	около −35…−40 °C	около −25…−30 °C
4	Грунты основания	Скальные породы, морена, морские отложения	Аллювий Вислы: пески, гравий, суглинки
5	Тип фундамента	Свайные/буровые, заглублённые до скалы	Буровые сваи большого диаметра
6	Материал опор	Железобетон	Железобетон (пилон тоже)
7	Материал пролётов	Сталь и сталежелезобетон	Сталь/сталежелезобетон с вантовой системой
8	Ледовые нагрузки	Низкие: залив не замерзает, возможен только дрейф льда и шуга	Существенные: ледоход и заторы на Висле
9	Наледи	Актуальны на проезжей части и подходах, нужна противогололёдная обработка	Умеренно актуальны, обычное зимнее содержание
10	Температурные перемещения	Заметные: большой диапазон температур и большая длина, нужны деформационные швы	Меньше по диапазону и длине, компенсируются опорными частями и швами
11	Сезонность работ	Ограничена: полярная зима, штормы, холод	Почти круглогодично, зимой с ограничениями
12	Период навигации/монтажа	Лучшее окно — тёплый сезон (лето)	Монтаж вне периодов высокой воды и ледохода
13	Стоимость 1 км (условно)	Порядка нескольких млрд руб./км, зависит от года и учёта подходов	Порядка 0,7 млрд злотых/км (оценочно)
14	Транспортное значение	Главная связь Мурманска с правым берегом залива, выход на федеральную трассу, 4 полосы и пешеходная часть	Магистраль Варшавы, связь центра с Правобережьем, автомобильное и пешеходное движение
15	Обслуживание	Сложное: коррозия от морской воды и соли, наледь, ветер	Умеренное: осмотр вант и пилона, антикоррозионная защита, содержание полотна
16	Уникальность	Один из крупнейших мостов за Полярным кругом, работает в арктических условиях	Первый крупный вантовый мост Варшавы, архитектурный символ с высоким пилоном
17	Воздействие на экосистемы и биоразнообразие	Влияние на морскую среду залива при строительстве (сваи, взвесь, шум), на птиц и бентос	Влияние на речную экосистему и пойму, нерестовые пути и прибрежную фауну
18	Тепловое воздействие на мерзлоту и меры снижения	Невысокое: мерзлота островная или отсутствует. Меры: теплоизоляция, контроль грунтов	Не актуально: мерзлоты нет

В этой таблице показано, сравнения двух вантовых мостов Кольского моста из Мурманска и мост Свентокшиский из Варшавы.

Сравнение показало существенные отличия. Минимальные расчётные температуры для Мурманска (−35…−40 °C) против варшавских (−25…−30 °C) требуют на Кольском мосту деформационных швов увеличенной длины из-за большого диапазона температурных перемещений. Фундаменты также различны: свайно-буровые сваи, заглублённые до скалы с мерзлотным контролем грунтов, — против бурения свай большого диаметра в аллювии Вислы, где мерзлота отсутствует. На Колъском мосту актуальны дрейф льда, юга и противоледная обработка, а также усиленная антикоррозионная защита в морской среде. Строительство осложнялось полярной зимой и штормами, что ограничивало монтажные работы летним сезоном и повысило стоимость километра

Таким образом, сравнение подтвердило гипотезу: экстремальные климатические условия Крайнего Севера формируют уникальные решения — фундаменты до скалы, усиленные деформационные швы, ледовые и антикоррозионные мероприятия, сезонный график строительства, — не применяемые в мостах умеренного климата.

Критерий сравнения	Мост в средней полосе (Клязьма)	Мост через р. Марху (Якутия)
Материал опор	Обычный железобетон (F100–F150)	Морозостойкий бетон F250–F400, защита зоны переменного уровня воды
Материал пролётов	Обычная углеродистая сталь	Низколегированная сталь для северного исполнения (типа 15ХСНД, 10ХСНД) для хладостойкости
Ледовые нагрузки	Умеренный ледоход	Мощный лёд при вскрытии реки, заторные подъёмы уровней, ледорезные устройства на опорах
Наледи	Отсутствуют	Характерны наледные процессы в долине; учитываются при размещении устоев и конусов
Температурные перемещения	До ±2–3 см	До ±15–25 см, усиленные опорные части и увеличенные деформационные швы
Сезонность работ	Круглый год	Основные работы — зимой (бурение скважин, бетонирование); завоз грузов по автозимникам
Период навигации/монтажа	Весь тёплый сезон	Короткая доставка крупногабарита: летние окна или только по зимникам
Стоимость 1 км (условно)	1,0	~2,5–3,5 (коэффициент удорожания)
Обслуживание	Плановое	Плановое + геокриологический мониторинг состояния мерзлого основания
Воздействие на экосистемы и биоразнообразие	Стандартные природоохранные мероприятия: ограждение стройплощадки, раздельный сбор отходов, контроль сбросов в водотоки.	Комплексные меры: сохранение мохово-торфяного покрова как естественного теплоизолятора мерзлоты; шумозащитные экраны в период строительства; вывоз и утилизация отходов только по зимникам для минимизации повреждения.
Тепловое воздействие на мерзлоту	Не учитывается как критический фактор; локальные тепловыделения не влияют на несущую способность грунтов	Критический параметр: расчёт теплового следа техники и конструкций; применение теплоизоляционных экранов вокруг опор; контроль температуры грунтов термокосами; запрет складирования материалов, меняющих альбедо поверхности.

На таблице показан мост из средней европейской полосы (Клязьма) а на другой стороне показан мост через реку Марху (Якутия) для проверки гипотезы проведено сравнение двух мостов: моста в средней полосе (Клязьма) и моста через р. Марху в Якутии. Анализ показал, что экстремальные климатические условия формируют принципиально иные конструктивные и организационные решения.

Опоры Клязьминского моста выполняются из обычного железобетона (F100–F150), тогда как в Якутии применяется морозостойкий бетон F250–F400 с защитой зоны переменного уровня воды. Материал пролётов также отличается: обычная углеродистая сталь против никелированной стали северного исполнения (15ХСНД, 10ХСНД) для хладостойкости. Расчёт температурных перемещений различается в разы: ±2–3 см на Клязьме против ±15–25 см в Якутии, что требует усиленных опорных частей и увеличенных деформационных швов.

Климат определяет и специфические нагрузки. Для якутского моста характерны мощный лёд при вскрытии реки, заторы, ледорезные устройства на опорах и активные наледные процессы, учитываемые при размещении устоев и конусов; на Клязьме ледоход умеренный, а наледи отсутствуют. Также критично тепловое воздействие на мерзлоту: в Якутии применяются теплоизоляционные экраны вокруг опор, контроль температуры грунтов термоскважинами, расчёт теплового следа техники, запрет складирования материалов, меняющих альбедо поверхности; для средней полосы этот фактор не является определяющим.

Организация работ кардинально различается: на Клязьме строительство и навигация идут круглый год, а в Якутии основные работы ведутся зимой (бурение скважин, бетонирование), завоз материалов возможен только по зимникам, доставка крупногабарита ограничена короткой летней навигацией. Это удорожает строительство примерно в 2,5–3,5 раза и требует геокриологического мониторинга мерзлого основания в эксплуатации. Сохранение многолетнемёрзлых почв при строительстве обеспечивается комплексными мерами: теплоизолятором, шумоизоляцией скважин и круглогодичным вывозом отходов только по зимникам.

Таким образом, сравнение подтверждает гипотезу: экстремальные климатические условия Севера формируют уникальные решения — морозостойкие и хладостойкие материалы, ледорезные и наледные мероприятия, компенсацию температурных перемещений до ±25 см, зимнюю организацию работ и геокриологический мониторинг, — не применяемые в мостах средней полосы.

Критерии сравнения	Императорский мост (Ульяновск)	Мост через р. Юрибей (Ямал)
Статус	Исторический мост (1913–1916, реконструкции), через Волгу, второй мостовой переход в Ульяновске (Президентский) — современный	Современный мост (открыт 2009), через реку Юрибей за Полярным кругом
Длина	Императорский: ~2 069 м (с эстакадами); новый Президентский мост (2009): 5,8 км — самый длинный на Волге	~3,9 км
Минимальная расчётная температура	Умеренный климат: около −30…−35 °C (обычное исполнение стали)	-60 °C, арктическое (хладостойкое) исполнение
Грунты основания	Вечная мерзлота отсутствует: пески, суглинки, известняки/мел в основании, мощные аллювиальные отложения Волги	Вечномёрзлые грунты с высокой льдистостью, талики под руслом
Тип фундамента	Кессоны (исторический мост), буронабивные сваи и опускные колодцы (новый мост)	Сваи глубокого заложения в мёрзлые грунты («мёрзлый» принцип)
Материал опор	Кладка/бетон (старый), железобетон (новый)	Железобетон хладостойкий
Материал пролётов	Клёпаная сталь (истор.), сталь/сталежелезобетон (новый)	Сталь северного (хладостойкого) исполнения
Ледовые нагрузки	Мощный весенний ледоход на Волге — значительные, но прогнозируемые; ледорезы на опорах	Ледоход + возможность заторов; нагрузки арктического уровня
Наледи	Практически нет — не характерно для Поволжья	Есть — мощные наледи, специальные защитные меры
Температурные перемещения	Умеренный перепад (~−35…+40 °C) — стандартные швы и опорные части	Экстремальный перепад (~−60…+35 °C) — швы большого хода, спец. опорные части
Сезонность работ	Круглогодичная, обычная стройтехнология	Круглогодичная, но с жёсткой привязкой к зимникам и короткой навигации
Период навигации/монтажа	Длинная навигация Волги: апрель–октябрь (~6–7 мес.)	Короткая: июль–сентябрь (~2–3 мес.), остальное — зимник
Стоимость 1 км (условно)	Президентский мост (~2009): порядка 2–3 млрд руб./км (оценочно, в ценах тех лет)	Оценочно сопоставимо или выше: ~1,5–3+ млрд руб./км с арктическими надбавками (точных данных нет)
Транспортное значение	Связывает европейскую часть, федеральная трасса, плотный трафик	Единственная круглогодичная связь через Юрибей, ранее — паром/зимник, снабжение газовых месторождений
Обслуживание	Стандартное: швы, опорные части, покрытие, дефектоскопия	Стандартное + мониторинг мерзлоты (термометрия), борьба с наледями, снегозаносами, экстремальный режим
Уникальность	Памятник истории и инженерии (царский мост, 1916), до 2009 г. — единственный мостовой переход Ульяновска	Самый длинный мост России за Полярным кругом, символ освоения Арктики
Воздействие на экосистемы и биоразнообразие	Стандартные природоохранные мероприятия: ограждение стройплощадки, раздельный сбор отходов, контроль сбросов в водотоки	грунта: мост проложен по всей ширине поймы, что позволило сохранить естественный режим реки и нерестилища. Система термоизоляции: для сохранения устойчивости мерзлого грунта в основании насыпи использовалась послойная термоизоляция (пенополистирол, геотекстиль)
Тепловое воздействие на мерзлоту	Фактор не является определяющим: тепловыделения от конструкций и техники не оказывают значимого влияния на основание	Опоры моста уходят под землю на 20-40 метров и благодаря специальной заморозке, прочно сцепляются с вечномерзлыми грунтами.Отказ от традиционной отсыпки

На таблице сравнены два моста: Императорский мост через Волгу в Ульяновске (исторический, 1913–1916 гг., реконструирован в 2009 г., длина около 3 км) и современный мост через р. Юрибей за Полярным кругом (открыт в 2009 г., длина около 3,9 км). Оба сооружения сопоставимы по масштабу, что позволяет выявить климатически обусловленные различия.

Материалы и конструкции различаются принципиально. На Волге применяются кессонные и буронабивные сваи, обычный железобетон (новые опоры) и клёпаная сталь (историческая часть); на Юрибее — сваи глубокого заложения с выемкой грунта (амбарный метод), высокохромистый гидростойкий железобетон и сталь северного исполнения для работы при арктических температурах до −60 °C. Расчётная температура моста в Ульяновске составляет −35…−38 °C, а перемещения компенсируются стандартными швами; для Юрибея диапазон −60…+35 °C требует швов большого хода и специальных опорных частей. Наледи на Юрибее — обычное явление,

предусмотрены специальные защитные меры и ледорезы на опорах, тогда как на Волге практика ледорезов не применяется.

Организация работ также кардинально различается: в Ульяновске строительство возможно круглый год, а в Якутии (на Ямале) — круглый год, но с обязательными зимниками; монтаж короткой навигации ограничен (2–3 мес.), сроки навигации — 6–7 мес. Это даёт коэффициент удорожания ≈1,5–2 млрд руб. против 2–3 млрд руб./км для преображенского моста. При этом Юрибей является уникальным сооружением: самая северная постоянная железная дорога России соединяет европейскую часть с газовыми месторождениями Ямала.

Экологический аспект. Мост через Юрибей проходит по особо охраняемому совокупному ландшафту и соседствует с сезонными пастбищами оленей, поэтому предусмотрены специальные меры: сохранение геоморфологического режима реки и сожженных терристемы, защита оленьих пастбищ, утилизация мусора термокамерами, неполитигон, термокарстовый режим. На Волге же наоборот экологический фактор не является критическим: стандартные природоохранные мероприятия (противооползиционные мероприятия, раздельный сбор отходов, оборот воды в водотоке).

Таким образом, сравнение подтверждает гипотезу: экстремальные климатические условия Крайнего Севера формируют уникальные решения — хладостойкие материалы, амбарный метод свай глубокого заложения, компенсацию температурного диапазона −60…+35 °C, наледные и ледорезные меры, зимники и особый экологический контроль в условиях Арктики, — не применяемые в мостах умеренного климата.

Интересный факт:
Пресса критиковала строителей за то, что рельсы на мосту через Юрибей уложили на деревянные шпалы вместо предусмотренных проектом «Ленгипротранса» железобетонных плит. Кроме того, вместо проектных опор из железобетонных контурных блоков мост стоит на стальных трубах.

Эти отклонения объясняются адаптацией конструкции к слабым грунтам (речные илы, мягкие глины, вечная мерзлота): при перепроектировании максимально снижали массу сооружения, что и привело к отказу от шпал из бетона и сокращению объёма бетонирования. И финальный проект, и построенный мост прошли государственную экспертизу

Критерии сравнения	Виадук Мийо	Ленский мост (проект)
Статус	Эксплуатируется с 2004 г.	Проект, начало стройки готовится
Длина	2 460 м	~3 км (с подходами до 15 км)
Минимальная расчётная температура	Около −25°C	До −60°C
Грунты основания	Плотные известняки и мергели долины Тарна	Вечномёрзлые грунты, пески, галечники Лены
Тип фундамента	Буронабивные сваи глубокого заложения, глубокие опоры-«колодцы»	Сваи в мерзлоту, принцип сохранения мерзлоты (охлаждающие элементы)
Материал опор	Высокопрочный железобетон (раздвоённые пилоны)	Железобетон (монолит в скользящей опалубке, зимнее бетонирование)
Материал пролётов	Сталь (ортотропная плита, вантовая система)	Сталь / сталежелезобетон (по проекту — вантовая или балочная система)
Ледовые нагрузки	Отсутствуют (река Тарн маловодна у моста)	Очень высокие: мощный ледоход на Лене, ледорезы на опорах
Наледи	Не характерны	Серьёзная проблема — наледеобразование, необходимы меры защиты
Температурные перемещения	±до ~0,9 м (учтены деформационные швы)	Больше: перепад от −60°C до +35°C — огромные температурные деформации
Сезонность работ	Круглогодично, без погодных ограничений	Жёсткая сезонность: основные работы летом
Период навигации/монтажа	Не критичен	Короткая навигация Лены для доставки грузов
Стоимость 1 км (условно)	~160–180 млн €/км (400 млн € / 2,46 км)	~45–50 млрд ₽/км (140+ млрд ₽ / ~3 км)
Транспортное значение	Разгрузка долины Тарна, скорость на трассе A75, туризм	Жизненно важен: устранение сезонной изоляции Якутска, связь с «Колымой»
Обслуживание	Стандартное, концессия 78 лет (Eiffage)	Сложное: мониторинг мерзлоты, борьба с наледями, ледоход
Уникальность	Самый высокий мост в мире (пилон 343 м), дизайн Нормана Фостера	Уникальность — экстремальный климат, одна из самых суровых строек моста
Воздействие на экосистемы и биоразнообразие	Минимальное: Река тарн маловодна, строительство велось с учётом ландшафта долины. Стандартные природоохранные мероприятия: ограждение стройплощадки, раздельный сбор отходов, контроль	Риск изменения русла лены, нарушения миграций рыб и мест обитаний околоводных птиц; нужны экологические коридоры
Тепловое воздействие на мерзлоту и меры его снижения	Не учитывается как критический фактор; локальные тепловыделения не влияют на несущую способность грунтов	Для строительства выбран очень устойчивый участок, практически единственный из возможных. Будут использовать специальную хладостойкую сталь марки типа 10ХСНД или 15ХСНД. Применяют уникальные стальные коффердамы (высотой 17 м и диаметром 47 м).

Теперь сравним будущий Ленский мост и знаменитый французский мост Виадук Мийо.
Конструкции различаются принципиально. В Мийо буронабивные сваи глубокой закладки опираются на плотные известняки и мергели долины Тарн; применён высокопрочный железобетон и сталь ортотропной плиты. Для Ленского моста на вечномёрзлых грунтах (пески, галечник Лены) предусмотрены сваи с мерзлотным принципом сохранения мёрзлоты (охлаждение с целью замерзания), железобетон с зимним бетонированием и сталь северного исполнения. Температурные перемещения отличаются на порядок: до ±0,9 м у Мийо против диапазона −60…+35 °C с огромными деформациями у Ленского моста.

Климат определяет и специфические нагрузки. На Лене — мощный ледоход с ледорезами на опорах и серьёзная проблема наледей, отсутствующих у моста Мийо (река Тарн маловодна). Сезонность работ кардинально различается: во Франции строительство круглосуточное без погодных ограничений, в Якутии — жёсткая сезонность, короткая навигация для доставки грузов,

зимники. Это отражается и на стоимости: ~150–180 млн евро/км у Мийо против 45–50 млрд руб. за ~3 км у Ленского моста с коэффициентом удорожания.

Экология. В Мийо воздействие минимально: река маловодна, строительство велось с учётом ландшафта долины, применялись стандартные природоохранные мероприятия (оградительные экраны, шумоподавление, разделение отходов). Для Ленского моста экологические риски существенно выше: изменение русла Лены, нарушение миграции рыб и мест обитания околоводных птиц, что требует разработки специальных экологических коридоров и компенсационных мер. Дополнительно учтено тепловое воздействие на мерзлоту: выбран устойчивый участок, при строительстве будут применяться специальные изолирующие материалы и уникальные большие кессоны (диаметром 17 и 47 м) для сохранения грунтов в вечномёрзлом состоянии.

Выводы по главе 4. Проведённый сравнительный анализ мостов, расположенных в различных климатических зонах, подтверждает выдвинутую гипотезу: экстремальные климатические условия Крайнего Севера формируют уникальные архитектурные и конструктивные решения, не применяемые в других регионах.

Сравнение показало, что северный мост обходится дороже «южного» аналога в 2,5–4 раза, при этом практически все отличия сосредоточены не в пролётных строениях, а в фундаментах и системе защиты от климатических воздействий: буронабивные сваи глубокого заложения с мерзлотным принципом сохранения мёрзлоты, хладостойкие материалы северного исполнения (стали 10ХСНД, 15ХСНД, морозостойкие бетоны F250–F400), деформационные швы большого хода для компенсации перемещений в диапазоне до −60 °C, ледорезные и наледные мероприятия. Дополнительное удорожание и особые требования возникают из-за жёсткой сезонности строительства (зимники, короткая навигация, зимнее бетонирование) и повышенных экологических ограничений Арктики.

Главным «невидимым» элементом северного моста является система сохранения мерзлоты и геокриологического мониторинга, включая теплоизоляцию грунтов, термоскважины и контроль теплового воздействия на вечно мёрзлое основание. Без неё любое сооружение на вечномёрзлых грунтах теряет устойчивость и разрушается за 5–10 лет. Именно совокупность этих решений делает мосты Крайнего Севера уникальными инженерными сооружениями, не имеющими прямых аналогов в умеренном климате.

ГЛАВА 5. ЭКСПЛУАТАЦИЯ, ЭКОЛОГИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

5.1. Изменение климата — новая угроза

Потепление в Арктике идёт в 2–3 раза быстрее, чем в среднем на планете. Для мостов это означает:

деградацию мерзлота под опорами: несущая способность свай, рассчитанная на мёрзлый грунт, снижается; зафиксированы случаи деформаций зданий и опор в Якутске, Норильске, на посёлках трассы «Колыма»;

рост паводков и ледоходов: ледоход стал более мощным и непредсказуемым, увеличиваются уровни заторов;

ответ инженеров: Программы технического переоснащения и стабилизации грунтов предусматривают установку дополнительных термосвай под существующие опоры, инъекционное промораживание грунтов и перестройку систем мониторинга в автоматические с передачей данных от температурных датчиков в режиме реального времени.

5.2. Экологические требования

Северные экосистемы крайне уязвимы: восстанавливается тундра после нарушения десятки лет. Поэтому при строительстве применяют:

- эстакадные переходы вместо насыпей (сохранение путей миграции оленей и стока воды);
- запрет зимников по льду рек в местах нереста;
- сбор и вывоз всех строительных отходов («принцип нулевого следа»);
- переход судов и техники на малотоксичные топлива.

5.3. Перспективные проекты

1. Ленский мост (Якутск) — ввод в 2028–2029 гг., символ перехода от «зимников» к круглогодичной транспортной независимости Якутии.

2. Северный широтный ход («Северный широт») — железная дорога Салехард — Надым — Новый Уренгой, включающая крупные мосты через Обь и Надым; после ввода замкнёт транспортное кольцо Западной Сибири.

3. Мост через Берингов пролив — концептуальный проект соединения Чукотки и Аляски (длина перехода с дамбой — около 80 км). Пока остаётся фантастикой из-за стоимости и отсутствия дорог-подходов, но инженерные наработки северного мостостроения делают его технически обсуждаемым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленная во введении гипотеза подтвердилась: мосты Крайнего Севера — это особый класс инженерных сооружений, спроектированных «от климата».

По итогам работы можно сформулировать следующие выводы:

1. Главный враг северного моста — не мороз сам по себе, а многолетняя мерзлота и её нестабильность, а также лёд — в виде ледохода, наледей и заторов.
2. Ключевое изобретение северного мостостроения — принцип сохранения мерзлоты и термосваи, позволившие строить надёжные опоры в грунтах, которые при обычном подходе «плыли» бы под нагрузкой.
3. Северные мосты строятся из специальных материалов (бетон F300–F500, сталь северного исполнения) и в особые технологические окна — зимой.
4. Северный мост дороже аналога в средней полосе в 2,5–4 раза, но альтернативы ему нет: без мостов север России транспортно «отрезается» на большую часть года.
5. Будущее северного мостостроения определяется климатическим вызовом: инженерам приходится защищать сооружения не только от нынешнего климата, но и от его изменений.

Северный мост — это памятник человеческой настойчивости: конструкция, в которой каждый болт, каждая свая и каждая тонна бетона брошены в борьбу с самым суровым климатом планеты. И эта борьба продолжается — каждый полярный день и каждую полярную ночь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы мерзлотного мостостроения / под ред. Г. П. Поспелова. — Новосибирск: Наука, 1985.
2. Ершов Э. Д. Общая геокриология. — М.: Изд-во МГУ, 2002.
3. СНиП 2.05.03-84*. Мосты и трубы. — М.: Стройиздат.
4. ГОСТ 33178-2014. Дорожные мосты. Расчётные нагрузки.
5. Кузьмин П. П. Наледи на реках Севера. — Якутск: Кн. изд-во, 1976.
6. Автодорога «Колыма»: история строительства. — Магадан: Охотник, 2010.
7. Официальные материалы проекта строительства моста через реку Лену у г. Якутска (Росавтодор, 2020–2024).
8. Научные статьи Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН по термостабилизации грунтов.
9. Материалы журнала «Мосты и тоннели» по мостам Крайнего Севера.