

«Зеленые» города в Арктике: от концепции к технологическим решениям¹

М.Н. Кичерова, И.В. Игнатова, И.А. Разумкова

УДК 332.1

DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2025-2-179-196

Аннотация. На основе экспертных интервью, лабораторных испытаний, мультидисциплинарного проектирования разработана концептуальная модель «зеленого» арктического города, интегрирующая ключевые положения концепций «устойчивый город», «экогород» и «умный город». Для создания его жилых модулей предложен природный биоразлагаемый полимер хитин/хитозан и три инновационных технологических решения на его основе: строительные блоки, 3D-печать и сэндвич-панели. В лабораторных условиях доказаны устойчивость хитозана к экстремально низким температурам (–196°C) и биобезопасная утилизация. Представлены экономические расчеты, раскрыты преимущества и ограничения данных технологических решений.

Ключевые слова: зеленая экономика; Арктический регион; зеленый арктический город; хитозан; устойчивость; инновационные технологии

Введение

Развитие Арктической зоны РФ является важной стратегической задачей, в ходе решения которой большое значение придается обеспечению экологической устойчивости, использованию технологий замкнутого цикла, повышению качества жизни населения². Современные концепции предлагают рассматривать арктические города как особые биосоциальные институты [Пилясов & Путилова, 2020. № 5], в связи с чем актуализируется запрос на комплексные междисциплинарные исследования экономических, социотехнических и биосоциальных процессов, происходящих в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) в контексте развития высокотехнологичной «зеленой» экономики [Экономика..., 2020]. Соответственно, растет значимость нестандартных инновационных

¹ Авторы выражают благодарность коллегам, принявшим участие в экспертных интервью и проектно-аналитической сессии за интеллектуальный вклад в составе мультидисциплинарной команды при обсуждении вопросов проектирования «зеленых» арктических городов: Т.В. Лузиной, к.э.н., зав. кафедрой таможенного дела Тюменского госуниверситета; Д.И. Бояринцеву, к.б.н., доценту кафедры биологической химии, руководителю лаборатории хроматографии и элементного анализа Тюменского государственного медицинского университета; Л.И. Максимову, Тюменский индустриальный университет; П.В. Филипенко, кафедра строительных материалов, лаборатория строительных материалов, Тюменский индустриальный университет.

² Стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечение национальной безопасности до 2035 года. Утв. Указом Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645.

решений для организации производства высокотехнологичных изделий и материалов для нужд арктических городов, имеющих высокий потенциал в экономической, экологической и социальной сфере.

В настоящей работе рассматриваются концептуальные основы проектирования «зеленых» арктических городов и некоторые из предлагаемых инновационных технологических решений для их строительства.

«Зеленый» арктический город: понятие, элементы, индикаторы развития

Концепция «зеленого» города в последние годы является одной из наиболее популярных среди градостроителей, наряду с концепциями «умный» город и «устойчивый» город. Одним из первых в научной среде тему экологической составляющей городов поднял В.И. Вернадский, выдвинувший концепцию ноосферы [Вернадский, 1991]. Систематизация современных подходов к определению сущности «зеленых городов» представлена в работе О.А. Усачевой [Усачева, 2010]. Но специфика их арктического исполнения там не рассматривается. Анализируя урбанистические процессы в российских северных широтах, большинство авторов придерживаются экономико-географических подходов. В частности, установлено, что в последние годы в АЗРФ вместо развития городов «вширь» идет движение «вглубь» – на смену постоянным поселениям с развитыми дорогами, линиями электропередач приходят временные поселки вахтового типа [Пилясов & Путилова, 2020. № 38]. Представляет интерес концепция, позиционирующая арктические города как особый системно обособленный биосоциальный институт, описываемый в рамках экономической ВВФ-модели (В - внешние связи, В – внутренние связи, Ф – функционирование) [Пилясов & Путилова, 2020. № 5].

С точки зрения дизайнера северных городов С.М. Прокопова предлагает концепцию эмоционально «теплого» города [Prokорова, 2021], предусматривающую не только физический комфорт, но и эмоциональную составляющую. В силу исторических причин в Российской Арктике города повторяют внешний вид и инфраструктуру города в умеренных широтах. Однако, по мнению автора, неадаптированная среда усиливает эмоциональную «холодность» арктических городов.

Ряд авторов в рамках концепции «устойчивого развития» предлагают в ходе стратегического планирования учитывать изменения климата [Bobylev et al., 2021], однако в большинстве случаев эти предложения носят несистемный характер. М.Д. Кенну предложил для Арктической зоны концепцию «городское планирование как форма жизнестойкости» [Kenney, 2017] (в России ее развивает Б.В. Никитин [Никитин, 2023]), в которой изменение климата рассматривается как экономическая возможность. Изменения в землепользовании и структуре растительного покрова в процессе урбанизации Арктики анализируются в работе французских коллег [Ouring et al., 2019]. Авторы обращают особое внимание на процессы таяния вечной мерзлоты, что необходимо учитывать при градостроительстве.

Есть большой пласт работ, в которых исследуются отдельные аспекты развития арктических городов России в рамках достижения устойчивости: транспортные условия [Danilina et al., 2022]; внедрение интеллектуальных технологий в энергетике на основе ВИЭ в северных широтах [Tsurkan et al., 2017]. Дана оценка показателей стандарта ISO 37120 применительно к арктическим городам [Berman & Orttung, 2020]; проведен сравнительный анализ индикаторов городского планирования по стандарту ISO 37120 для 46 арктических городов европейских, североамериканских стран и России, демонстрирующий отставание российских городов по ряду показателей устойчивого развития [Di Napoli & Jill, 2020].

Для реализации экологических решений в градостроении Европейский банк реконструкции и развития рекомендует использовать «рамочную концепцию зеленого города с учетом нагрузки-состояния-реакции»³. Ключевым фактором в ней выступает деятельность человека, оказывающая нагрузку на городскую среду и экосистему территории. В материалах ЕБРР содержится методика оценки уровня экологической нагрузки.

Обзор литературы показал, что современные исследования, подчеркивая взаимосвязь экономики, экологии и социума, единого определения «зеленый арктический город» не предлагают. Обобщенно можно заключить, что концептуализирующая его основа – природа, а отличительными чертами выступают более высокие (относительно действующих норм) экологические показатели, эффективное использование ресурсов, смягчение экологических рисков при максимизации экономических и социальных выгод⁴. Весьма близкой является концепция «устойчивый город», предполагающая значительный уровень достижения муниципалитетом целей устойчивого развития [Косарева и др., 2022]. С развитием цифровых технологий значимость приобретает также концепция «умный город» [Сизов & Медведева, 2019], объединяющая более 10 параметров⁵.

Некоторые исследователи отмечают необходимость соединения лучших элементов данных концепций для «обеспечения идеальной формы построения современных городов, сбалансированного и устойчивого подхода к экономическому, социальному, экологическому и институциональному развитию» [Карагулян & Батырева, 2020]. Арктика, как активно модернизируемая территория, обладающая особым правовым, природоохранным статусом, представляется идеальной платформой для развития технологического предпринимательства, тестирования новейших технологий строительства и производства энергии и пр. [Gassiy & Stoikov, 2020].

³ Методология программы «Зеленые города» // Европейский банк реконструкции и развития, 2016. 120 с. (С. 4).

⁴ Там же.

⁵ Приказ Минстрой России «Об организации исполнения ведомственного проекта Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ по цифровизации городского хозяйства «Умный город»» от 11 мая 2022 года № 357.

Высокая значимость всех уровней городского пространства при создании арктических городов будущего (биотическое, социальное, экономическое, технологическое) актуализирует необходимость поиска нестандартных технологических решений как в процессе непосредственно проектных работ, так и при выборе новых строительных материалов.

Методология и методы исследования

В данной работе использованы качественные методы сбора и анализа данных: серия экспертных интервью, мультидисциплинарное проектирование и лабораторные испытания. Экспертами выступили специалисты в области социальной урбанистики, социально-экономического развития северных территорий, градостроительства и экологии. При формировании выборки учитывались принцип мультидисциплинарности, уровень компетенций, дискурсивность, масштаб принятия управленческих решений⁶. Тексты 19 экспертных интервью опубликованы в открытом доступе в сети Интернет с 2019 по 2022 гг.

Мультидисциплинарное проектирование реализовано участниками проектно-аналитической сессии, прошедшей в Тюмени в 2022 г. В команде работали представители трех вузов (в том числе авторы статьи): Тюменского госуниверситета, Тюменского индустриального университета, Тюменского государственного медицинского университета, представляющих разные научные направления: экономика, социология, материаловедение, строительные материалы, фармакология, органическая биологическая химия, хроматография. Перед командой была поставлена задача поиска нестандартного, инновационного решения для создания «зеленого» арктического города, включая функциональные материалы и конструкции на их основе, биоразлагаемые полимеры, органические композиты. Выстраивая этапность работы, мы шли от общего к частному.

Формирование рабочей концепции «зеленого» арктического города

На первом этапе нашего исследования в результате экспертного опроса происходил поиск концептуальных оснований «зеленого» арктического города. Для этого были проанализированы проблемы проектирования городов Арктического региона, находящиеся в фокусе экспертов. Методом кластеризации мнений выделены ключевые сферы проектирования – экологическая, технологическая, экономическая и социальная, в каждой обозначены проблемные зоны, сформулированы возможные решения (табл. 1).

⁶ Выборочная совокупность экспертов (Приложение 1), доступно по ссылке https://disk.yandex.ru/i/A0nVZ_crLd03nw

Таблица 1. Проблемные зоны проектирования арктических городов

Сфера проектирования	Проблемная зона/ключевые вопросы	Возможное решение
Окружающая среда (экология)	Сложности адаптации человека к окружающей среде	Комплексные решения, влияющие на физическое, психоэмоциональное состояние человека: дизайн-код на спокойных цветах арктического пейзажа, «эмоционально теплые» города, подготовка специалистов «на месте» из числа местных жителей
	Международные геополитические риски	Разработка таксономии международного правового поля, стандартов «зеленых» проектов в соответствии с мировыми критериями оценки биоёмкости и экологического следа
Технологии	Применение строительных материалов, не удовлетворяющих экостандартам	Разработка и применение инновационных биоразлагаемых полимеров, математическое моделирование цифровых двойников объектов, в том числе моделирование растепления грунта
Экономика	Низкий уровень экологичности бизнеса	Развитие ESG-подхода при формировании бизнес-стратегий
	Отсутствие отечественных инструментов финансирования	Использование «зеленых» финансовых инструментов, создание национального экологического банка
	Дефицит альтернативных проектов устойчивого развития в АЗРФ	Гранты для АЗРФ, новые форматы мультидисциплинарного проектирования: аналитические сессии, тематические хакатоны
	Сезонность (транспортная, продовольственная и др.)	Переход к мобильным «зеленым» городам, пульсирующим экоселениям на вахтовых принципах, стимулирующих сервисное предпринимательство
	Отработанные месторождения	Использование пространства месторождений для современных форм туризма, легализации «вольного приноса» в интересах местных жителей
Социальная сфера	Плохая доступность источников энергии	Переход на альтернативные, комбинированные источники энергии
	Стихийные свалки	Применение биотехнологий утилизации «на месте»
	Запрос на новые профессиональные компетенции	Образовательные программы в гибридном формате, создание мультидисциплинарных команд
	Удаленность районов АЗРФ, высокие транспортные издержки	Развитие арктического авиасообщения, транспортной инфраструктуры на основе беспилотного бездорожного наземного транспорта на аэроподушках
	Необходимость качественной медицинской помощи	Развитие цифровой телемедицины, многопрофильность персонала
	Потребность диверсификации экономики, стратегии развития моногородов	Переход на «зеленые» технологические цепочки, смещение фокуса на «знаниювые» города, новое целевое назначение, экотуризм
	Проблема теплоснабжения	Индивидуальный подход к городам на основе типовых решений для эргономичного теплоснабжения

Источник. Интервью экспертов (N=19) представлены в открытом доступе (Приложение 2), доступны по ссылке: https://disk.yandex.ru/i/A0nVZ_crLd03nw

Как видно из таблицы, проектирование и развитие современных арктических городов сопровождается комплексом проблем междисциплинарного характера, связано с поиском новых нестандартных подходов. Полученные результаты расширяют понимание факторов, влияющих на проектные решения при создании арктических городов. Приоритетными становятся экологическая устойчивость, развитие экономики замкнутого цикла. Для разработки таких подходов требуется мультидисциплинарная команда, способная удерживать в фокусе внимания все уровни проектирования.

Концептуальное моделирование

На втором этапе работы, опираясь на результаты анализа научных источников, с учетом полученных экспертных оценок, мы разработали концептуальную модель «зеленого» арктического города. В основе последней лежит симбиоз «зеленых» технологий, современных цифровых технологий «умного города» и принципов устойчивого развития (рис. 1).



Рис. 1. Концепция «зеленый» арктический город

По итогам мозгового штурма в ходе мультидисциплинарного проектирования разработаны дополнительные принципы и определена концептуальная архитектура модели «зеленый» арктический город.

1. Устойчивость модели обеспечивается открытостью, жизнестойкостью, безопасностью⁷, при этом арктический город может быть «пульсирующим» (периодически испытывающим рост и сокращение численности населения, например, в зависимости от сезона), мобильным (быстро возводимым, ориентированным на полное биоразложение, чистую утилизацию после эксплуатации).

⁷ См.: Арктика как уникальная область международного сотрудничества: перспективы и возможности. Аналитический отчет ВШЭ <https://as.arctic-russia.ru/upload/docs/2023/think-arctic-report-spief-rus.pdf>

2. Экологичность проявляется в максимальной встроенности в природную экосистему АЗРФ и предполагает сохранение биоразнообразия, минимизацию ресурсоемкости, использование источников энергии, минимально воздействующих на окружающую среду, биобезопасных материалов.

3. Технологичность выражается в использовании интеллектуального управления, инновационных решений для экономики замкнутого цикла.

Концепция «зеленого» арктического города учитывает высокую чувствительность экосистемы к экстремальным внешним факторам: экологическим (суровый климат, высокое ультрафиолетовое излучение, полярная ночь, вечная мерзлота и др.), социальным (низкая плотность населения, специфика демографической структуры, высокая доля вахтовиков, неравномерность хозяйственного и инфраструктурного освоения территории), экономическим (повышенные издержки на обеспечение жизнедеятельности).

Каждый предложенный элемент модели может быть измерен с помощью системы показателей, например, для оценки устойчивости может быть использована адаптированная аналитическая методика целей устойчивого развития [Левкина и др., 2023].

Особые условия Арктического региона требуют более тщательного проектирования всех элементов и аспектов городского пространства: биотических (включая человека, все живые организмы, бактерии и др.), социальных, экономических и технологических. В частности, при разработке концепции подчеркивалась важность использования в строительстве биоразлагаемых полимеров и технологий чистой утилизации на месте, что стало объектом проектирования далее.

Этап технологического проектирования

На данном этапе происходил поиск природных биоразлагаемых материалов для строительства жилых модулей круглогодичного проживания в АЗРФ, разработку конструктивных решений их возведения и утилизации на месте экологически чистым способом. Рассматривались модули для возведения поселков вахтового типа, научно-исследовательских станций, туристических объектов. Мы исходили из того, что типовой модуль будет одноэтажный, индивидуальный, его размер 6х3х2,6 м, при необходимости может соединяться с другими модулями и выполнять дополнительный функционал (прачечная, гараж, общественное помещение), срок эксплуатации до пяти лет с последующей утилизацией на месте – именно эти условия были заданы в качестве вводных при проектировании.

Для изготовления этих модулей предлагается использовать природный материал хитозан. Это полисахарид, полученный путем деацетилирования хитина, являющегося основным компонентом экзоскелета ракообразных водных животных (например, панцири крабов и креветок) [Li, 1992]. Хитин широко распространен в природе и не токсичен [Mourya & Inamdar, 2008], является естественным регенерируемым ресурсом, объемы которого можно увеличить за счет искусственного культивирования. В настоящее время большая часть хитозана, находящегося в практическом и коммерческом использовании, поступает из производства

деацетилированного хитина с панцирями крабов, креветок и криля (основной побочный продукт переработки моллюсков), являющихся наиболее доступными источниками хитозана [Kou et al., 2021]. Он используется в сельском хозяйстве, пищевой промышленности [Сулейманова и др., 2020] и по своим характеристикам является уникальным строительным материалом: чешуйки одновременно прочные, гибкие и достаточно легкие, обладают низкой теплопроводностью.

Исследования свойств хитозана показывают максимальное соответствие требованиям климата, влажности, грибостойкости [Мазаник, 2019]. На его основе возможно создание композитов и биоразлагаемых полимеров с полной безопасной утилизацией на месте [Shamshina et al., 2020]. Несмотря на то, что хитозан давно известен как элемент композитных материалов⁸, было решено протестировать его свойства в лабораторных условиях с точки зрения ключевых для арктического строительства свойств. В первую очередь важны устойчивость к экстремально низким температурам, многократному переходу температуры воздуха «через ноль» (циклы заморозания-оттаивания), экстремальным ветровым и снеговым нагрузкам, дополнительно тестировалась способность материала к биоразложению.

Лабораторные исследования хитозана

С целью определить степень и время разложения хитозана биобезопасными веществами проведены тестовые исследования двух коммерческих продуктов: хитозан производства Orison Chemicals Limited (Китай) и хитозан форте производства ООО «Квадрат-С» (Россия).

На первом этапе лабораторного исследования изучено взаимодействие хитозана с уксусной кислотой разной концентрации. Установлено, что скорость растворения китайского хитозана зависит от концентрации уксусной кислоты и при эквимолярных соотношениях составляет: 20 часов при концентрации 70%; 120 часов – 7% и 340 часов – 1,5%. Взаимодействие российского хитозана форте с уксусной кислотой разной концентрации привело к формированию полимера, плохо растворимого в воде. Разный характер взаимодействия исследуемых объектов говорит о наличии примесных фаз.

Рентгенофазовым методом анализа на дифрактометре TD-3700 X-ray изучена кристаллическая структура исходных объектов (рис. 2).

В хитозане китайского производства обнаружено присутствие примесной фазы минерала арагонита CaCO_3 (карточка в базе PDF03–0405), который входит в состав перламутрового слоя раковин многих видов моллюсков. В хитозане форте (Россия) основным компонентом является минерал брусит с химической формулой $\text{Ca}(\text{OH})\text{PO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (PDF 09–0077), содержание которого в образце превышает 70%. Наличие брусита в исследуемом объекте привело к полимеризации образца за счет фосфатных групп и делает его неприменимым к дальнейшим испытаниям.

⁸ См., например: Рубина М.С. Металлосодержащие композиты на основе хитозана и целлюлозы: новые методы получения, структура и возможности применения. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. хим. н. М., 2020. URL: <https://ineos.ac.ru/files/scisect/rubina/diss.pdf>

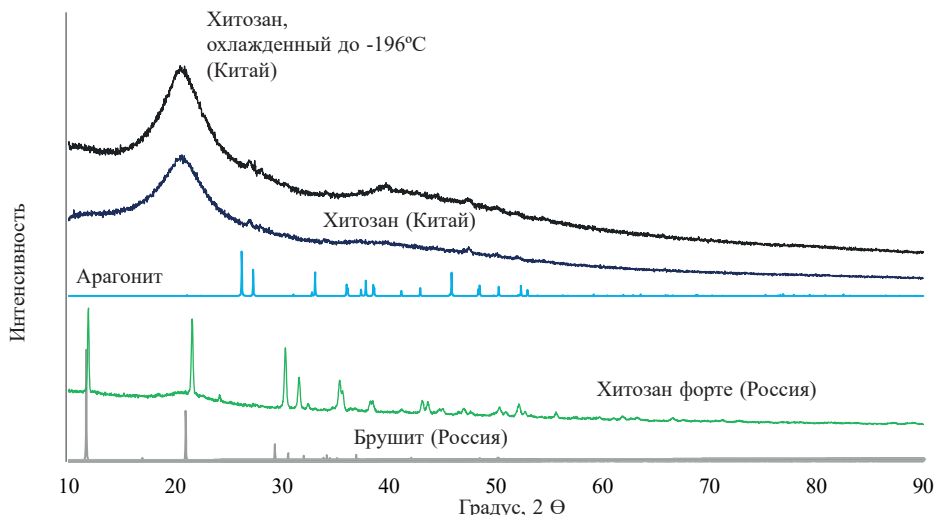


Рис. 2. Результаты РФА образцов хитозана производства России и Китая

На втором этапе лабораторного исследования изучено влияние пониженных температур на хитозан китайского производства. Установлено, что при воздействии экстремально низких температур (-196°C), которые достигались действием жидкого азота на порошок в течение 20 минут, кристаллическая структура и реакционные способности не меняются. На рисунке 2 верхней линией обозначен хитозан после охлаждения жидким азотом. Как видно из дифрактограммы, существенных отличий не наблюдается. Произошедшее укрупнение кристаллитов при закалке отразилось на интенсивности рефлексов как основной, так и примесной фазы. После экстремального охлаждения образец подвергся растворению при комнатной температуре в уксусной кислоте концентрацией 70% и 7%. Скорость растворения после заморозки хитозана практически не изменилась (20 и 125 часов соответственно). Кроме этого, изучено растворение хитозана при 0°C (табл. 2). Увеличение времени растворения при понижении температуры согласуется с общеизвестными принципами.

Таблица 2. **Время растворения хитозана в зависимости от концентрации уксусной кислоты и температуры реакции**

Показатель	25°C		0°C	
	70	7	70	7
Время растворения хитозана, час				
Товарный хитозан	20	120	80	505
Хитозан охлажденный до -196°C	20	125	85	510

Источник. Экспериментальные данные, полученные авторами.

Таким образом, в лабораторных условиях доказана возможность стопроцентной утилизации хитозана за короткое время биобезопасным способом, поскольку использование уксусной кислоты полностью согласуется с принципом CHON^9 и не приведет к выбросу в атмосферу и почву опасных и агрессивных продуктов [Fuller et al., 2021], а также устойчивость к экстремально низким температурам, что полностью соответствует требованиям, предъявляемым к строительным материалам для использования в Арктике.

Технологические решения

После тестовых испытаний, в рамках настоящего исследования авторами предложены три варианта технологических решений на основе хитозана.

Строительные блоки «эко-лего». Создание строительных блоков в виде кубиков лего позволит быстро собирать стены зданий и сооружений. Прочность будет обеспечиваться главным материалом хитозаном и комбинацией полимеров на основе органических кислот. Теплоизоляцией может служить опил, стружка или щепа, которая будет наполнять полые хитозановые конструкции. Взаимную фиксацию блоков гарантирует декстран/казеин. Размер блоков может варьироваться, максимальный – 900x600x350 мм.

Преимуществом решения является возможность создания блоков «эко-лего» за пределами трудодефицитной северной зоны, кроме того, монтировать конструкции можно с помощью роботизированной сборки, что позволяет экономить не только трудовые ресурсы, силу, но и время строительства. В качестве ограничения отметим необходимость «клея» для прочного соединения блоков, иначе возникнут «мостики холода».

3D-печать зданий из природных полимеров на основе хитозана. В России имеются строительные 3D-принтеры, позволяющие в течение 24 часов возвести здание на строительной площадке¹⁰. Полимерная суспензия из хитозана, по нашему мнению, может быть использована в качестве материала для строительной 3D-печати. Хитозан обеспечит прочность стен, но им дополнительно потребуется теплоизоляция. Например, на основе эковаты или гранул полилактида. Преимуществом технологии видится техническая возможность выполнения модулей любой формы и размера. Главные ограничения – необходимость специального оборудования (строительный 3D-принтер, установка которого требует подготовленной площадки), квалифицированный персонал для работы на нем. Кроме того, технология действует только при положительной температуре воздуха, что в условиях АЗРФ сильно ограничивает время ее использования [Симакова и др., 2021].

⁹ CHON С – углерод, Н – водород, О – кислород и N – азот – это группа химических элементов, из которых состоит живое вещество.

¹⁰ Красильникова Ю. Иркутский старт-ап за сутки напечатал дом, потратив 600 тысяч рублей. URL: <https://hightech.fm/2017/03/02/stupino> (дата обращения: 27.07.2023)

«Сэндвич-панели» из хитозана и стабилизированного мха. Наконец, предлагается технология изготовления строительных панелей, состоящих из хитозана (наружный слой), в качестве теплоизоляции – стружка, щепы, эковаты или стабилизированный мох (внутренний слой). Склеивание панели осуществляется декстраном/казеином.

Мультидисциплинарной командой данной работы предложен оригинальный метод сбора и подготовки мха для теплоизоляции панелей: срезание полос с укладкой их в рулоны (по типу рулонных газонов, но без слоя гумуса и довольно тонким слоем, чтобы мох имел возможность восстановления). Культивирование и автоматизированная заготовка мха могут быть обеспечены в условиях теплиц и гидропонных ферм в непосредственной близости к заводам по изготовлению сэндвич-панелей (выращивание и сбор мха в качестве строительного материала могут стать одним из видов «зеленой экономики» в АЗРФ, создать новые рабочие места в строительной отрасли).

Необходимую для стабилизации мха вакуумную сушилку при $t\ 350^{\circ}\text{C}$ предлагается организовать совместно с подачей испарений хитозана: пропитка его парами обеспечит устойчивость мха к природным болезням и вредителям. Преимущество этого решения в том, что мох в обилии произрастает в отдельных регионах Арктики и северных территорий и полностью разлагается местной биотой; наличие сырья позволит быстро возводить жилые модули. Ограничения данной технологии связаны с необходимостью специального оборудования, экологического контроля сырьевой базы.

Для сравнительной оценки предложенных решений произведены расчеты некоторых параметров и себестоимости возведения жилого модуля размером $6\times 3\times 2,6$ м (табл. 3).

Таблица 3. Сравнительные данные арктических жилых модулей из хитозана

Технологическое решение для строительства жилых модулей на основе хитозана	Теплопроводность	Биоразложение на 100% (период, лет)	Масса, кг	Стоимость модуля размером $6\times 3\times 2,6$ м, млн руб.
Строительные блоки из хитозана «эко-лего» $900\times 600\times 350$	0,065	5+ лет	До 45	2,8
3D-печать зданий из природных полимеров на основе хитозана $40-120-40$	0,045	4–5 лет	-	2,1–3,5
«Сэндвич-панели» из хитозана с разными наполнителями: опил/стружка/щепы $2600\times 900\times 120$; стабилизированный мох $2600\times 900\times 120$	0,061	2–3 года	30	2,2–2,5
	0,054	1–2 года	18–22,5	1,6–2,0

Источник. Расчеты проведены на основе СНиП и справочной литературы: СНиП II-3–79 Строительная теплотехника (с изм. №4) Постановление Госстроя СССР от 14.03.1979 № 28 <https://hvac-school.ru/upload/files/mont/II-3-79.pdf>, Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности. ГОСТ 7076–87 (СТ СЭВ 4923–84) <https://files.stroyinf.ru/Data1/3/3146/index.htm>. Расчет стоимости произведен в ценах 2023 г.

Дома из хитозана экологичны и безопасны для человека и окружающей среды. Они могут варьироваться по стоимости и технологии изготовления. Все описанные технологии отличаются высокой скоростью строительства и возможностью безопасной утилизации с регулируемыми сроками. Для организации такой утилизации на месте разработан специальный «компостерный бокс», подходящий для всех трех решений. Каркас компостера выполнен из полилактидов, активные вещества – бактериальные культуры нескольких типов: отдельно для содержимого и каркаса компостерного бокса, которые заключены в капсулы замедленного высвобождения. Набор капсул обеспечивает полную биоутилизацию содержимого и каркаса самого компостера на завершающем этапе.

По предварительным расчетам, строительство жилых модулей в Арктическом регионе из природных полимеров на основе хитозана выглядит довольно затратным (это типично для подавляющего большинства инновационных решений, тем более, если они находятся на стадии опытного производства). В настоящее время в Российской Арктике используются быстровозводимые жилые модули из металла. Однако они тоже отличаются высокой себестоимостью и не удовлетворяют экологическим требованиям по утилизации¹¹, а потому дальнейшее применение металлоконструкций как основы жилых модулей для освоения и исследования удаленных районов Арктики становится дискуссионным, тем более, что цены на металл не растут¹².

При расчете экономической целесообразности строительства жилых модулей по одной из предложенных инновационных технологий необходимо учитывать этап производства хитозана, создания строительных полимеров на его основе, этап строительства, эксплуатации и утилизации. С экономической точки зрения данное решение находится на этапе TRL-4/5 цикла технологического предпринимательства. Лабораторные испытания хитозана и новые технологические решения подтвердили целесообразность дальнейших разработок, в том числе переход к уровню TRL-6, опытному производству образцов, разработке производственных технологий составных частей, изготовлению элементов конструкций.

Обсуждение результатов и заключение

Мультидисциплинарный подход к проектированию позволил выделить проблемные зоны в создании арктических городов, разработать авторскую концепцию «зеленого» арктического города и предложить ряд инновационных решений для строительства городов будущего.

¹¹ Строительство быстровозводимых зданий из металлоконструкций. URL: <https://ekb.barsprom.pf/bystrovvozvodimye-zdaniya> (дата обращения: 27.12.2023).

¹² Аналог международной космической станции в Арктике подорожал в два с половиной раза. URL: <https://www.rbc.ru/business/26/06/2022/62b5b2829a7947a15d6b0068?yclid=lk8cph901y101960896> (дата обращения: 27.12.2023).

В частности, для создания жилых модулей в Арктическом регионе предложен новый строительный материал – хитозан и три технологических решения на его основе: строительные блоки «эко-лего», 3D-печать, сэндвич-панели. Одним из вариантов теплоизоляции может служить природный мох, обработанный парами хитозана. Лабораторные испытания подтвердили устойчивость промышленного хитозана к экстремально низким температурам и возможность его стопроцентной утилизации за короткое время биобезопасным способом, что делает его пригодным для использования в «зеленых» арктических городах.

Полученные результаты носят инновационный характер в социально-экономическом и технологическом аспектах, строительство зданий из природных полимеров на основе хитозана может дать импульс развитию отечественных отраслей «зеленой» экономики.

Отметим, что возможности применения 3D-печати в строительстве активно исследуются за рубежом [Sultan, & Mathew, 2019; Sanandiya et al., 2018], в том числе предлагаются решения для проектирования фундаментов зданий на вечной мерзлоте в районах Арктики [Wang et al., 2023]. Однако строительным материалом в этих проектах выступает бетон, не отвечающий требованиям экологической утилизации.

В перспективе требуются детальные экономические расчеты организации производства и логистики, опираясь на имеющиеся научные обоснования промышленной добычи хитозана [Безродных и др., 2010] в качестве сырья для производства строительных материалов.

Учитывая экономическую специализацию регионов¹³, применение предложенных материалов и технологий представляется наиболее целесообразным в вахтовых поселениях, а также в стационарных поселках, населенных преимущественно представителями малых коренных народов, (например, в Якутии). Технология «сэндвич-панелей» может быть эффективно использована в городах Югры, располагающих как рабочей силой, так и ресурсами мха, и при этом испытывающих жилищный голод. Возможно, именно здесь удастся решить проблему нехватки жилья за счет малоэтажного строительства с использованием новых материалов.

Дальнейшие изыскания могут быть обращены на разработку технологических регламентов и дополнительные тестирования: изучение скорости и кинетики растворения хитозана, процесса старения материала под влиянием внешних факторов, теплопроводности строительных блоков из хитозана, оценку циклической нагрузки.

¹³ Атлас экономической специализации регионов России / В.Л. Абашкин, Л.М. Гохберг, Я.Ю. Ефери́н и др.; под ред. Л.М. Гохберга, Е.С. Куценко; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2021. 264 с URL: <https://www.hse.ru/mirror/pubs/share/459686396.pdf> (дата обращения: 09.04.2024).

Литература/ References

- Безродных Е.А., Тихонов В.Е., Lopez-Llorca L.V. Выделение хитина из отходов морепродуктов и получение из него хитозана // Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных ресурсов. 2010. № 2. С. 9–12.
- Bezrodnykh, E.A., Tikhonov, V.E., Lopez-Llorca, L.V. (2010). Isolation of chitin from seafood waste and production of chitosan from it. *Rybprom: Technologies and Equipment for Processing Water Resources*. No. 2. Pp. 9–12. (In Russ.).
- Вернадский В.И. Несколько слов о ноосфере. Научная мысль как планетное явление. М.: Наука, 1991. С. 235–244. URL: <http://vernadsky.lib.ru/e-texts/archive/noos.html> (дата обращения: 20.07.2023).
- Vernadskii, V.I. (1991). *A few words about the noosphere. Scientific thought as a planetary phenomenon*. Moscow. Nauka Publ. Pp. 235–244. (In Russ.). Available at: <http://vernadsky.lib.ru/e-texts/archive/noos.html> (accessed: 20.07.2023).
- Карагулян Е.А., Батырева М.В. Умный устойчивый город: опыт стран Северной Европы // Вестник Тюменского государственного университета. Социально-экономические исследования. 2020. № 6, 2 (22). С. 37–53.
- Karagulyan, E.A., Batyreva, M.V. (2020). Smart Sustainable City: the experience of the Nordic countries. *Bulletin of the Tyumen State University. Socio-Economic Research*. No. 6, 2 (22). Pp. 37–53. (In Russ.).
- Косарева Н.Б., Пузанов А.С., Попов Р.А., Алов И.Н., Полиди Т.Д., Гершович А.Я., Генцлер И.В., Лыкова Т.Б. «Зеленая повестка» устойчивого развития городов. М.: Фонд «Институт экономики города», 2022. 371р. URL: https://urbaneconomics.ru/sites/default/files/zelenaya_povestka_06.12.2022.pdf?ysclid=1h3iqww9v4280210436 (дата обращения: 20.01.2024).
- Kosareva, N.B., Puzanov, A.S., Popov, R.A., Alov, I.N., Polidi, T.D., Gershovich, A.Ya., Genzler, I.V., Lykova, T.B. (2022). “Green Agenda” of Sustainable Urban Development, Moscow: Foundation “Institute of Urban Economics”, 371 p. (In Russ.). Available at: https://urbaneconomics.ru/sites/default/files/zelenaya_povestka_06.12.2022.pdf?ysclid=1h3iqww9v4280210436 (дата обращения: 20.01.2024).
- Лёвкина А.О., Деттер Г.Ф., Гладун Е.Ф., Заболотникова М.В. Проблемы и перспективы устойчивого развития арктических локальных экономик: пример Шурышкарского района // Арктика и Север. 2023. № 51. С. 89–115. DOI: 10.37482/issn2221–2698.2023.51.89
- Lyovkina, A.O., Detter, G.F., Gladun, E.F., Zabolotnikova, M.V. (2023). Problems and Prospects for Sustainable Development of the Arctic Local Economies: The Case of the Shuryshkarskiy District. *Arctic and North*. No. 51. Pp. 89–115. (In Russ.). DOI: 10.37482/issn2221–2698.2023.51.89
- Мазаник Н.В. Опыт применения хитозана для защиты древесины от грибковых повреждений // Труды БГТУ. 2019. № 1, 1. С. 158–159.
- Mazanik, N.V. (2019). Experience in the use of chitosan to protect wood from fungal damage. *Proceedings of BSTU*. No.1, 1. Pp. 158–159. (In Russ.).
- Никитин Б.В. Оценка потенциала жизнестойкости городов российской Арктики: фактор экономической специализации. *Арктика: экология и экономика*. 2023. № 13 (1). С. 106–118. DOI: 10.25283/2223–4594–2023–1–106–118

- Nikitin, B.V. (2023). Assessment of the resilience potential of Russian Arctic cities: the factor of economic specialization. *Arctic: Ecology and Economics*. No. 13(1). Pp. 106–118. (In Russ.). DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-106-118
- Пилясов А.Н., Путилова Е.С. Новые проекты освоения Российской Арктики: пространство значимо! // Арктика и Север. 2020. № 38. С. 20–42. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.38.21
- Pilyasov, A.N., Putilova, E.S. (2020). New projects for the development of the Russian Arctic: space is significant! *The Arctic and the North*. No. 38. Pp. 20–42. (In Russ.). DOI: 10.37482/issn2221-2698.2020.38.21
- Пилясов А.Н., Путилова Е.С. Оспаривая очевидное: арктические города // Городские исследования и практики. 2020. № 5 (1). С. 9–32. DOI: <https://doi.org/10.17323/usp5120209-32>
- Pilyasov, A. N., Putilova, E. S. (2020). Disputing the obvious: Arctic cities. *Urban Research and Practices*. No. 5 (1). Pp. 9–32. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17323/usp5120209-32>
- Сизов, Ю.И., Медведева, Л.Н. Развитие среднего города на основе концепта: от «умного дома к умному городу» // Научные труды вольного экономического общества. 2019. № 4. С. 573–580.
- Sizov, Yu.I., Medvedeva, L. N. (2019). The development of a medium-sized city based on the concept: from a “smart home to a smart city”. *Scientific Works of the Free Economic Society*. No. 4. Pp. 573–580. (In Russ.).
- Симакова Е.А., Селякова К.И., Кравченко Д. Применение 3D-печати в строительстве. Инженерные исследования. 2021. № 1 (1). С. 3–11. URL: <http://eng-res.ru/archive/2021/1/3-11.pdf>
- Simakova, E.A., Selyakova, K.I., Kravchenko D. (2021). The Use of 3D Printing in Construction. *Engineering Research*. No. 1 (1). Pp. 3–11. (In Russ.). Available at: <http://eng-res.ru/archive/2021/1/3-11.pdf>
- Сулейманова Л.Р., Наставшева А.В., Махмудова А.Р., Габбасова И.И., Решетник О.А. Применение хитозана в пищевой и других промышленности // Вестник науки. 2020. № 1 (22). Том 1. С. 197–211. URL: <https://www.vestnik-nauki.pf/article/2582> (дата обращения: 27.01.2025).
- Sulejmanova, L.R., Nastavsheva, A.V., Mahmudova, A.R., Gabbasova, I.I., Reshetnik, O.A. (2020). Use of chitosan in food and other industries. *Vestnik Nauki*. No. 1 (22). Tom 1. Pp. 197–211. (In Russ.). Available at: <https://www.vestnik-nauki.rf/article/2582> (accessed: 27.01.2025).
- Усачева О.А. Российские концепции экологизации городов. 2017. Россия и мир: глобальные вызовы и стратегии социокультурной модернизации. Материалы науч.-практ. конф. ФИСЦ РАН. С. 726–732.
- Usacheva, O.A. (2010). *Russian concepts of urban greening*. Russia and the World: Global Challenges and Strategies of Socio-Cultural Modernization. Proceeding of the International and Practical Conf. FRSC RAS. Pp. 726–732. (In Russ.).
- Экономика современной Арктики: в основе успешности эффективное взаимодействие и управление интегральными рисками: монография / Под науч. ред. В.А. Крюкова, Т.П. Скуфьиной, Е.А. Корчак. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 245 с. ISBN978-5-91137-416-7 URL: http://www.iep.kolasc.net.ru/2_ek_sov_ark_20.pdf (дата обращения: 09.04.2024).

- The economy of the modern Arctic: success is based on effective interaction and integrated risk management: monograph (2020). Monografiya / Ed. A. Kryukov, T.P. Skuf'ina, E.A. Korchak. Apatity: FIC KNC RAN245 s. ISBN978–5–91137–416–7. (In Russ.). Available at: http://www.iep.kolasc.net.ru/2_ek_sov_ark_20.pdf (accessed: 09.04.2024).
- Berman, M., Orttung, R.W. (2020). Measuring Progress toward Urban Sustainability: Do Global Measures Work for Arctic Cities? *Sustainability*, 12. DOI: 10.3390/su12093708
- Bobylev, N., Gadal, S., Konyshov, V., Lagutina, M., Sergunin, A. (2021). Bilding Urban Climate Change Adaptation Strategies: The Case of Russian Arctic Cities. *Weather, Climate and Society*, 13, 875–884.
- Danilina, N., Andreeva, P., Bartenev, V., Levoshich, N., Korkiya, E., Mamedov, A., Laamarti, Y. (2022). Assessment of urban territories transport accessibility conditions in Arctic cities. *XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry «State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2022»* (E3S Web Conf.), 363. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236302031> Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2022/30/e3sconf_interagromash2022_02031.pdf (accessed: 20.07.2023).
- Di Napoli, B., Jill, M. (2020). Urban planning sustainability metrics for Arctic cities. *Environmental Research Letter*, 15. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc37b> Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abc37b/pdf> (accessed: 20.07.2023).
- Fuller, M. E., Morsch, Ph., Goldsmith, F., Heufer, K. A. (2021). Reaction Class-Based CHON Combustion Mechanism Development. *10th European Combustion Meeting*, 2021. Available at: https://www.researchgate.net/publication/348937272_Reaction_Class-Based_CHON_Combustion_Mechanism_Development (accessed: 20.07.2023).
- Gassiy, V., Stoikov, V. (2020). Renewable energy and green construction in the Arctic. *E3S Web of Conferences 207, PEPM'2020*. DOI: 10.1051/e3sconf/202020702008. Available at: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2020/67/e3sconf_fpepm2020_02008.pdf (accessed: 20.07.2023).
- Kenny, M. J. (2017). Urban Planning in the Arctic: Historic Uses and the Potential for a Resilient Urban Future. *Arctic Yearbook*, 133–146. <https://www.researchgate.net/publication/323240318> (accessed: 20.07.2023).
- Kou, S.G., Peters, L.M., Mucalo, M.R. (2021). Chitosan: A review of sources and preparation methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 169, 85–94. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2020.12.005
- Li, Q. (1992). Applications and Properties of Chitosan. *Journal of Bioactive and Compatible Polymers*, 4, 370–397. DOI: 10.1177/088391159200700406
- Mourya, V.K., Inamdar, N.N. (2008). Chitosan-modifications and applications: Opportunities galore. *Reactive and Functional Polymers*, 6 (68), 1013–1051. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2008.03.002
- Ourng, Ch., Vaguet, Y., Derkacheva, F. (2019). Spatio-Temporal Urban Growth Pattern in the Arctic: A Case Study in Surgut, Russia. *Conference: 2019 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*. DOI: 10.1109/JURSE.2019.8809013 (accessed: 20.07.2023).
- Prokopova, S. M. (2021). The concept of a “warm” city in the arctic: basic ideas of comfort in the urban environment (the case of western Siberia, Russia). *Technical Aesthetics and Design Research*, 3(4), 22–28. DOI: 10.34031/2687–0878–2021–3–4–22–28

- Sanandiya, N.D., Vijay, Y., Dimopoulou, M. et al. (2018). Large-scale additive manufacturing with bioinspired cellulosic materials. *Science Report*, 8, 8642. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26985-2> (accessed: 20.07.2023).
- Sultan, S., Mathew, A. P. (2019). 3D Printed Porous Cellulose Nanocomposite Hydrogel Scaffolds. *J. Vis. Exp.* (146). DOI: 10.3791/59401 Available at: <https://www.jove.com/t/59401/3d-printed-porous-cellulose-nanocomposite-hydrogel-scaffolds> (accessed: 21.01.2024).
- Shamshina, J.L., Kelly, A., Oldham T. et al. (2020). Agricultural uses of chitin polymers. *Environ Chem Lett.* 18. 53–60. DOI: 10.1007/s10311-019-00934-5
- Tsurkan, M.V., Liubarskaia, M.A., Vorotnikov, A.M., Maiorov, S.V. (2017). Implementation of energy efficient smart technologies at the urban territories of the Arctic zone of Russia. *International Conference on Sustainable Cities. Series: Earth and Environmental Science*, 72, 1–10. DOI: 10.1088/1755-1315/72/1/012029
- Wang, Z., Xiao, M., Memari, A., Na, X. (2023). Design and construction approaches of foundations in permafrost with an application for a 3-D printed habitat in the Arctic. *Conference: Proceedings of 6th Residential Building Design & Construction Conference, January*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/366812388_Design_and_construction_approaches_of_foundations_in_permafrost_with_an_application_for_a_3-D_printed_habitat_in_the_Arctic (accessed: 20.07.2023).

Статья поступила 16.02.2024

Статья принята к публикации 10.04.2024

Для цитирования: Кичерова М.Н., Игнатова И.В., Разумкова И.А. «Зеленые» города в Арктике: от концепции к технологическим решениям // ЭКО. 2025. № 2. С. 179–196. DOI: 10.30680/ECO0131-7652-2025-2-179-196

Информация об авторах

Кичерова Марина Николаевна (Тюмень) – кандидат социологических наук, доцент. Тюменский государственный университет.

E-mail: m.n.kicherova@utmn.ru; ORCID: 0000-0001-5829-7570

Игнатова Ирина Викторовна (Тюмень) – кандидат социологических наук, доцент. Тюменский государственный университет.

E-mail: i.v.ignatova@utmn.ru; ORCID: 0000-0003-1692-1974

Разумкова Иллариya Андреевна (Тюмень) – кандидат химических наук, профессор. Тюменский государственный университет.

E-mail: i.a.razumkova@utmn.ru; ORCID: 0000-0001-7344-9130

Summary

M.N. Kicherova, I.V. Ignatova, I.A. Razumkova

Green Cities in the Arctic: From Concept to Technological Solutions

Abstract. Based on expert interviews, laboratory tests, and multidisciplinary design, a conceptual model of a “green” Arctic city was developed, integrating the key provisions of the concepts of “sustainable city”, “eco-city” and “smart city”. To create its residential

modules, a natural biodegradable polymer chitin/chitosan and three innovative technological solutions based on it were proposed: building blocks, 3D printing and sandwich panels. Chitosan resistance to extremely low temperatures –196oC and biosafe utilization are proved in laboratory conditions. Economic calculations are presented, advantages and limitations of these technological solutions are disclosed.

Keywords: *green economy; Arctic region; green Arctic city; chitosan; sustainability; innovative technologies*

For citation: Kicherova, M.N., Ignatova, I.V., Razumkova, I.A. (2025). Green Cities in the Arctic: From Concept to Technological Solutions. *ECO*. No. 2. Pp. 179–196. (In Russ.). DOI: 10.30680/ECO0131–7652–2025–2–179–196

Information about the authors

Kicherova, Marina Nikolaevna (Tyumen) – Candidate of Sociology Sciences, Associate Professor. Tyumen University.

E-mail: m.n.kicherova@utmn.ru; ORCID: 0000–0001–5829–7570

Ignatova, Irina Viktorovna (Tyumen) – Candidate of Sociology Sciences, Associate Professor. Tyumen University.

E-mail: i.v.ignatova@utmn.ru; ORCID: 0000–0003–1692–1974

Razumkova, Illaria Andreevna (Tyumen) – Candidate of Chemistry Sciences, Professor. Tyumen University.

E-mail: i.a.razumkova@utmn.ru; ORCID: 0000–0001–7344–9130