**В статье проведен анализ факторов, усложняющих быт и строительство в экстремальных условиях Крайнего Севера; к каждому фактору приведены актуальные методы решения сложностей, которые он провоцирует. Анализируются климатические вызовы, рассматриваются вопросы логистики и автономности жилых систем. Основной целью исследования является разработка и адаптация архитектурных решений, учитывающих специфические условия региона. Представлена экспериментальная модель модульной жилой системы, предназначенной для эксплуатации в условиях Крайнего Севера с учетом выведенных методов строительства и эксплуатации.**

**Ключевые слова: модульность; жилое строительство; арктические зоны; мобильная архитектура; экологические принципы. /**

**The article analyzes the factors that complicate life and construction in the extreme conditions of the Far North. For each factor, there are current methods for solving the difficulties that it provokes. Climate challenges are analyzed, and issues of logistics and autonomy of residential systems are considered. The main goal of the study is the development and adaptation of architectural solutions that take into account the specific natural conditions of the region. The article presents an experimental model of a modular residential system designed for operation in the conditions of the Far North, taking into account the derived methods of construction and operation.**

**Keywords: modularity; residential construction; arctic zones; mobile architecture; environmental principles.**

# Архитектура жилых систем в условиях Крайнего Севера / Architecture of housing units in the Far North conditions

текст
**Ольга Воличенко**
Научно-исследовательский Московский государственный строительный университет
**Сергей Огородников**
Российский университет дружбы народов (Москва)
**Исам Ибрахим Али Абдо**
Российский университет дружбы народов (Москва)

text
**Olga Volichenko**
National Research Moscow State University of Civil Engineering
**Sergey Ogorodnikov**
RUDN University (Moscow)
**Esam Ebrahim Ali Abdo**
RUDN University (Moscow)

## Введение

Арктические территории имеют огромное значение для экономики страны и всего мира не только благодаря запасам природных ресурсов, но и как стратегически важная транспортно-коммуникационная система, включающая морские, речные, сухопутные и воздушные пути сообщения и их инфраструктурные объекты. Строительство в северных регионах России имеет большие перспективы, способствуя устойчивому развитию страны, поддержанию энергетической безопасности и улучшению международной конкурентоспособности. Согласно последним аналитическим данным и исследованиям, «вклад российской Арктики в поддержание глобального экосистемного баланса оценивается в 12% от глобального и превышает суммарный вклад всех других стран арктического региона. Около 80% всего видового биоразнообразия северной приполярной части Земли представлено в Российской Арктике» [1].

Несмотря на высокий потенциал, основной проблемой освоения северных территорий является суровый климат и низкая плотность поселений, более того, основная часть малочисленных коренных народов Севера проживает за пределами городов [2]. Общие вопросы влияния суровых условий Севера на среду обитания рассматривались в научных исследованиях известных географов В. А. Аграната, И. С. Гурвича, Г. М. Лаппо, Е. В. Перцика и др.

В совокупности перечисленных факторов актуальность освоения Русского Севера не вызывает сомнений. Основные дискуссии были сконцентрированы не на целях, а вокруг путей и методов освоения территорий. Выдвигалось два альтернативных подхода: первый – вахтовый метод (временное мобильное поселение), второй предусматривал создание постоянных поселений.

Сторонники **вахтового метода** утверждают, что он является более эффективным с точки зрения затрат и позволяет минимизировать воздействие на окружающую среду. Этот подход подразумевает привлечение рабочих на определенный срок для выполнения конкретных задач, после чего они возвращаются на свое постоянное место жительства. Приверженцы вахтового метода считают, что такой способ освоения территорий позволяет избегать значительных расходов на строительство инфраструктуры и постоянное обеспечение жизни в суровых климатических условиях Севера. Вахтовый метод также считается более гибким, так как позволяет оперативно перемещать рабочую силу в зависимости от нужд конкретного проекта.

Однако есть и те, кто считает, что для полноценного освоения северных регионов необходимо проектировать и строить постоянные поселения. По их мнению, такие поселения способны обеспечить стабильное развитие региона, улучшить качество жизни местных жителей и предложить более устойчивую социальную инфраструктуру. Поддерживающие этот подход утверждают, что постоянные поселения способствуют организации рабочих мест, развитию образовательной и медицинской инфраструктур, а также обеспечению национальной безопасности России в Арктике. Более того, в условиях глобального изменения климата и растущего интереса к Арктике Россия должна укреплять свое присутствие в регионе, а это возможно только при создании постоянных опорных точек. К сторонникам фундаментального освоения Севера можно причислить Н. В. Суханова, который подробно раскрывает тему освоения северных территорий в своих работах [3]; Э. П. Путинцева, который, несмотря на тезис о необходимости ротации населения северных городов, сформировал принципы строительства населенных пунктов в Арктике [4]; Е. А. Калеменеву, которая сконцентрировалась на анализе существующего опыта освоения Севера [5].

Имеются также и приверженцы **комбинированного подхода**, считающие, что необходимо использовать преимущества обоих методов. Комбинированный подход предполагает создание небольших постоянных поселений в стратегически важных точках с параллельным использованием вахтового метода для выполнения временных задач. Этот метод, по мнению его сторонников, позволяет эффективно использовать ресурсы, не забывая при этом о необходимости закрепления за Россией ключевых арктических территорий. Комбинированный подход также позволяет более гибко реагировать на изменения в экономике и политике, а также на природные и климатические условия. Данный

> Рис. 1. Антарктическая станция Halley VI (https://archi.ru/projects/world/8011/antarkticheskaya-stanciya-halley-vi)

подход наглядно проиллюстрирован в схеме расселения, предложенный на основе проведенных исследований города Дудинка [6]. Предложенная градостроительная структура включала в себя капитальные ветрозащитные здания, стандартные жилые дома средней этажности и квартал с мобильным жильем для регулирования плотности населения в городе. Гибкость данной системы, в первую очередь, достигается именно благодаря блоку с модульным домостроением, что подчеркивает актуальность поставленной задачи. «Только гибкая, адаптивная система способна на сегодняшний день отвечать постоянно меняющимся условиям региона и обеспечить максимально возможный уровень комфорта для его жителей» [6, с. 127].

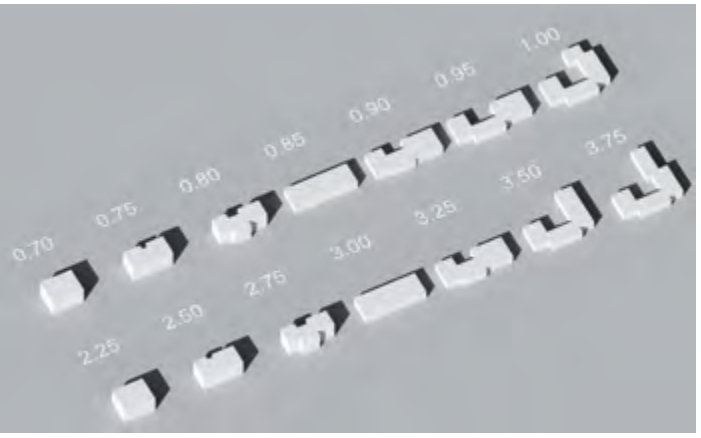
Большим преимуществом использования легковозводимых модульных конструкций в комбинированном подходе также является то, что они способны нести функцию мест для загородного отдыха или дач. В востребованности данного формата строительства можно убедиться на примере концепции реновации Норильска, которую подробно описал Алексей Мякота: «И понятно, почему на подходе к Норильску разрослись дачи: человек тянется к природе, хочет с ней взаимодействовать» [7, с. 92].

Но все эти подходы объединены общей проблемой, которая заключается в труднодоступности и суровом климате Арктики. Независимо от выбранного метода освоения, нужно учитывать значительные логистические и технологические вызовы, которые требуют инновационных решений и значительных инвестиций. В статье приведен анализ основных сложностей в освоении северных регионов, международный и отечественный опыт их решения и предложения по методу их внедрения для дальнейшего освоения региона.

**Вечная мерзлота**

Вечная мерзлота – одна из ключевых и наиболее широко известных проблем строительства в северных регионах. Она была хорошо изучена еще в начале прошлого столетия в работах П. А. Шумского, М. В. Кудряшова, М. И. Сумгина и многих других. Основная сложность заключается в том, что при изменении температурного режима грунт, находящийся в состоянии многолетней мерзлоты, может начать таять, что приводит к его просадке и дестабилизации возведенных на нем конструкций. Для предотвращения этих негативных последствий и обеспечения устойчивости зданий в условиях возможного оттаивания грунта применяются специальные инженерные решения, одно из которых – использование свайных фундаментов. Сваи в таких условиях не только обеспечивают необходимую опору для строений, но и создают пространство между зданием и поверхностью грунта, что способствует продуваемости и термической изоляции подземного основания. Подобное решение было подробно изложено в трудах Михаила Ивановича Сумгина, известного российского мерзлотоведа и геокриолога. Этот подход минимизирует контакт сооружений с грунтом, снижая риск разрушения вследствие изменения его состояния. Начиная с XX века, этот способ активно применяется при строительстве крупных городов Русского Севера,.

В современных практиках строительства появилась возможность проводить мониторинг грунтов. Он позволяет выявлять малейшие изменения температур, структуры и деформаций грунта. Эти показатели особенно важны для расчета фундаментов зданий и сооружений, эксплуатируемых на вечномерзлых грунтах [8]. Метод мониторинга позволяет вовремя идентифицировать и предотвратить оттаивание грунтов. Более того, благодаря 3D-Green BIM технологиям можно заранее смоделировать влияние здания на вечномерзлый грунт, выбрать необходимое положение и расстояние от здания до грунта, так как высота расположения здания над землей также существенно влияет на теплоотдачу к слою вечной мерзлоты [9]. Несмотря на актуальность этого метода, глобальное потепление в скором времени может поставить под вопрос его эффективность. Криолитологические исследования, проведенные в отдельных российских арктических городах, выявили многочисленные примеры повреждения зданий и сооружений на грунтах, подверженных воздействию неблагоприятных условий вечной мерзлоты. Так, за последнее десятилетие в Норильске число повреждений, связанных с таянием вечной мерзлоты, было значительно выше, чем за предшествующие 50 лет [10].




^ Рис. 2. Экспериментальная модель влияния формы здания на энергоэффективность. Из исследования Киммо Лулукангас ( https://www.forum-holzbau.ch/pdf/ihf09_Lylykangas.pdf)

^ Рис. 3. Проект жилого района «Новый Мурманск». 2019 (https://realty.rbc.ru/news/5d6910b89a79474cc0ae9a59)

В качестве альтернативного варианта можно рассматривать метод возведения объекта на подушке, которая будет удерживать здание на поверхности за счет увеличенной площади следа. Подушка может быть закреплена в грунт специальными шпильками и сваями, которые уменьшат вероятность ее смещения. Еще более интересный подход применяется для станции Halley VI, где опоры установлены на скользящие пластины, что позволяет перемещать станцию (рис. 1).

**Низкие температуры**

При строительстве в северных регионах ключевым фактором является воздействие отрицательных температур и экстремальных морозов, влияющих на эксплуатационные характеристики зданий. Поэтому необходимо не только использовать инновационные теплоизоляционные материалы, обладающие высокой сопротивляемостью к теплопередаче, но и учитывать форму и геометрию сооружений. Удельные расходы тепла зависят от удельного периметра, то есть отношения периметра наружных стен к общей площади типового этажа, что не раз доказывалось экспериментальным путем. «При расчетной температуре воздуха минус 30° С в жилых домах с планировкой, где удельный периметр наружных стен составляет 0,24, удельный расход тепла был принят за 100%, при снижении компактности до 0,35 расход тепла составил уже 121%» [11, с. 157].

Финский исследователь Киммо Лулукангас создал экспериментальные аналитические 3D-модели и при помощи компьютерных программ провел анализ с целью выявления для городов Северной Европы наиболее эффективных с точки зрения теплопотерь, строительства и эксплуатации объектов. Используя современные технологии, исследователь в очередной раз наглядно подтвердил принцип энергоэффективности формы здания [12]. На рисунке 2 показаны модели площадью 150 м$^2$. В верхнем ряду коэффициент A/V (соотношение наружной площади здания к обогреваемому объему) увеличивается с 0,70 до 1,00. В нижнем ряду коэффициент A/A (соотношение внутренней площади здания к площади обогреваемого пола) увеличивается с 2,25 до 3,75. A/V рассчитывается с использованием внешних размеров слоя изоляции. A/A рассчитывается с использованием внутренних размеров строительной оболочки (рис. 2).

Проведенные расчеты вновь доказали предпочтительность компактной формы здания, поскольку она способствует снижению теплопотерь, минимизируя площадь ограждающих конструкций, что особенно важно в условиях сурового климата. Это позволяет обеспечить эффективное теплосбережение и снизить затраты на отопление. Наиболее энергоэффективной формой здания считается компактная, с минимальной площадью наружных ограждений по отношению к объему. Среди таких форм выделяются сфера, куб и цилиндр. Энергоэффективность зданий может повышаться за счет изменения форм оконных проемов. Форма окон, слегка вытянутых по вертикали, способствует хорошей освещенности помещений при минимальных размерах проемов и уменьшении площади зоны охлаждения в комнатах [11, с. 141].

**Ветер**

При строительстве в регионах Крайнего Севера требуется учитывать сильный ветровой режим. В условиях полярного климата, где зимы суровы, а ветры достигают значительных скоростей, приходится анализировать множество специфических архитектурных решений, направленных на минимизацию давления ветра и снега на здания. Архитектурная форма влияет на устойчивость здания к ветровым нагрузкам. Например, обтекаемые формы цилиндрических или купольных конструкций способствуют снижению ветрового давления на фасады и уменьшают вероятность образования сугробов. Обтекаемость здания также помогает минимизировать сопротивление воздушным потокам, что важно для снижения теплопотерь и поддержания энергетической эффективности строений. Этот подход был опробован уже в начале 1970-х годов и стал неотъемлемым принципом проектирования в северных регионах. Один из первых примеров применения данного принципа ветрозащиты был реализован в жилой застройке Мурманска при проектировании микрорайонов 203 и 206. Вместо прямых углов в жилых домах были использованы преимущественно тупые – 120 и 135 градусов, при которых снижается турбулентность

^ Рис. 4. Проект плавучей научно-исследовательской станции в Арктике. Архитектор Е. Черножукова (https://elima.ru/articles/?id=871)

ветровых потоков [11, с. 149]. Хорошо зарекомендовавшие себя приемы ветрозащиты продолжают применять в современном проектировании, например, при разработке «Нового Мурманска» на берегу Кольского залива (рис. 3).

Устойчивость конструкций в условиях сильного ветра является еще одной важной задачей проектировщика. Здания в северных регионах проектируются с расчетом на большие ветровые нагрузки, что требует применения усиленных конструктивных элементов – укрепленных фундаментов и каркасов. Использование прочных материалов и дополнительных крепежных элементов способствует долговечности зданий в условиях экстремальной ветровой нагрузки. Влияние сильных северных ветров на архитектуру и строительство невозможно игнорировать. Применение высоких входов, обтекаемых форм и устойчивых конструкций не только обеспечивает защиту зданий от снегозаносов, но и повышает их энергоэффективность и долговечность (рис. 4). Интеграция этих решений в проектирование арктических зданий способствует созданию комфортной и безопасной среды для жителей, несмотря на экстремальные природные условия.

v Рис. 5. Салехард. Жилой дом по ул. Чубынина (https://gelio.livejournal.com/241445.html)

**Бури**

Ветер является и причиной снежных бурь. Во время бури, наряду с устойчивостью здания, возникает необходимость обеспечить его заметность, особенно в условиях ухудшенной видимости (рис. 5).

В условиях Арктики, когда метели могут значительно снизить видимость, заметные ориентиры повышают безопасность населения. Одним из способов улучшения заметности является использование ярких и контрастных цветов на фасадах зданий. Цвет помогает легко идентифицировать здания даже при сложных погодных условиях. Яркие оттенки – оранжевый, красный или желтый – хорошо контрастируют с белыми снежными ландшафтами и могут стать визуальными ориентирами во время вьюги и метели. Кроме того, использование световых указателей и подсветки на зданиях способствуют их легкому обнаружению в условиях тумана или снежной завесы. Световой дизайн актуален не только в период снежных бурь, но и во время полярной ночи, которая продолжается от одного до трех месяцев в зависимости от конкретного расположения места.

**Колористика**

В суровых условиях Крайнего Севера, где большую часть года преобладают холодные оттенки природы – белый снег, серое небо и отсутствие зелени – правильный выбор цветовой гаммы в архитектуре может существенно влиять на настроение и психологическое состояние жителей. Яркие и насыщенные цвета помогают создать ощущение тепла, уюта и живости. Это особенно важно в период долгой зимы и полярной ночи, когда солнечного света почти нет, и серость среды может негативно влиять на психологическое состояние человека (рис. 6).

Влияния цвета на человека, проживающего в северных регионах, изучала М. А. Фролова. Проведенные анализы показали, что чрезмерные информационные, психологические нагрузки и ряд социальных факторов негативно сказываются на состоянии здоровья человека, на которое влияют также сложные природно-климатические условия

^ Рис. 6. Яркое оформление китайской полярной станции «Тайшань» ( http://www.xinhuanet.com/english/2018-12/27/c_137701949.htm)

региона проживания, монотонность ландшафта и однотипность архитектурных форм.

Многие исследователи предлагают придерживаться естественной для северных регионов палитры. С учетом сезонности и природно-климатических особенностей такими цветами являются оттенки светлых теплых тонов (желтый, оранжевый) в сочетании с оттенками холодных тонов разной насыщенности (серо-белая гамма) [13] (рис. 7). В условиях сурового климата и удаленности северных городов правильное использование цвета становится не только эстетическим инструментом, но и важным функциональным элементом, улучшающим качество жизни и поддерживающим связь между человеком и окружающей средой.

**Логистика**

Помимо природных факторов, большие проблемы для строителей при освоении территорий Крайнего Севера доставляет местоположение региона, слабо развитая инфраструктура и изолированность края от развитых индустриальных центров. Использование грузовых контейнеров – наиболее доступный с точки зрения экономики и логистики способ доставки грузов на Север. Эффективный и стандартизированный метод транспортировки грузов в контейнерах завоевал широкую популярность в мировой логистике по нескольким весомым причинам. Использование грузовых контейнеров является распространенной мировой практикой, которая обеспечивает эффективность, стандарт и надежность грузоперевозок по всему миру.

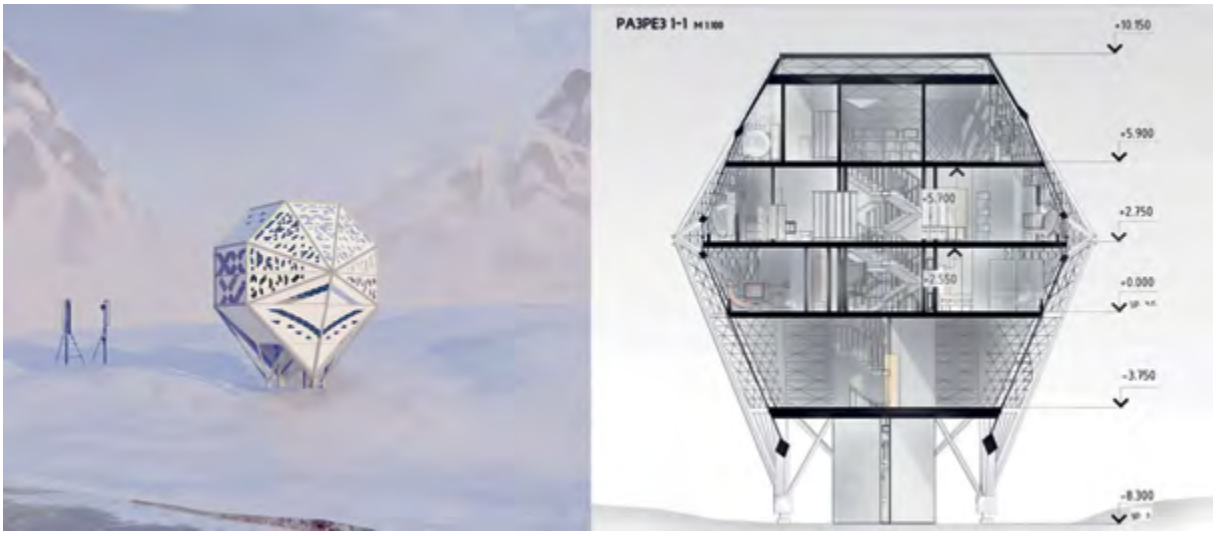
Грузовые контейнеры имеют общие стандартные размеры и структуру, которая позволяет им легко перемещаться между разными видами транспорта – судами, поездами, грузовыми автомобилями и вертолетами, значительно упрощая и ускоряя процесс перевозок. Металл – прочный материал изготовления обеспечивает сохранность груза в течение всего транспортного пути. Помимо этого, контейнеры обычно оснащены системами безопасности и трекинга. Это позволяет отслеживать и контролировать местоположение груза в режиме реального времени, что повышает безопасность и контролируемость транспортировки.

Одним из недостатков контейнерных перевозок являются габаритные ограничения, оказывающие прямое влияние на размеры перевозимых грузов. Грузовые контейнеры в соответствии со стандартами, установленными Международной организацией по стандартизации (ISO), имеют длину 20 и 40 футов. Эта стандартизация обеспечивает совместимость между различными видами транспорта и упрощает глобальные перевозки. Данный фактор должен быть обязательно учтен при разработке модулей и их элементов. Акцент на габариты был сделан в работе «Мобильная модульная система для труднодоступных регионов» [14].

**Обилие снега**

Большое количество снега в северных регионах оказывает значительное влияние на архитектурное проектирование и конструктивные решения зданий. Высокие снеговые нагрузки требуют использования специальных форм и материалов, способных противостоять скоплению снега и предотвращать негативное воздействие на несущие конструкции. Одним из классических решений является

v Рис. 7. Салехард. Культурно-деловой центр (https://gelio.livejournal.com/241445.html)




> Рис. 8. Конкурсный проект научно-исследовательской станции. И. Кран (https://ardexpert.ru/project/9421)

применение скатных кровель с крутым углом наклона, что позволяет снегу естественным образом скатываться с поверхности, уменьшая нагрузку на крышу и снижая риск ее деформации или разрушения. Недостаток этого решения заключается в том, что здание становится более уязвимо для сильных ветров.

Однако, помимо традиционных скатных кровель, особую роль начинают играть обтекаемые формы зданий. Такие формы, вдохновленные принципами аэродинамики, позволяют ветрам, характерным для северных регионов, не только переносить снежные массы, но и эффективно сдувать снег с поверхностей. Обтекаемые конструкции минимизируют зоны скопления снега и создают условия для его естественного удаления ветровыми потоками, что повышает долговечность и устойчивость здания [15]. Устойчивость к снежным бурям и высоким снеговым нагрузкам становится важнейшим аспектом при проектировании зданий в условиях вечной мерзлоты и сурового климата северных регионов. Таким образом, использование обтекаемых форм и рациональных конструктивных решений является важной стратегией для создания эффективной и устойчивой архитектуры в условиях большого количества снега и сильных ветров, что обеспечивает долговечность и безопасность построек (рис. 8).

**Потенциал, ветер и полярный день как источник энергии**

Несмотря на обилие трудностей и ограничений, Крайний Север России обладает значительным потенциалом для использования альтернативных источников энергии, таких, как ветряная и солнечная энергия. Суровые климатические условия, характерные для региона, создают как вызовы, так и возможности для внедрения возобновляемых энергетических технологий.

Территории большинства регионов арктической зоны России обладают высоким потенциалом солнечной и ветровой энергии, поскольку они имеют длительный световой период и постоянные сильные ветры [16]. Ветер в этих регионах дует с высокой скоростью практически круглый год, что делает ветровую энергию одним из наиболее перспективных источников. Установка ветряных электростанций может обеспечить стабильную и возобновляемую подачу электроэнергии, особенно в отдаленных поселениях, которые не связаны с централизованными энергосистемами (рис. 9).

Полярный день, характерный для летнего периода в Арктике, предоставляет уникальные возможности для использования солнечной энергии. В течение полярного дня солнце не заходит за горизонт на протяжении многих недель, что позволяет использовать солнечные панели для генерации энергии в условиях обилия света. Даже несмотря на низкие температуры, солнечные панели могут эффективно функционировать при наличии достаточного уровня солнечного освещения, что компенсирует ограниченное использование солнечных технологий в зимний период. Бельгийская станция Princesse Élisabeth является полностью автономной за счет использования альтернативных источников энергии (рис. 10).

Таким образом, сочетание ветровой и солнечной энергии может стать основой для развития энергетической независимости северных регионов, снижая их зависимость от традиционных источников энергии (уголь и газ) и уменьшая нагрузку на окружающую среду. Интеграция этих технологий в энергетическую инфраструктуру Крайнего Севера позволит также снизить затраты на доставку топлива и эксплуатацию оборудования, что особенно важно в условиях высокой удаленности региона и его труднодоступности.

По существующим оценкам, стоимость электроэнергии, которая может быть получена с использованием солнечно-ветровых установок в арктической зоне, примерно на 40% дешевле электроэнергии, получаемой с использованием ископаемого топлива в центральных регионах России [17]. Использование альтернативных источников энергии в этих регионах, наряду с возможностями по хранению энергии и ее распределению, может стать важной частью стратегии устойчивого развития и освоения Арктики.

**Принципы, минимизирующие сложности строительства и эксплуатации**

Из изложенного выше материала можно сделать вывод, что северные условия – не самые благоприятные для строительства и эксплуатации жилья.

^ Рис. 9. Ветроэнергетическая установка для Арктики, разработанная петербургскими учеными (https://www.ferra.ru/news/techlife/piterskie-uchyonye-sozdali-vetryanye-elektrostancii-dlya-arktiki-05-08-2024.htm)

^ Рис. 10. Солнечные панели на бельгийской станции Princesse Élisabeth (https://teknoblog.ru/2015/04/02/36568)

Но совокупность наработанного опыта и современных технологий значительно упрощают этот процесс. Как упоминалось ранее, наиболее эффективным способом освоения удаленных территорий являются модульные системы, которые могут применяться как для вахтового освоения территорий, так и для постоянного пребывания. Ключевыми являются следующие принципы:

1. **Сваи и продуваемость грунта**. Вечная мерзлота диктует необходимость строительства над поверхностью грунта, чтобы избежать таяния нижних слоев основания под зданиями. Продуваемое пространство под строениями снижает риск повреждения структур. Для решения проблемы могут применятся дома на сваях, подушках или подвешенные конструкции.

2. **Компактные формы зданий**. Для повышения энергоэффективности зданий в условиях низких температур выбираются компактные формы строений, которые минимизируют площадь наружных стен и теплопотери. Наиболее оптимальны формы шара, куба и цилиндра. Важно тщательно контролировать соотношение площади наружных стен и оконных проемов при проектировании зданий на Севере. Компактные и рациональные формы зданий, использование современных материалов и технологий позволяют достичь наилучших результатов с точки зрения энергосбережения.

3. **Устойчивость к ветрам**. Сильные северные ветры влияют на проектирование зданий, что обуславливает необходимость их аэродинамических форм, высоких входов и других мер защиты от снегозаносов. Устойчивые конструкции помогают выдерживать сильные ветровые нагрузки.

4. **Заметность зданий.** В условиях снежных бурь важна заметность зданий, что решается применением ярких цветов или световых указателей, чтобы строения было легко обнаружить при ухудшении видимости. Применение ярких цветов и световых указателей помогает ориентироваться в экстремальных погодных условиях, что существенно повышает уровень безопасности и комфорта проживания в этих регионах.

5. **Цвет.** Цвет можно использовать не только для повышения заметности здания, но и для разнообразия архитектурной среды, что благоприятно влияет на психологические аспекты взаимодействия человека с объектом.

6. **Логистика.** Для повышения экономической привлекательности, минимизации воздействия на экологию и простоты сборки необходимо учитывать логистику. В качестве решения можно предложить использование модульных систем, выполненных с учетом габаритов грузового контейнера, что упростит не только транспортировку, но и сборку.

7. **Скатные крыши и обтекаемые формы.** Большое количество снега требует проектирования скатных кровель или обтекаемых форм зданий, которые позволяют ветру сметать снег, предотвращая его накопление и повышая устойчивость конструкции.

8. **Автономность.** Автономность здания в условиях слабой развитости региона является большим преимуществом. Ветроэнергетика и солнечная энергия имеют высокий потенциал для эксплуатации на Севере благодаря сильным ветрам и длительному полярному дню.

На основе данных принципов была разработана экспериментальная модель модульной жилой системы для Крайнего Севера (рис. 11).

Чтобы избежать таяния вечной мерзлоты, модули подвешены на ванты, что обеспечивает циркуляцию воздуха под зданием и предотвращает подогрев грунта. Второй важный принцип – компактность конструкции. Здания имеют относительно небольшую площадь наружных стен и компактные формы, что позволяет сократить площадь поверхности, контактирующей с внешней средой. Для улучшения аэродинамических свойств здания у блоков скруглены углы. Небольшая кривизна позволяет снизить нагрузку от сильных ветров и способствует самоочищению кровли от снега за счет потоков воздуха, сметающего осадки с поверхности. Устойчивость к ветрам достигается за счет использования треугольных опор; треугольная форма основания придает дополнительную прочность и устойчивость при сильных порывах ветра.

Для улучшения заметности здания в условиях плохой видимости, характерной для снежных бурь и полярных ночей, используются цветовые акценты на опорах и встроенная система подсветки. Предусмотрено использование альтернативных источников энергии – солнеч-

< Рис. 11. Схема экспериментальной модели модульного жилого блока с учетом выведенных принципов

> Рис. 12. Визуализация экспериментальной модели модульного жилого блока

ных панелей. С точки зрения логистики модульные блоки стандартизированы по габаритам грузовых контейнеров. Это упрощает транспортировку и доставку на удаленные участки, позволяя эффективно перемещать модули как по суше, так и по морю или воздуху.

Данная экспериментальная модель модульной жилой системы сочетает в себе устойчивость к экстремальным условиям, энергоэффективность и удобство транспортировки, что делает ее перспективной для использования в северных регионах (рис. 12).

**Заключение**

Строительство на Крайнем Севере – это сложный и многоуровневый процесс, требующий учета как климатических условий региона, так и специфики взаимодействия инженерных конструкций с вечной мерзлотой и сильными ветрами. Применение инновационных строительных технологий – использование обтекаемых форм, продвинутых теплозащитных материалов – позволяет минимизировать риски и увеличить энергоэффективность зданий.

Внедрение возобновляемых источников энергии (ветряные и солнечные установки) может повысить автономность регионов и снизить зависимость от внешних поставок топлива. Более того, частота и сила местных ветров в совокупности с полярным днем делает альтернативные источники энергии довольно эффективными. Предлагаемые принципы проектирования учитывают и многолетний опыт, и современные технологии; они призваны удовлетворить и компенсировать не только климатические сложности, но и социальные, психологические и логистические аспекты жизни и проектирования в экстремальных условиях.

Описанная модель актуальна не только для территорий Крайнего Севера. С незначительными модификациями она может применяться в любых экстремальных условиях и труднодоступных местах, включая пустыни, засушливый климат и горные местности. Заложенные принципы могут найти свое применение в колонизации космических объектов.

**Литература**

1. Павленко, В. И. Арктическая зона Российской Федерации в системе обеспечения национальных интересов страны // Арктика: экология и экономика. – 2013. – № 4. – С. 12.

2. Павленко, В. И., Петров, А., Куценко, С. Ю., Деттер, Г. Ф. Коренные малочисленные народы Российской Арктики (проблемы и перспективы развития) // Экология человека. – 2019. – № 1. – С. 26–33.

3. Суханов, Н. В. Градостроительное планирование развития территорий и поселений Севера // Градостроительство России XXI века : Сборник научных статей РААСН. – Москва : РААСН, 2001. – С. 80–85.

4. Путинцев, Э. П. Комплексная концепция северного градостроительства: I климатический район страны : дис. ... доктора архитектуры. – Москва, 2005. – 245 с. : ил.

5. Калеменева, Е. А. «Поворот к человеку» в проектах и практике урбанизации Крайнего Севера СССР в 1950–1960-е годы : дис. ... кандидата истор. наук. – Москва, 2019. – 195 с.

6. Барчугова, Е. В., Габитов, С. Т. Принципы реновации арктического субцентра на примере г. Дудинка //Architecture and Modern Information Technologies. – 2022. – № 2 (59). – С. 111–128.

7. Мякота, А. Концепция реновации Норильска // Проект Байкал. – 2022. 2(72) – С. 86–95. – DOI: https://doi.org/10.51461/projectbaikal.72.1984

8. Ashpiz, E. S. The problems of the railway subgrade construction in the subarctic part of the Russian cryolithozone and the ways of their solution // Transportation Soil Engineering in Cold Regions. – Springer, 2020. – Vol. 1. – С. 295–302.

9. Younis M., Kahsay M.T., Bitsuamlak G.T. BIM-cfd integrated sustainable and resilient building design for northern architecture // Ashrae Topical Conference Proceedings. – 2020. – С. 584–591.

10. Grebenets, V., Streletskiy, D., Shiklomanov, N. GEOTECHNICAL SAFETY ISSUES IN THE CITIES OF POLAR REGIONS. GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY. – 2012. – С. 104–119.

11. Лицкевич, В. К. Жилище и климат. – Москва : Стройиздат, 1984. – 288 с.

12. Kimmo Lylykangas. Shape Factor as an Indicator of Heating Energy Demand. Internationales Holzbau-Forum 2009. – 8 с.

13. Гонтарь, Е. В., Туробова, М. А., Фролова, М. А. Формирование колористики северных городов // SCIENTIFIC JOURNAL "ACADEMIA ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION". – 2020. – С. 97–101.

14. Воличенко, О. В., Огородников, С. Н., Халиль, И. Мобильная модульная система для труднодоступных регионов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. –2024. – № 2. – С. 76–87.

15. Сапрыкина, Н. А. Мобильное жилище для Севера. – Ленинград : Стройиздат : Ленингр. отд-ние, 1986. – 213 с. : ил.

16. Энергетическая инфраструктура Арктической зоны Российской Федерации : коллективная монография / Бушуев, В. В., Габдерахманова, Т. С., Моргунова, М. О. [и др.]. – Москва : Шанс, 2019. – 145 с.

17. Соловьев, Д. Шилова, Л. Гулев, С. Проблемы энергообеспечения удаленных территорий Российской Арктики // Проект Байкал. – 2023. – № 2 (76). – С. 60–65. – DOI: https://doi.org/10.51461/issn.2309-3072/76.2147

**References**

Ashpiz, E. S. (2020). The problems of the railway subgrade construction in the subarctic part of the Russian cryolithozone and the ways of their solution. In *Transportation Soil Engineering in Cold Regions* (Vol. 1, 295–302). Springer.

Barchugova, E. V., & Gabitov, S. T. (2022). Renovation principles of the Arctic sub-center on the example of Dudinka. *Architecture and Modern Information Technologies, 2*(59), 111–128.

Bushuev, V. V., Gabderakhmanova, T. S., Morgunova, M. O., Nefedova, L. V.,& Solovyev, D. A. (2019). Energy infrastructure of the Arctic zone of the Russian Federation. Moscow: Shans.

Gontar, E. V., Turobova, M. A., & Frolova, M. A. (2020). The Formation of Coloristics of the Northern Cities. *Academia. Architecture and Construction*, (1), 97-101.

Grebenets, V., Streletskiy, D., & Shiklomanov, N. (2012). *Geotechnical safety issues in the cities of polar regions. Geography, environment, sustainability*.

Kalemeneva, E. A. (2019). *"Povorot k cheloveku" v proektakh i praktike urbanizatsii Kraynego Severa SSSR v 1950-1960-e gody ["Turn to Man" in the projects and practice of urbanization of the Far North of the USSR in the 1950-1960s]* [History PhD dissertation]. Moscow.

Litskevich, V. K. (1984). *Zhilishche i klimat [Housing and Climate]*. Moscow: Stroyizdat.

Lylykangas, K. (2009). *Shape Factor as an Indicator of Heating Energy Demand.* Helsinki: Internationales Holzbau-Forum 2009.

Myakota, A. (2022). Norilsk Renovation Concept. *Project Baikal, 19*(72), 86-95. https://doi.org/10.51461/projectbaikal.72.1984

Pavlenko, V. I. (2013). Arctic zone of the Russian Federation in the system of national interests of the country. *Arctic: ecology and economy, 4*(12), 16-25.

Pavlenko, V. I., Petrov, A., Kutsenko, S. Yu., & Detter, G. F. (2019). Indigenous peoples of the Russian Arctic (Problems and Development Prospects). *Human Ecology*, 1, 26-33.

Putintsev, E. P. (2005). *Kompleksnaya kontseptsiya severnogo gradostroitelstva: I klimaticheskiy rayon strany [Comprehensive Concept of Northern Urban Planning: First Climatic Zone of the Country]* [Architecture Doctoral dissertation]. Moscow.

Saprykina, N. A. (1986). *Mobilnoe zhilishche dlya Severa [Mobile Housing for the North]*. Leningrad: Stroyizdat: Leningradskoe otdelenie.

Solovyev, D., Shilova, L., & Gulev, S. (2023). The problems of energy supply of the Russian Arctic remote territories. *Project Baikal, 20*(76), 60-65. https://doi.org/10.51461/issn.2309-3072/76.2147

Sukhanov, N. V. (2001). Gradostroitelnoe planirovanie razvitiya territoriy i poseleniy Severa [Urban planning for the development of territories and settlements in the North]. In *Gradostroitelstvo Rossii XXI veka: Sbornik statei RAASN* (pp. 80-85). Moscow: RAASN.

Volichenko, O. V., Ogorodnikov, S. N., & Khalil, I. (2024). Mobilnaya modulnaya sistema dlya trudnodostypnyh regionov [Mobile modular system for remote regions]. *Biosphere compatibility: people, region, technology*, 2, 76–87.

Younis, M., Kahsay, M. T., & Bitsuamlak, G. T. (2020). BIM-cfd integrated sustainable and resilient building design for northern architecture. *Ashrae Topical Conference Proceedings* (pp. 584-591).