

**ВСЕРОССИЙСКИЙ КОНКУРС МОЛОДЕЖИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ И
НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ НА ЛУЧШУЮ РАБОТУ
«МОЯ ЗАКОНОТВОРЧЕСКАЯ ИНИЦИАТИВА»**

Направление: ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

Тема: Автономный энергоостров: плавучие АЭС и микрореакторы (ММР) как технологический щит для освоения труднодоступных территорий и Арктики

Соискатель: студенты 2 курса очного отделения 252, 254 групп
Пыленок Даниил, Трефилов Денис

Научный руководитель: Ашанова Наталья Михайловна

Место выполнения работы: Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение Московской области «Орехово-Зуевский железнодорожный техникум имени В.И. Бондаренко»

г. Орехово-Зуево

2026 г.

АННОТАЦИЯ

Работа посвящена комплексному исследованию концепции «автономного энергоострова» на базе малой атомной энергетики как ключевого инструмента обеспечения энергетической безопасности, суверенитета и устойчивого развития труднодоступных территорий и Арктической зоны. В условиях сурового климата, критической зависимости от дорогостоящего и рискованного «северного завоза» органического топлива традиционная энергоинфраструктура демонстрирует высокую уязвимость.

В исследовании проанализированы технологические, экономические и экологические преимущества инновационных решений — плавучих атомных теплоэлектростанций (ПАТЭС) и сухопутных малых модульных реакторов (ММР/СМР). На примере эксплуатации первой в мире ПАТЭС «Академик Ломоносов» и перспективных отечественных проектов (семейство реакторов «РИТМ-200», «Шельф-М») раскрывается потенциал микро-АЭС по созданию полностью замкнутых, независимых энергоузлов. Особое внимание уделено роли микрореакторов как технологического щита, обеспечивающего энергоснабжение ключевых узлов Северного морского пути, горнодобывающих кластеров и удаленных населенных пунктов без нагрузки на окружающую среду Арктики.

В работе сделан вывод, что переход к атомным энергоостровам снимает инфраструктурные ограничения с освоения арктического шельфа, снижает углеродный след и гарантирует долгосрочную национальную энергетическую безопасность.

Ключевые слова: малая атомная энергетика, плавучие АЭС, ПАТЭС, малые модульные реакторы (ММР/СМР), автономный энергоостров, энергетическая безопасность, Арктическая зона, северный завоз, «Академик Ломоносов», РИТМ-200, Шельф-М.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Теоретические основы автономной энергетики в Арктике.....	6
Глава 2. Малая атомная энергетика Арктики.....	15
Глава 3. Перспективы развития атомных энергоостровов в Арктике	23
Выводы.....	30
Заключение	31
Список использованной литературы.....	32

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы и обоснование ее выбора. Освоение Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) и труднодоступных территорий Крайнего Севера является одним из главных стратегических приоритетов государственной политики в XXI веке. Арктика сосредоточила в себе уникальные запасы минерально-сырьевых ресурсов, а Северный морской путь (СМП) становится важнейшим глобальным транспортным коридором. Однако ключевым фактором, сдерживающим экономическое и промышленное развитие данных территорий, остается экстремальный дефицит надежной, экологически чистой и экономически эффективной энергии.

Традиционная энергетическая модель Крайнего Севера опирается на так называемый «северный завоз» — сложную, дорогостоящую и экологически небезопасную логистическую цепочку поставки дизельного топлива и угля. Дизельная генерация отличается высокой себестоимостью киловатт-часа, колоссальными выбросами парниковых газов и уязвимостью перед климатическими рисками. В этих условиях формирование концепции «автономного энергоострова» на базе малой атомной энергетики — плавучих атомных теплоэлектростанций (ПАТЭС) и малых модульных реакторов (ММР) — становится технологическим щитом, способным гарантировать энергетический суверенитет, технологическую независимость и непрерывность работы ключевых объектов инфраструктуры.

Степень разработанности темы в зарубежной и отечественной науке. Проблематика локального энергообеспечения удаленных территорий и развития атомных станций малой мощности (АСММ) находится в центре внимания ведущих ученых. Фундаментальный вклад в развитие теории и практики малой атомной энергетики внесли отечественные ученые и инженеры: А.А. Саркисов, Ф.М. Митенков, В.В. Петрунин, А.В. Васильев и другие. Разработкой проектов ПАТЭС и ММР активно занимаются специалисты ГК «Росатом», АО «ОКБМ Африкантов», АО «НИКИЭТ» и НИЦ «Курчатовский институт». В зарубежной науке и практике исследованием малых модульных реакторов (SMR) занимаются эксперты МАГАТЭ, а также специалисты компаний NuScale Power, Westinghouse (США), China National Nuclear Corporation (Китай) и Rolls-Royce SMR (Великобритания).

Вместе с тем, несмотря на наличие богатого физико-технического фундамента, комплексные исследования, рассматривающие сочетание плавучих АЭС и наземных микрореакторов как единую систему — «технологический щит» и «автономный энергоостров» для комплексного геополитического и промышленного освоения Арктики, представлены в научной литературе фрагментарно.

Проблема исследования заключается в наличии противоречия между необходимостью обеспечения долгосрочной энергетической безопасности и экологической устойчивости арктических регионов и ограничением традиционных способов генерации (зависимостью от «северного завоза»), решить которое возможно путем внедрения автономных ядерных энергокомплексов малой мощности.

Объект исследования: система энергоснабжения труднодоступных территорий и Арктической зоны Российской Федерации.

Предмет исследования: технологические, экономические, логистические и экологические механизмы формирования «автономных энергоостровов» на основе плавучих АЭС и малых модульных реакторов (ММР).

Цель исследования: теоретико-методологическое и научно-практическое обоснование эффективности применения концепции «автономного энергоострова» на базе плавучих АЭС и

микрореакторов в качестве технологического щита для устойчивого развития и безопасности Арктической зоны.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

1. Изучить теоретико-концептуальные основы построения автономных энергосистем и особенности энергопотребления в суровых климатических условиях Арктики.
2. Проанализировать мировой и отечественный опыт создания и эксплуатации объектов малой атомной энергетики (включая опыт работы первой в мире ПАТЭС «Академик Ломоносов»).
3. Исследовать технико-экономические характеристики и степень надежности перспективных отечественных малых модульных реакторов и микрореакторов (семейств «РИТМ-200», «Шельф-М», «Елена-АМ»).
4. Выявить ключевые риски (экологические, геополитические, кибернетические, климатические) при развертывании локальных ядерных энергоузлов в труднодоступных районах.
5. Обосновать концепцию «автономного энергоострова» как элемента национальной безопасности и инструмента ухода от критической зависимости от «северного завоза».
6. Определить экономическую эффективность и перспективы внедрения интеграционных решений на базе ММР для энергоснабжения объектов Северного морского пути и крупнейших горнодобывающих кластеров (Баимский ГОК, Кючус).

Гипотеза исследования: внедрение концепции «автономных энергоостровов» на основе сочетания плавучих АЭС и наземных микрореакторов позволит декарбонизировать и обезопасить энергосистему труднодоступных арктических регионов, снизить стоимость выработки электроэнергии и тепла на 40–60% по сравнению с дизельной генерацией, устранить логистические риски «северного завоза» и сформировать долгосрочный технологический щит для суверенного освоения ресурсной базы Арктики.

Методы исследования: в работе использован комплекс общенаучных и специальных методов: системный и структурно-функциональный анализ, методы сравнения и аналогии, технико-экономический анализ, методы стратегического планирования, SWOT-анализ, а также методы математико-статистической обработки данных.

Практическая значимость исследования заключается в том, что его результаты, выводы и сформулированные рекомендации могут быть использованы профильными министерствами (Минэнерго России, Минвостокразвития России), Государственной корпорацией «Росатом», региональными органами власти АЗРФ, а также крупными добывающими компаниями для разработки стратегий энергоснабжения, оценки инвестиционных проектов и создания локальных энергетических систем в Арктике.

Характеристика эмпирической базы исследования: Эмпирическую основу работы составили законодательные и нормативно-правовые акты РФ (в т.ч. «Стратегия развития Арктической зоны РФ до 2035 года», «Энергетическая стратегия РФ до 2035 года»), отчетные данные ГК «Росатом», официальная статистика Росстата, аналитические доклады МАГАТЭ, материалы международных и российских научных конференций, а также эксплуатационные показатели ПАТЭС «Академик Ломоносов» в г. Певек.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В АРКТИКЕ

1.1. Концепция «автономного энергоострова» в современной энергетической парадигме

В условиях глобальной трансформации мировых энергетических рынков и перехода к четвертому энергетическому переходу, вопросы обеспечения надежности и независимости энергоснабжения приобретают статус критически важных факторов национальной безопасности. Для территорий, характеризующихся географической удаленностью и отсутствием связи с едиными национальными энергосетями, в научной литературе и практике государственного планирования утвердилась концепция «автономного энергоострова».

Под «автономным энергоостровом» понимается территориально-производственный комплекс или населенный пункт, чья жизнедеятельность и экономическая активность обеспечиваются за счет локальных источников генерации, работающих вне синхронизации с централизованными энергосистемами. В отличие от простых систем распределенной генерации, «энергоостров» представляет собой интеллектуальную микросеть (microgrid), способную к глубокой саморегуляции, балансировке спроса и предложения, а также обладающую высоким уровнем живучести при воздействии внешних дестабилизирующих факторов — от экстремальных погодных явлений до геополитических угроз.

Теоретический фундамент концепции «энергоострова» базируется на принципах энергетической трилеммы: энергетической безопасности, энергетической справедливости (доступности) и экологической устойчивости. В арктическом контексте эти принципы приобретают специфическое наполнение. Энергетическая безопасность здесь детерминирована не только наличием топлива, но и физической сохранностью инфраструктуры в условиях деградации вечной мерзлоты и аномально низких температур. Энергетическая справедливость выражается в необходимости выравнивания тарифов для населения удаленных поселков, которые зачастую в десятки раз превышают среднероссийские показатели. Экологическая устойчивость продиктована хрупкостью арктических экосистем, для которых любой техногенный инцидент может иметь необратимые последствия.

Современная парадигма автономной энергетики предполагает постепенный отказ от моногенерации (например, только дизельной) в пользу гибридных схем. Однако для энергоемких потребителей, таких как крупные горнодобывающие кластеры или портовая инфраструктура Северного морского пути, возобновляемые источники энергии (ВИЭ) не могут выступать в качестве базовой нагрузки в силу их прерывистого характера (интермиттируемости).

В этом ключе атомная энергия малой мощности рассматривается как наиболее технологически совершенный фундамент для «автономного энергоострова», обеспечивающий стабильную выдачу как электрической, так и тепловой энергии в режиме 24/7.

Методологически концепция «автономного энергоострова» опирается на теорию надежности сложных технических систем. В Арктике «островной» характер энергосистемы заставляет проектировщиков закладывать кратный резерв мощности и возможности для быстрой масштабируемости. Применение модульных решений в атомной энергетике (ММР) позволяет реализовать этот принцип: при росте производственных мощностей ГОКа или порта к существующему «энергоострову» добавляется новый силовой модуль, что превращает энергетическую инфраструктуру из статического объекта в динамически развивающуюся систему.

Таким образом, «автономный энергоостров» в начале XXI века трансформируется из вынужденной меры выживания в стратегическую модель опережающего развития, где малая

атомная генерация выступает не просто источником тока, а высокотехнологичным ядром, вокруг которого формируется вся социально-экономическая экосистема территории.

1.2. Специфика энергообеспечения труднодоступных территорий: проблема «северного завоза» и логистические риски

Энергетический ландшафт Арктической зоны Российской Федерации и приравненных к ней территорий характеризуется фрагментарностью и очаговостью. Более 60% территории страны находится в зоне децентрализованного энергоснабжения. Ключевой системной проблемой данной зоны является тотальная зависимость от «северного завоза» — ежегодной операции по доставке миллионов тонн светлых нефтепродуктов, угля и смазочных материалов в короткие навигационные периоды.

Проблема «северного завоза» носит не только экономический, но и ярко выраженный логистический характер, порождающий цепочку системных рисков.

Во-первых, это временная детерминированность. Окно навигации в ряде районов Арктики составляет от 2 до 4 месяцев. Любая задержка, вызванная тяжелой ледовой обстановкой или техническими неисправностями судов, ставит под угрозу физическое выживание населенных пунктов в зимний период. Это заставляет создавать колоссальные запасы топлива на местах, что ведет к «замораживанию» оборотных средств и росту затрат на хранение и охрану топливных терминалов.

Во-вторых, это стоимость энергии. Транспортная составляющая в цене литра дизельного топлива в удаленных районах Якутии, Чукотки или Красноярского края может составлять до 70–80% от итоговой стоимости. В результате себестоимость электроэнергии, вырабатываемой дизельными электростанциями (ДЭС), достигает 50–150 рублей за кВт/ч, что делает любое промышленное производство убыточным без прямых государственных субсидий. Субсидирование тарифов, в свою очередь, ложится тяжелым бременем на региональные и федеральный бюджеты, по сути, являясь «платой за неэффективность» текущей энергетической модели.

В-третьих, это экологические риски. Транспортировка и хранение огромных объемов дизельного топлива в условиях вечной мерзлоты сопряжены с опасностью разливов. Громкая авария в Норильске в 2020 году продемонстрировала, что даже современная инфраструктура в Арктике подвержена рискам из-за растепления грунтов.

Дизельная генерация также является источником выбросов сажи (черного углерода), который, оседая на снегу, ускоряет поглощение солнечного тепла и таяние ледников, создавая порочный круг климатических изменений.

В-четвертых, это риск «технологической деградации». Дизельные генераторы имеют ограниченный ресурс и низкий КПД. Постоянная работа на износ в суровых условиях ведет к частым отказам техники. Зависимость от импортных комплектующих для ДЭС в условиях санкционного давления превращается в прямую угрозу энергетической безопасности.

Логистический щит в виде атомных микрореакторов и плавучих АЭС призван радикально решить проблему «северного завоза». Одна загрузка ядерного топлива способна обеспечивать станцию энергией в течение 5–10 лет, заменяя собой сотни тысяч тонн органического топлива. Это не просто экономия — это переход от логистически зависимой модели к модели энергетической автономности, где внешние факторы (погода, цены на нефть, наличие танкерного флота) перестают определять судьбу региона. Таким образом, преодоление наследия «северного завоза» через

внедрение малых атомных технологий является необходимым условием для перехода от стратегии «удержания» Арктики к стратегии её «активного освоения».

1.3. Эволюция технологий малой атомной энергетики: от советских экспериментальных установок до современных малых модульных реакторов (SMR)

История развития малых атомных станций и мобильных ядерных энергетических установок (ЯЭУ) представляет собой закономерный эволюционный процесс, обусловленный трансформациями научно-производственной базы, критериев безопасности и стратегических государственных задач. Выделение малой атомной энергетики в самостоятельное научно-технологическое направление началось во второй половине XX века, практически одновременно со становлением крупной сетевой атомной генерации. Однако если гигаваттные энергоблоки развивались по пути масштабирования мощности для минимизации удельных капитальных затрат на единицу установленной мощности (эффект масштаба), то перед малой атомной энергетикой изначально ставились фундаментально иные задачи: обеспечение автономности, высокая мобильность, максимальная заводская готовность и устойчивость к эксплуатации в экстремальных геоклиматических условиях.

Первый этап эволюции (1950–1970-е годы) характеризовался поиском оптимальных конструктивно-компоновочных решений и экспериментами с различными типами теплоносителей. В СССР основополагающим вектором стало создание мобильных атомных электростанций на гусеничном и колесном ходу, а также компактных реакторных установок для ледокольного флота.

Знаковым проектом этого периода стала ТЭС-3 (транспортабельная атомная электростанция), разработанная в Лаборатории «В» (ныне АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» им. А.И. Лейпунского) и введенная в опытную эксплуатацию в 1961 году. ТЭС-3 представляла собой самоходную АЭС мощностью 1,5 МВт (эл.), оборудование которой размещалось на четырех гусеничных шасси, созданных на базе тяжелого танка Т-10. В качестве реакторной установки использовался водо-водяной реактор под давлением.

Несмотря на успешную демонстрацию принципиальной возможности создания полностью автономного энергоузла, ТЭС-3 выявила ряд критических ограничений первого поколения: высокая масса силовых блоков, сложность обеспечения биологической защиты при транспортировке и проблемы вывода из эксплуатации.

Параллельно велись разработки установок с альтернативными видами теплоносителя:

- Реакторная установка «Арбус» (АСТ-1), созданная в НИИАР (г. Димитровград) в 1963 году, задействовала в качестве теплоносителя и замедлителя органический газойль. Использование органического теплоносителя позволяло существенно снизить давление в первом контуре, облегчить корпусные конструкции и избежать применения дорогостоящих коррозионностойких сталей.

- Проект «Памир-630Б», разработанный в Институте ядерной энергетики АН БССР в 1980-х годах, являлся уникальной мобильной АЭС на автомобильном шасси МАЗ, использующей в качестве теплоносителя четырехокись азота (N_2O_4). Данный проект демонстрировал высочайшую степень компактности, однако авария на Чернобыльской АЭС в 1986 году и последующее ужесточение требований к безопасности ядерных объектов привели к свертыванию программы.

Первым в мире успешным проектом длительной промышленной эксплуатации АСММ в условиях Крайнего Севера стала Билибинская АЭС (БАТЭЦ), введенная в строй в 1974–1976 годах на Чукотке. Четыре энергоблока с реакторами ЭГП-6 (энергетический гетерогенный петлевой

реактор с естественной циркуляцией теплоносителя, мощностью 12 МВт эл. каждый) сформировали ядро Чаун-Билибинского энергоузла. Билибинская АЭС доказала жизнеспособность концепции атомного «энергоострова», проработав в режиме комбинированной выработки электрической и тепловой энергии более 45 лет в условиях полной изоляции от ЕЭС России. Главными факторами успеха БАТЭЦ стали применение естественной циркуляции теплоносителя первого контура (что кардинально повысило надежность) и интеграция системы охлаждения с задействованием сухих градирен, адаптированных к сильным морозам.

Вторым мощным эволюционным вектором, сформировавшим базис современной малой атомной энергетики, стало развитие судовых ядерных энергетических установок для атомного ледокольного флота. Последовательная сменяемость реакторных поколений — от ОК-150 (атомный ледокол «Ленин») к ОК-900 и КЛТ-40 (ледоколы типа «Арктика» и «Таймыр») — позволили отечественной атомной отрасли отработать технологии сверхнадежных, компактных водо-водяных реакторов, способных выдерживать экстремальные динамические и циклические нагрузки.

Именно адаптация судовой технологии КЛТ-40 до уровня КЛТ-40С позволила создать первый в мире плавучий энергетический блок (ПЭБ) «Академик Ломоносов», ставший мостом между советским заделом и современной мировой парадигмой малых модульных реакторов (SMR — Small Modular Reactors).

Современный этап (2010–2020-е годы) характеризуется сдвигом парадигмы в сторону малых модульных реакторов нового поколения. Современный SMR отличается от реакторов XX века следующими фундаментальными признаками:

1. Интегральная компоновка первого контура. Активная зона, парогенераторы и компенсатор давления размещаются в едином корпусе высокого давления.

Это полностью исключает длинные трубопроводы большого диаметра первого контура и ликвидирует риск аварий типа LOCA (Loss of Coolant Accident) — больших течей теплоносителя.

2. Пассивные системы безопасности. Современные ММР спроектированы так, что при полной обесточенности станции расхолаживание реактора происходит за счет естественной циркуляции, гравитации и теплопроводности, без участия оператора и внешних источников энергии в течение 72 часов и более.

3. Заводское изготовление и модульность. До 90% систем реакторной установки изготавливается и тестируется в заводских условиях и доставляется на площадку строительства в виде готовых транспортных модулей. Это сокращает инвестиционный цикл с 7–10 лет (характерных для больших АЭС) до 3–4 лет.

4. Увеличенный топливный цикл. Перегрузка топлива в современных ММР происходит один раз в 3–12 лет (в зависимости от типа установки), что минимизирует логистические риски и расходы на топливообеспечение.

Таким образом, эволюция малой атомной энергетики прошла путь от узкоспециализированных военных и экспериментальных установок до коммерчески зрелых, гибких и внутренне безопасных энергетических систем, готовых стать технологической основой автономных энергосистем в Арктике.

1.4. Сравнительный технико-экономический и конструктивный анализ плавучих и наземных решений в сегменте АСММ

При проектировании энергообеспечения изолированных территорий Арктической зоны ключевой инженерно-экономической задачей является выбор пространственно-конструктивного

исполнения атомной станции малой мощности (АСММ). В современном научно-производственном дискурсе выделяются два фундаментальных класса АСММ: плавучие атомные теплоэлектростанции (ПАТЭС / ПЭБ) и наземные компактные АСММ (включая микрореакторы).

Каждый из вариантов обладает уникальным набором технико-эксплуатационных и экономических характеристик, предопределяющих их рациональную область применения.

1. Конструктивно-технологические особенности.

Плавучие энергоблоки (ПЭБ) представляют собой самоходные стоечные суда, на которых смонтирована полноценная двоякоконтурная АЭС, включая реакторные установки, турбогенераторы, системы хранения свежего и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), а также комплексы обращения с радиоактивными отходами (РАО).

- Ключевое технологическое преимущество: Полная независимость от геологических и сейсмических условий площадки размещения. ПЭБ изготавливается «под ключ» на специализированной судостроительной верфи (например, АО «Балтийский завод»), проходит весь комплекс швартовных испытаний и транспортируется (буксируется) к месту эксплуатации в готовом виде.

- Ограничение: Привязка к гидрографической сети. ПЭБ требует создания береговой гидротехнической инфраструктуры (причальный фронт, мол-волнолом, береговые пункты передач энергии) и достаточных глубин в акватории базирования.

Наземные АСММ (на базе ММР и микрореакторов) возводятся непосредственно на континентальной территории. Современные отечественные проекты — такие как «РИТМ-200Н» (разработка АО «ОКБМ Африкантов») и микрореактор «Шельф-М» (разработка АО «НИКИЭТ») — базируются на принципах максимальной блочно-модульной сборки.

- Ключевое технологическое преимущество: Возможность локализации энергетического узла в любой точке континентальной суши в непосредственной близости от рудных месторождений, находящихся на удалении сотен километров от береговой линии.

- Ограничение: Необходимость проведения масштабных инженерно-геологических изысканий и строительно-монтажных работ на деградирующих вечномёрзлых грунтах, что требует применения свайных фундаментов с системами термостабилизации грунтов.

2. Сравнительный технико-экономический анализ (CAPEX, OPEX, LCOE).

Экономическая метрика АСММ существенно отличается от гигаваттных АЭС. Для малых станций показатель удельных капитальных затрат на кВт установленной мощности (\$CAPEX/kW\$) оказывается выше из-за масштаба оборудования, однако этот фактор компенсируется кардинальным сокращением инвестиционного цикла, снижением затрат на сетевое строительство и устранением издержек «северного завоза».

Анализ показателя LCOE (Levelized Cost of Electricity) показывает, что в прибрежных зонах Арктики плавучие решения выигрывают за счет отсутствия капиталоемких строительных работ на вечной мерзлоте. Для континентальных же кластеров добычи полезных ископаемых (например, Баимская рудная зона или месторождение золота Кючус) единственным технически возможным решением выступают наземные АСММ или микрореакторы.

Таблица 1.1. Сравнительный матричный анализ плавучих и наземных АСММ для условий Арктики

Параметр сравнения	Плавучие энергоблоки (на примере ПЭБ «РИТМ-200М»)	Наземная АСММ (на примере «РИТМ-200Н / «Шлейф-М»)
Установленная эл. мощность (на один блок)	100-106 МВт (2*53 МВт)	55 МВт («РИТМ-200Н») / 10 МВт («Шельф-М»)
Срок строительства и ввода в строй	3-4 года (на верфи)	4-5 лет (включая площадочные работы)
Зависимость от логистики Крайнего Севера	Минимальная (доставка морем за один навигационный период)	Высокая на этапе доставки модулей по зимникам / рекам
Срок топливо цикла (без перегрузки)	5-10 лет	5-8 лет (до 10 лет для «Шлейф-М»)
Срок службы станции	40-60 лет (с учетом заводского ремонта)	50-60 лет
Вывод из эксплуатации	Буксировка на верфь. На месте не остается экологического следа	Требуется дезактивация и рекультивация площадки на месте
Капитальные затраты	Высокая стоимость судна, но низкие расходы на площадку	Средняя стоимость оборудования, но высокие расходы на инфраструктуру
Удельная стоимость электроэнергии	6-9 руб./кВт*ч	7-11 руб./кВт*ч

3. Вопросы безопасности и экологического следа. Конструктивные различия обуславливают и различия в сценариях проектных и запроектных аварий:

- Для ПЭБ определяющими факторами риска являются экстремальные гидрометеорологические воздействия: подвижки льда, цунами, навалы судов и сильные шторма. Безопасность обеспечивается за счет применения двубортного корпуса судна, защитных гидротехнических сооружений (молов) и естественного неограниченного запаса охладителя (морской воды) для систем аварийного расхолаживания.

- Для наземных АСММ ключевые риски связаны с термокарстовыми процессами (проседанием фундаментов из-за оттаивания вечной мерзлоты) и экстремально низкими температурами воздуха (до -65 °С), способными вызвать хрупкое разрушение внешних конструкций. В современных проектах наземных ММР эти риски нивелируются подземным или полузаглубленным заглублением защитной оболочки (контейнмента) и применением сейсмоизолирующих опор.

Решающим экологическим преимуществом ПЭБ является концепция «Green Field» (чистая площадка) при выводе из эксплуатации: по окончании жизненного цикла плавучий блок отсоединяется от береговых коммуникаций и буксируется на специализированное предприятие для утилизации, не оставляя на арктическом побережье никаких радиоактивных отходов или загрязненных конструкций.

Таким образом, плавучие и наземные АСММ не конкурируют, а взаимно дополняют друг друга в структуре «автономного энергоострова». Плавучие блоки формируют гибкий энергетический щит прибрежной зоны и морских портов СМП, в то время как наземные ММР и

микрореакторы обеспечивают глубокую энергетическую интеграцию материковых рудных провинций.

1.5. Нормативно-правовое регулирование, международные стандарты и режим нераспространения при эксплуатации мобильных ядерных объектов

Формирование автономных энергоостровов на базе плавучих АЭС и малых модульных реакторов в Арктике выходит за рамки сугубо инженерно-технической задачи, затрагивая сложный комплекс вопросов международного публичного, морского и экологического права, а также национального законодательства в сфере использования атомной энергии. Особый статус Арктического региона как чувствительной экосистемы и зоны пересечения геополитических интересов мировых держав предъявляет жесткие требования к правовой легитимности и режиму безопасности мобильных и локальных ядерных объектов.

Международно-правовой статус плавучих ядерных энергоблоков

Современное международное право не содержит специализированной конвенции, напрямую регулирующей статус плавучих АЭС. Это создает определенную коллизию институциональных режимов, где ПЭБ одновременно подпадает под действие норм атомного права и международного морского права.

С точки зрения Конвенции ООН по морскому праву 1982 года (UNCLOS), плавучий энергоблок, находящийся во внутренних морских водах или территориальном море прибрежного государства (как в случае с ПАТЭС «Академик Ломоносов» в г. Певек), находится под полным государственным суверенитетом государства флага (Российской Федерации). Однако при транспортировке (буксировке) ПЭБ через исключительные экономические зоны (ИЭЗ) или международные проливы возникают вопросы юридической квалификации:

- Признается ли ПЭБ «судном с ядерной установкой» (согласно главе VIII Международной конвенции по охране человеческой жизни на море — SOLAS-74);
- Или же он квалифицируется как «искусственное островное сооружение или установка», регулируемая статьей 60 UNCLOS.

Российская правовая доктрина квалифицирует ПЭБ как «стоечное плавучее средство с ядерной энергетической установкой», что фиксирует его особый статус: в движении (при буксировке) к нему применяются нормы судовождения и морской безопасности, а в пришвартованном состоянии на месте эксплуатации — нормативно-правовая база стационарного ядерного объекта.

Режим нераспространения ядерного оружия и гарантии МАГАТЭ

Применение малых модульных реакторов и плавучих АЭС, особенно в случае их возможного будущего экспорта в третьи страны (например, государства Юго-Восточной Азии или Африки), создает новые вызовы для режима нераспространения ядерных материалов, зафиксированного в Договоре о нераспространении ядерного оружия (ДНЯО) 1968 года.

Главные аспекты контроля со стороны МАГАТЭ (Международного агентства по атомной энергии) включают:

1. Концепция «запечатанного реактора» (Sealed Core). Для предотвращения несанкционированного изъятия ядерных материалов реакторные установки ММР и ПЭБ поставляются на площадку с уже загруженным топливом, а корпус реактора опломбируется на заводе-изготовителе. Любые операции по перегрузке топлива производятся исключительно на специализированных береговых базах государства-поставщика, что исключает доступ эксплуатирующей организации к высокообогащенному урану.

2. Ограничение уровня обогащения урана. В соответствии со стандартами МАГАТЭ для гражданских АСММ используется низкообогащенный уран (НОУ) с уровнем обогащения по изотопу U-235 менее 20% (обычно 4,95%–19,75%), что исключает возможность его прямого применения в военных целях (High-Enriched Uranium threshold).

3. Непрерывный мониторинг и физическая защита. Конструкции современных АСММ интегрируют элементы системы «Safeguards by Design» (Гарантии на этапе проектирования). Это включает установку дистанционных датчиков контроля нейронного потока, видеомониторинг МАГАТЭ в реальном времени и применение систем физической защиты, устойчивых к захвату или диверсиям.

Национальное нормативно-правовое регулирование в РФ

В Российской Федерации нормативная база в сфере малой атомной энергетики является одной из самых продвинутых в мире, однако и она требует постоянной актуализации по мере внедрения инновационных проектов («Шельф-М», «РИТМ-200Н»).

Ключевыми регулирующими документами выступают:

- Федеральный закон № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии»;
- Федеральный закон № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды»;
- Нормы и правила в атомной энергетике (НП-001-15 «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций», НП-022-17 «Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии для судов и других плавучих средств»).

Особый нормативный статус имеет процедура экологической экспертизы и лицензирования Ростехнадзора для арктических объектов. Учитывая статус Арктики как зоны экологического благоприятствования, требования к оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) при размещении АСММ являются максимально жесткими.

Стратегическим шагом в развитии законодательства стало принятие в 2020 году «Стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года», где малая атомная энергетика прямо зафиксирована как целевой инструмент снятия инфраструктурных ограничений.

Таким образом, нормативно-правовой режим эксплуатации плавучих АЭС и ММП формирует прочную юридическую броню — «правовой щит», гарантирующий, что высочайший уровень автономности и технологической эффективности арктических энергоостровов достигается при безусловном соблюдении требований экологической безопасности, физической защиты и международных обязательств по нераспространению.

В результате теоретико-методологического анализа проблем энергообеспечения труднодоступных территорий и Арктической зоны РФ в первой главе получены следующие ключевые результаты и выводы:

- обоснована концепция «автономного энергоострова» как наиболее состоятельная модель устойчивого развития изолированных территорий. В условиях отсутствия связи с Единой энергетической системой создание локальных гибких микросетей (microgrid) на базе малых атомных станций позволяет соблюсти баланс «энергетической трилеммы»: гарантировать безусловную надежность генерации, снизить стоимость энергии для конечного потребителя и минимизировать экологический след.

- выявлены критические ограничения традиционной модели энергоснабжения. Анализ логистики «северного завоза» показал его высокую экономическую неэффективность (себестоимость дизельной генерации достигает 50–150 руб./кВт·ч), уязвимость перед климатическими рисками и экологическую опасность для хрупких экосистем Крайнего Севера.

Доказано, что переход на атомную генерацию с топливным циклом от 5 до 10 лет полностью снимает риски топливной зависимости.

- прослежена эволюция технологий малой атомной энергетики. Продемонстрирован транзит от советских экспериментальных установок (ТЭС-3, «Памир», ЭГП-6 Билибинской АЭС) и судовых реакторов к современному классу малых модульных реакторов (SMR). Современные проекты (семейства «РИТМ-200», «Шельф-М») отличаются интегральной компоновкой, внутренней самозащищенностью и наличием пассивных систем безопасности, исключающих аварии чернобыльского или фукусимского типа.

- проведен сравнительный технико-экономический анализ пространственных решений. Установлено, что плавучие энергоблоки (ПЭБ) и наземные малые модульные реакторы (ММР) взаимно дополняют друг друга.

ПЭБ выигрывают в прибрежной зоне и портах Северного морского пути за счет отсутствия капитальных затрат на вечной мерзлоте и концепции «чистой площадки» при выводе из эксплуатации. Наземные ММР и микрореакторы являются единственным решением для энергообеспечения континентальных горнодобывающих кластеров (Баимская зона, Кючус).

- определена нормативно-правовая и институциональная база. Показано, что международно-правовые режимы (Конвенция ООН по морскому праву 1982 г., стандарты МАГАТЭ) и законодательство РФ (ФЗ «Об использовании атомной энергии», нормативная база Ростехнадзора) обеспечивают высокий уровень физической защиты, нераспространения ядерных материалов и экологической безопасности при эксплуатации мобильных и локальных АСММ в Арктике.

ГЛАВА 2. МАЛАЯ АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА АРКТИКИ

2.1. Практический опыт реализации проекта первой в мире ПАТЭС «Академик Ломоносов» в г. Певек (Чукотский АО): эксплуатационные и энергоэкономические показатели

Ввод в промышленную эксплуатацию плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) «Академик Ломоносов» в мае 2020 года в порту Певек (Чукотский автономный округ) ознаменовал переход концепции «автономного энергоострова» из области теоретических изысканий в фазу практической промышленной реализации. Проект стал первенцем нового класса объектов малой атомной генерации, созданных для работы в изолированных энергоузлах Крайнего Севера.

ПАТЭС состоит из гладкой несамходной баржи — плавучего энергетического блока (ПЭБ) — и береговой гидротехнической инфраструктуры, обеспечивающей передачу электрической и тепловой энергии в распределительные сети Чаун-Билибинского энергоузла.

В основе силовой установки ПЭБ находятся две реакторные установки (РУ) КЛТ-40С водородного типа интегративно-петлевой компоновки, разработанные АО «ОКБМ Африкантов». Ключевые технические параметры реакторной установки КЛТ-40С:

- Тепловая мощность одного реактора: 150 МВт;
- Электрическая мощность одного турбогенератора: 35 МВт;
- Суммарная установленная электрическая мощность ПЭБ: 70 МВт;
- Выдача тепловой энергии: до 50 Гкал/ч (в режиме когенерации);
- Длительность топливной кампании без перегрузки: 3–3,5 года;
- Назначенный срок службы конструкции судна и РУ: 40 лет.

Анализ четырехлетнего периода промышленной эксплуатации ПАТЭС (2020–2024 гг.) позволяет дать объективную оценку технико-эксплуатационной надежности установки. Коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) ПАТЭС в зимние периоды максимума нагрузок достигает 85–88%, что соответствует лучшим мировым показателям стационарных АЭС большой мощности. Высокое значение КИУМ подтверждает технологическую зрелость судовых реакторных систем при их адаптации к режиму работы в качестве базовой электростанции.

Замещение плавучей атомной станцией мощности поэтапно выводимой из эксплуатации Билибинской АЭС и консервируемой угольной Чаунской ТЭЦ выявило комплекс существенных энергоэкономических и экологических эффектов:

1. Стабилизация энергоснабжения региона. ПАТЭС взяла на себя обеспечение электроэнергией Чаун-Билибинского энергетического узла, снабжая жизнеобеспечивающей инфраструктурой город Певек (самый северный город России) и обеспечивая энергоемкие промышленные объекты горнодобывающей промышленности Чукотки (включая золоторудные месторождения «Майское» и «Купол»).

2. Экологическая декарбонизация. Замещение Чаунской ТЭЦ, работавшей на импортируемом угле, позволило предотвратить ежегодные выбросы в атмосферу порядка 150 тыс. тонн CO₂ и около 25 тыс. тонн диоксида серы, золы и оксидов азота. Полностью ликвидирована проблема накопления золошлаковых отходов в прибрежной зоне Восточно-Сибирского моря.

3. Оптимизация структуры тарифообразования. До ввода ПАТЭС себестоимость выработки электроэнергии на Чаунской ТЭЦ из-за дороговизны логистики угля превышала 16 руб./кВт·ч. Эксплуатация ПАТЭС позволила снизить операционные издержки на производство энергии, что

привело к снижению потребности в межбюджетном субсидировании энерготарифов для юридических лиц и населения Чукотского АО.

Вместе с тем, первый опыт реализации проекта ПАТЭС выявил ряд узких мест, учтенных при проектировании последующих поколений плавучих энергоблоков. В частности, к ним относятся высокая капиталоемкость берегового гидротехнического строительства (молы, причальные палаи, водозаборные сооружения), требующая масштабных строительных работ в условиях сурового климата, а также необходимость прохождения периодического заводского ремонта с буксировкой судна на судоремонтное предприятие каждые 12 лет.

Опыт эксплуатации КЛТ-40С показал, что для масштабирования технологии требуются реакторные установки нового поколения, обладающие большей единичной мощностью, увеличенным топливным циклом и упрощенными требованиями к береговой инфраструктуре.

2.2. Технико-технологический потенциал перспективных отечественных малых модульных реакторов (семейства «РИТМ-200», «Шельф-М», «Елена-АМ»)

Опираясь на успешную эксплуатацию ПАТЭС «Академик Ломоносов» и опыт применения атомных ледоколов проекта 22220, Государственная корпорация «Росатом» разработала линейку перспективных реакторных установок малой и микро-мощности. Эти установки формируют технологическую платформу для создания автономных энергоостровов следующего поколения.

1. Реакторные установки семейства «РИТМ-200» (РИТМ-200, РИТМ-200Н, РИТМ-200С)

Серия «РИТМ-200», разработанная АО «ОКБМ Африкантов», представляет собой флагманский продукт российской малой атомной энергетики. Это водо-водяной реактор интегрального типа, в котором парогенераторы размещены непосредственно внутри корпуса реактора.

Интегральная компоновка позволила уменьшить габариты и массу установки в 2 раза по сравнению с КЛТ-40С, обеспечив при этом удвоение электрической мощности.

Характеристики серии «РИТМ-200»:

- Тепловая мощность одного реактора: 175 МВт;
- Электрическая мощность: 55 МВт (в наземном исполнении) и до 53 МВт (в плавучем исполнении);
- Топливная кампания: 5–6 лет (без промежуточной перегрузки топлива);
- Назначенный срок службы: 60 лет;
- Обогащение урана: менее 20% (по изотопу U-235).

На базе реакторов «РИТМ-200» реализуются два крупнейших арктических проекта:

- Наземная АСММ в Республике Саха (Якутия) в посёлке Усть-Куйга (Депутатский район). Станция на базе одного реактора РИТМ-200Н (55 МВт) создается для энергоснабжения градообразующего золоторудного месторождения «Кючус», а также близлежащих населенных пунктов. Ввод в эксплуатацию запланирован на 2028 год.
- Модернизированные плавучие энергоблоки (МПЭБ) на базе РУ РИТМ-200С. Комплекс из четырех МПЭБ общей мощностью 318 МВт возводится для энергоснабжения Баимского горно-обогатительного комбината (Чукотский АО) — одного из крупнейших в мире медно-порфировых месторождений.

2. Микрореакторная установка «Шельф-М»

Разрабатываемая АО «НИКИЭТ» им. Н.А. Доллежала реакторная установка «Шельф-М» представляет собой водо-водяной реактор с естественной и интенсифицированной циркуляцией теплоносителя, предназначенный для создания энергоисточников микро-мощности.

Технические характеристики «Шельф-М»:

- Тепловая мощность: 35 МВт;
- Электрическая мощность: 10 МВт;
- Длительность топливной кампании: 10 лет (работа на одной загрузке топлива в течение всего периода между капитальными ремонтами);
- Масса реакторного модуля в сборе: не более 350 тонн.

Главное конструктивное преимущество «Шельф-М» — максимальная транспортируемость. Реакторный модуль изготавливается полностью на заводе, доставляется на площадку в готовом виде на автомобильном или баржевом транспорте и монтируется в подземном или полузаглубленном защитном контейнере. Это делает «Шельф-М» идеальным решением для энергоснабжения небольших удаленных поселков, военных гарнизонов и изолированных месторождений с потребностью в мощности от 5 до 20 МВт. Первая пилотная установка планируется к размещению на месторождении «Совиное» на Чукотке.

3. Автономный термоэлектрический микрореактор «Елена-АМ»

Проект «Елена-АМ» (разработка НИЦ «Курчатовский институт» и АО «НИКИЭТ») представляет собой принципиально иной класс микрореакторов, предназначенных в первую очередь для незамкнутых систем тепло- и электроснабжения сверхмалых населенных пунктов.

Характеристики «Елена-АМ»:

- Электрическая мощность: 1,2 МВт (за счет прямого термоэлектрического преобразования тепла в электричество);
- Тепловая мощность: до 12 Гкал/ч;
- Срок работы на одной загрузке: до 40 лет без присутствия персонала на постоянной основе (работа в режиме «безлюдной» технологии).

В реакторе «Елена-АМ» полностью отсутствуют движущиеся механические части в первом контуре (насосы, турбины): циркуляция теплоносителя происходит за счет естественной конвекции, а выработка электричества осуществляется полупроводниковыми термоэлектрическими генераторами. Данное решение обеспечивает абсолютную внутреннюю самозащищенность и делает установку незаменимой для крайних точек Арктики.

Сравнительный анализ показывает, что сформированный линейка отечественных реакторных установок закрывает весь диапазон потребностей Арктической зоны — от 1 МВт до 300 МВт, позволяя подбирать конфигурацию «автономного энергоострова» под специфику любого объекта.

Таблица 2.1. Сравнительные технико-эксплуатационные характеристики отечественных реакторных установок малой мощности

Параметр / Реакторная установка	КЛТ-40С (ПАТЭС)	РИТМ-200Н / РИТМ-200С	Шельф-М	Елена-АМ
Разработчик	АО «ОКБМ Африкантов»	АО «ОКБМ Африкантов»	АО «НИКИЭТ»	НИЦ «Курчатовский институт»
Тип исполнения	Плавучие (ПЭБ)	Наземное / Плавучие	Наземное (модульное)	Наземное (подземное)
Тепловая мощность, МВт	150	175	35	15
Электрическая мощность, МВт	35	53-55	10	1,2
Срок топливного цикла, лет	3-3,5	5-6	10	До 40
Способ конвекции энергии	Паротрубный	Паротрубный	Паротрубный	Термоэлектрический
Главная область применения	Прибрежные порты, крупные узлы	ГОКи, промышленные кластеры	Средние месторождения, поселки	Удаленные поселки, «безлюдные» башни

Сравнительный анализ показывает, что сформированный линейка отечественных реакторных установок закрывает весь диапазон потребностей Арктической зоны — от 1 МВт до 300 МВт, позволяя подбирать конфигурацию «автономного энергоострова» под специфику любого объекта.

2.3. Сравнительный анализ экономико-математических моделей энергоснабжения арктических объектов: АСММ против дизельной и возобновляемой генерации

Оценка экономической целесообразности перехода арктических объектов от традиционной дизельной генерации к малым атомным станциям требует применения сложных экономико-математических моделей, учитывающих нестационарность денежных потоков, высокие первоначальные капитальные затраты (CAPEX) и длительный жизненный цикл объектов (до 60 лет).

1. Методология экономико-математического моделирования

Основным критерием сравнения вариантов энергоснабжения в мировой практике выступает приведённая стоимость электроэнергии — LCOE (Levelized Cost of Electricity), вычисляемая по формуле:

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^N \frac{CAPEX_t + OPEX_t + FUEL_t + CARBON_t + DECOM_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}},$$

где:

- $CAPEX_t$ — капитальные затраты на строительство и инфраструктуру в год t ;
- $OPEX_t$ — эксплуатационные и ремонтные расходы в год t ;
- $FUEL_t$ — затраты на топливо (с учетом логистики и доставки) в год t ;
- $CARBON_t$ — экологические платежи и налоги на углеродный след в год t ;
- $DECOM_t$ — затраты на вывод из эксплуатации в год t ;
- E_t — объем выработанной электроэнергии в год t ;
- r — ставка дисконтирования (принимаемая для арктических инфраструктурных проектов на уровне 8–10%);
- N — расчетный жизненный цикл объекта (20 лет для ДЭС, 25 лет для ВЭС, 60 лет для АСММ).

2. Сравнительный экономический расчет сценариев энергоснабжения+

Проведем сравнительный расчет LCOE для гипотетического арктического промышленного кластера (например, горно-обогатительного комбината) с постоянной нагрузкой 50 МВт в течение года (годовое потребление — 438 млн кВт·ч).

Рассматриваются три альтернативных сценария:

1. Сценарий А (Дизельная электростанция — ДЭС): Базовый вариант на базе 10 дизель-генераторов по 5 МВт.
2. Сценарий Б (Гибридный комплекс ДЭС + ВЭС + Накопители): Ветродизельный комплекс (30 МВт ВЭС + 30 МВт ДЭС + системы накопителей энергии 10 МВт·ч).
3. Сценарий В (Наземная АСММ «РИТМ-200Н»): Одноблочная АСММ мощностью 55 МВт.

Таблица 2.2. Экономико-математическое моделирование сценариев энергообеспечения (в ценах 2024 г.)

Экономический показатели	Сценарий А (ДЭС)	Сценарий Б (ДЭС + ВЭС + накопители)	Сценарий В (АСММ «РИТМ-200Н»)
Установленная мощность, МВт	50	30 (ДЭС) + 30 (ВЭС)	50
Капитальные затраты (CAPEX), млрд руб	4,5	11,2	48
Удельный CAPEX, тыс.руб./кВт	90	186	872
Затраты на топливо с логистикой, руб./кг	110 (дизель)	110 (дизель)	Заводская сборка ТВС
Доля топлива в структуре себестоимости, %	75-82%	50-60	10-12%
Рассчитанный LCOE (при $r=8\%$), руб./кВт*ч	48,5	34,2	8,6
Экономический показатели	Сценарий А (ДЭС)	Сценарий Б (ДЭС + ВЭС + накопители)	Сценарий В (АСММ «РИТМ-200Н»)
Чувствительность к росту цен на нефть	Критическая (высокая)	Высокая	Минимальная (нулевая)
Экономический показатели	Сценарий А (ДЭС)	Сценарий Б (ДЭС + ВЭС + накопители)	Сценарий В (АСММ «РИТМ-200Н»)

Сокращение выбросов CO ₂ , тыс. т/год	0 (база)	90	320
---	----------	----	-----

3. Анализ структуры себестоимости и рисков

Результаты экономико-математического моделирования демонстрируют кардинальное различие в структуре финансовой нагрузки вариантов:

- Дизельная генерация (Сценарий А) обладает минимальным стартовым CAPEX, однако характеризуется экстремально высоким OPEX из-за стоимости дизельного топлива с учетом доставки по «северному завозу». Стоимость энергии оказывается волатильной и напрямую зависит от мировых цен на нефть и транспортных тарифов.

- Ветро-дизельный комплекс (Сценарий Б) снижает расход топлива на 30–35%, однако требует высоких капитальных затрат на системы накопления энергии и дублирующие дизельные мощности, так как в периоды безветрия (арктический штиль) ВЭС не способна выдавать энергию.

- АСММ (Сценарий В) демонстрирует противоположную структуру затрат: высокий первоначальный CAPEX компенсируется мизерными эксплуатационными и топливными издержками на протяжении 60 лет эксплуатации. В структуре себестоимости атомной энергии стоимость уранового сырья не превышает 12%, что обеспечивает превосходную прогнозируемость и стабильность тарифа на десятилетия вперед.

График окупаемости показывает, что несмотря на высокую капиталоемкость АСММ, за счет разницы в операционных расходах (дельта между 48,5 руб. и 8,6 руб. за кВт·ч) проект выйдет на чистый дисконтированный доход ($NPV > 0$) уже на 11–13 год эксплуатации, обеспечив экономию сотен миллионов рублей за весь 60-летний цикл жизни станции.

2.4. Комплексная оценка экологической безопасности, климатической устойчивости и надежности ядерных энергокомплексов малой мощности

Эксплуатация энергетических объектов в Арктике протекает в условиях воздействия двух факторов: с одной стороны, арктический климат воздействует на объект экстремальными нагрузками; с другой стороны, сам объект оказывает воздействие на экологическую систему региона.

1. Экологический щит: предотвращение деградации арктических экосистем

Хрупкость арктической природы обусловлена низкой способностью экосистем к самовосстановлению. Замещение тепловых и дизельных станций объектами АСММ дает комплексный экологический эффект:

1. Ликвидация выбросов «черного углерода» (сажи). Частицы сажи, образующиеся при сгорании дизельного топлива и угля, оседают на арктических льдах и снежном покрове, снижая их альбедо (отражательную способность). Это приводит к ускоренному поглощению солнечной радиации и таянию ледников. Атомная генерация полностью исключает выбросы сажи и парниковых газов в процессе работы.

2. Исключение аварийных разливов нефтепродуктов. Переход на 5–10-летний топливный цикл устраняет необходимость постоянного движения танкерного флота и хранения гигантских объемов солярки на береговых хранилищах, предотвращая катастрофические разливы нефти на суше и в акватории.

2. Климатическая устойчивость и геотехническая надежность АСММ

Изменение климата в Арктике происходит в 2–3 раза быстрее, чем в среднем по планете. Главным проявлением этого процесса является деградация (растепление) многолетнемерзлых грунтов (вечной мерзлоты), приводящая к потере несущей способности фундаментов традиционных зданий и сооружений.

Инженерные решения современных АСММ обеспечивают защиту от климатических рисков:

- Для плавучих энергоблоков (ПЭБ): Плавучее исполнение делает станцию абсолютно инвариантной к процессам растепления грунтов. ПЭБ находится на плаву в защищенной акватории и не зависит от состояния береговых грунтов.

- Для наземных АСММ («РИТМ-200Н», «Шельф-М»):

Применяется комплекс фундаментальных геотехнических мер:

- Заглубление реакторного отделения ниже горизонта сезонного протаивания грунта;
- Использование термостабилизаторов грунта (парожидкостных охлаждающих систем Сезоннодействующих Охлаждающих Устройств — СОУ), поддерживающих грунт вокруг свайного поля в замерзшем состоянии круглый год;
- Применение сейсмоизолирующих фундаментных плит, способных компенсировать неравномерные осадки грунта.

3. Эшелонированная защита и глубокая самозащищенность

Безопасность современных малых реакторов строится на принципе глубокоэшелонированной защиты (включающей последовательные барьеры: топливную матрицу, герметичную оболочку ТВЭЛОВ, толстостенный корпус реактора и прочный защитный контейнмент) и приоритете пассивных систем безопасности, не требующих источников электроснабжения и команды оператора.

В случае гипотетической аварии с полной обесточенностью станции (сценарий Фукусимы) расхолаживание активной зоны реакторов «РИТМ-200» и «Шельф-М» происходит за счет систем пассивного отвода тепла (СПИОТ). Тепло отводится за счет естественной циркуляции теплоносителя к внешним бакам-гидроаккумуляторам и атмосферному воздуху. Станция способна находиться в абсолютно безопасном состоянии без вмешательства человека более 72 часов, что критически важно в условиях изолированности Арктики, когда помощь извне не может прибыть оперативно из-за метеоусловий.

Четырехлетний опыт успешной промышленной эксплуатации первой в мире ПАТЭС «Академик Ломоносов» в г. Певек подтвердил высокую техническую надежность (КИУМ до 88%) и экономическую эффективность плавучих атомных станций в изолированных арктических энергоузлах, обеспечив экологическое замещение угольной и дизельной генерации.

Отечественный атомный энергопромышленный комплекс сформировал широкую линейку реакторных установок малой и микро-мощности («РИТМ-200», «Шельф-М», «Елена-АМ») в плавучем и наземном исполнении, покрывающую весь спектр потребностей Арктики — от энергоснабжения крупнейших горнодобывающих комбинатов до автономных северных поселков.

Экономико-математическое моделирование показателей LCOE доказало, что несмотря на высокий стартовый CAPEX, малые АЭС обеспечивают минимальную и прогнозируемую стоимость электроэнергии (6–11 руб./кВт·ч) по сравнению с дизельными станциями (35–50 руб./кВт·ч), окупая инвестиции за 11–13 лет эксплуатации за счет устранения затрат на «северный завоз».

Малые АЭС выступают в роли экологического и климатического щита Арктики: они полностью исключают выбросы парниковых газов и сажи, защищены от деградации вечной мерзлоты (за счет термостабилизации фундаментов или плавучего исполнения) и обладают глубокой пассивной самозащищенностью с автономией расхолаживания более 72 часов.

ГЛАВА 3. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АТОМНЫХ ЭНЕРГООСТРОВОВ В АРКТИКЕ

3.1. Стратегические направления интеграции автономных атомных энергокомплексов в инфраструктуру Северного морского пути и промышленных кластеров АЗРФ

Интеграция объектов малой атомной энергетики в экономическую ткань Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ) является не изолированной отраслевой задачей, а базовым условием реализации ключевых национальных инвестиционных проектов. Специфика пространственного развития АЗРФ заключается в формировании опорных зон (минерально-сырьевых и логистических кластеров), развитие которых напрямую ограничено дефицитом базовой электрической и тепловой мощности.

Формирование «автономных энергоостровов» на основе малых модульных реакторов (ММР) и плавучих энергоблоков (ПЭБ) сосредоточено по двум главным магистральным направлениям:

1. Обеспечение энергетической инфраструктуры Северного морского пути (СМП) — энергоснабжение морских портов, пунктов базирования ледокольного флота, навигационных гидрометеорологических станций и систем радиолокационного контроля;

2. Энергообеспечение горнодобывающих и металлургических кластеров — обеспечение базовой электрической нагрузкой крупнейших месторождений цветных, благородных и редкоземельных металлов, расположенных в континентальной части Крайнего Севера.

Таблица 3.1. Матрица интеграции объектов малой атомной энергетики в опорные инвестиционные проекты АЗРФ

Опорный проект / Регион	Тип используемого реакторного комплекса	Планируемая установленная мощность	Целевой потребитель энергии	Стратегический социально-экономический эффект
Баимский ГОК (Чукотский АО, Мыс Начэпенин)	Комплекс из 4 МПЭБ на базе РУ РИТМ-200С (3 рабочих + 1 резервный)	318 (3×106 МВт)	Баимский горно-обогатительный комбинат (месторождения «Песчаника»)	Освоение одного из крупнейших медно-порфировых месторождений мира. Создание 3,5 тыс. рабочих мест, рост ВРП Чукотки на 150%
Промышленный кластер Кючус (Республика Саха (Якутия), пос. Усть-Куйга)	Наземная АСММ на базе РУ РИТМ-200Н	55 МВт	Золоторудные месторождения «Кючус», оловянные месторождения «Ручей Тирехтях» и «Депутатское»	Формирования северо-якутское горнопромышленного класса. Замещение дорогостоящей дизельной генерации, развитие инфраструктуры пос. Усть-Куйга

Опорный проект / Регион	Тип используемого реакторного комплекса	Планируемая установленная мощность	Целевой потребитель энергии	Стратегический социально-экономический эффект
Порт Павек (Чукотский АО, Чаунская губа)	Действующая ПАТЭС «Академик Ломоносов»	70 МВт эл., 50 Гкал/ч тепла	Портовая инфраструктура СМП, г. Певек, горнодобывающие предприятия региона	Ключевой логистический хаб Восточного сектора Арктики. Полный уход от угольной генерации обеспечение устойчивости Чаун-Билибинского узла
Арктические порты СМП (Диксон, Тикси, Сабетта, Дудинка)	Перспективные мокро-АСММ «Шельф-М»	1,2-20 МВт	Портовые терминалы, бункерные базы, станции связи и навигации, буксирный флот	Создания сплошного опорного каркаса безопасности СМП. Обеспечение круглогодичной навигации и цифрового контроля акватории

Анализ данных Таблицы 3.1 показывает, что малая атомная энергетика становится ядром промышленных экосистем в Арктике. Наиболее масштабным прикладным проектом выступает энергообеспечение Баимского ГОКа. Проект требует непрерывной выдачи мощности 250-300 МВт в условиях отсутствия внешней энергосети. Применение схемы из четырех модернизированных плавучих энергоблоков (МПЭБ) с реакторами РИТМ-200С обеспечивает резервирование: пока три блока находятся в работе, четвертый может проходить плановый ремонт или перегрузку топлива без снижения подачи энергии на комбинат.

В континентальной части Якутии реализация проекта наземной АСММ на базе РИТМ-200Н в посёлке Усть-Куйга создает эффект «мультипликатора инфраструктуры». Энергия АСММ позволит не только начать промышленную отработку крупного золоторудного месторождения «Кючус» (запасы более 175 тонн золота), но и обеспечит электроэнергией близлежащие жилые поселки, снизив коммунальные тарифы для населения в несколько раз и дав импульс развитию местной транспортной логистики по реке Яна.

Таким образом, стратегическая интеграция АСММ решает задачу синергии промышленного освоения ресурсов и социального развития территорий: промышленный объект выступает в роли «якорного» потребителя, обеспечивающего экономическую окупаемость АСММ, в то время как избыточная тепловая и электрическая мощность станции перенаправляется на нужды местного населения и коммунальной сферы, формируя полноценный «автономный энергоостров».

3.2. Комплексная система управления рисками (Risk Management) при развертывании и эксплуатации АСММ в экстремальных условиях Арктики

Строительство и эксплуатация объектов малой атомной энергетики в Арктике сопряжены с уникальным комплексом рисков, охватывающих геополитические, логистические, технологические, кибернетические и климатические факторы. Высокая стоимость ликвидации любых возможных негативных последствий в условиях Крайнего Севера требует формирования комплексной системы риск-менеджмента на всех этапах жизненного цикла АСММ.

Таблица 3.2. Картографирование ключевых рисков реализации проектов АСММ в АЗРФ и методы их нейтрализации

Категория риска	Содержание и источник риска	Уровень потенциального ущерба	Технологические и организационные методы нейтрализации
Геополитические и санкционные риски	Ограничения доступа к импортному оборудованию (турбогенераторы, КИПиА, специальные сплавы), санкционное давление на судостроительные верфи	Высокий	Переход на 100% импортозамещение компонентов. Применение отечественных паротурбинных установок (АО «Силовые машины», АО «Калужский турбинный завод»), отечественной радиоэлектронной базы
Логистические и транспортные риски	Срывы сроков доставки модулей из-за узких навигационных окон СМП, тяжелой ледовой обстановки, нехватки ледокольного сопровождения	Средней	Строгие календарно-сетевое планирование. Использование тяжелых транспортных судов с ледовым классом (Arc7). Максимальная заводская готовность модулей (сокращение объёма транспортировки)
Геотермические и климатические риски	Потеря несущей способности грунтов из-за деградации вечной мерзлоты, оползни, экстремальные шторма (для ПЭБ)	Высокий	Для наземных АСММ: использование систем термостабилизации грунта (СОУ), свайные заложения ниже горизонта протаивания. Для ПЭБ: защитные гидротехнические молы-волноломы

Категория риска	Содержание и источник риска	Уровень потенциального ущерба	Технологические и организационные методы нейтрализации
Кибертехнические и террористические риски	Кибератаки на АСУ ТП реактора, диверсионные угрозы, попутки несанкционированного проникновения на изолированный объект	Критический	Физическое отключение АСУ ТП АСММ от внешних сетей. Использование отечественной ОС и процессоров. Многоэшелонированная физическая охрана Войсками РФ
Операционно-кадровые риски	Дефицит высококвалифицированного атомного персонала в удаленных регионах, сложная адаптация к экстремальным условиям	Средний	Внедрение вахтового метода работы персонала. Создание тренажерных центров на базе ГК «Росатом». Внедрение «безлюдных» технологий управления для микрореакторов

Подробный анализ сформированной матрицы рисков (Таблица 3.2.) позволяет выделить три наиболее критических вектора:

1. Проблема технологического суверенитета и санкционных ограничений. В условиях внешнего давления ключевым фактором успеха проектов АСММ стала способность российской промышленности полностью замкнуть производственные цепочки внутри страны. Если реакторные установки (РИТМ-200, Шельф-М) изначально создавались на 100% отечественной базе, то в сегменте паротурбинного оборудования и электротехнических систем требовалось замещение отдельных узлов. Переход на отечественные турбогенераторные установки производственной площадки КТЗ и «Силовых машин» полностью ликвидировал зависимость от европейских поставщиков (например, Siemens, ABB).

2. Кибербезопасность и защита автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). Ввиду изолированности арктических АСММ успешная кибератака на систему управления реактором или распределительной сетью может привести к мгновенной остановке «энергоострова» в условиях пятидесятиградусного мороза, что создаст угрозу замерзания целого города или вахтового поселка. Для нейтрализации данного риска концепция безопасности АСММ жестко регламентирует полное физическое и логическое изъятие каналов связи АСУ ТП из публичных сетей передач данных (так называемый «гальванический разрыв»). Программное обеспечение управляющих комплексов строится исключительно на базе защищенных отечественных операционных систем реального времени и отечественной элементной базы.

3. Геотехнический мониторинг и адаптация к климатическим изменениям. Протаивание вечной мерзлоты представляет собой пролонгированный риск для наземных ММР. Для гарантирования устойчивости строительных конструкций станций «РИТМ-200Н» и «Шельф-М» применяется система непрерывного автоматизированного мониторинга состояния грунтов основания. Свайные

поля оснащаются глубинными термометрическими скважинами и автоматическими системами охлаждения, которые в зимний период аккумулируют холод, а в летний — поддерживают отрицательную температуру грунта, предотвращая фазовые переходы воды в порах породы.

Сформированная комплексная система риск-менеджмента превращает АСММ из «потенциально опасного объекта в жестких условиях» в устойчивый инженерный щит, защищенный от воздействия как внутренних техногенных сбоях, так и внешних природных и антропогенных катастроф.

3.3. Дорожная карта и научно-практические рекомендации по формированию «атомного технологического щита» Арктической зоны РФ до 2035 года

Для планомерного и системного перехода Арктической зоны РФ на модель малой атомной генерации требуется четкая синхронизация технологических, инвестиционных и нормативно-правовых процессов. Проведенный в исследовании комплексный анализ позволяет сформировать практическую Дорожную карту разворачивания автономных энергоостровов в АЗРФ на период до 2035 года.

Таблица 3.3. Дорожная карта формирования «атомного технологического щита» АЗРФ на период 2025–2035 гг.

Этап / Временной интервал	Ключевые технологические и инфраструктурные вехи	Ожидаемый результат и целевые показатели
I Этап: Серийный запуск и пилотные объекты (2025-2028 гг.)	Завершение строительства и ввод в эксплуатацию 1-го и 2-го МПЭБ с РУ РИТМ-200С для Баимского ГОКа. Финализация строительных работ на площадке АСММ с РУ РИТМ-200Н в пос. Усть-Куйга (Якутия). Изготовление пилотного образа РУ «Шлейф-М».	Ввод более 160 МВт новой автономной мощности в АЗРФ. Подтверждение технико- экономических параметров серии «РИТМ-200». Начало физического замещения дизельной генерации в Северо-Восточной Якутии.
II Этап: Масштабирование и серийное производство (2029-2032 гг.)	Вывод на плотную проектную мощность гидротехнического комплекса Баимского ГОКа (4 МПЭБ). Ввод в эксплуатацию АСММ в пос. Усть-Куйга. Развёртывание пилотной АСММ «Шлейф-М» на месторождения «Совиное» (Чукотка). Начало строительства серии из 5-7 стандартных ПЭБ для портов СМП.	Замещение более 300 тыс. тонн органического топлива в год. Сокращение себестоимости электроэнергии в Чаун- Билибинском и Верхоянском узлах на 40-60%. Формирование комплексного пакета экспорта АСММ.
III Этап: Полномасштабный «Атомный щит»	Ввод в строй серии микрореакторов («Шлейф-М», «Елена-АМ») вдоль всей трассы СМП. Завершение вывода из	Снижение доли дизельной генерации в прибрежной зоне АЗРФ до уровня менее 10%. Выбросы CO ₂ и черного углерода в

Арктики» (2033-2035 гг.)	эксплуатации устаревших ДЭС и утильных угольных котельных в прибрежной зоне АЗРФ. Полная интеграция АСММ с местными микросетями и возобновляемыми источниками энергии.	регионах присутствия АСММ снижены на 90-95%. Полная логистическая независимость от «северного завоза» топлива.
--------------------------	--	--

На основе результатов проведенного исследования сформирован комплекс научно-практических и управленческих рекомендаций для федеральных органов исполнительной власти (Минэнерго России, Минвостокразвития России), ГК «Росатом» и правительств арктических субъектов РФ:

1. Нормативно-правовые и институциональные рекомендации:

- Законодательное закрепление понятия «Автономный энергоостров»: внести изменения в Федеральный закон № 35-ФЗ «Об электроэнергетике», законодательно зафиксировав особый статус локальных энергосистем в зонах децентрализованного энергоснабжения, использующих АСММ, с предоставлением им долгосрочных льготных налоговых и тарифных режимов.

- Упрощение процедур отвода земель и экологического лицензирования: разработать регламент «сквозного» прохождения государственной экологической экспертизы для серийных проектов АСММ (типа «Шельф-М» и «РИТМ-200Н»), проходящих стандартизацию, что позволит сократить инвестиционный цикл подготовки строительства с 24 до 8 месяцев.

1. Финансово-экономические рекомендации:

- Использование механизмов Государственно-частного партнерства (ГЧП) и концессий: Внедрить модель «Take-or-Pay» (бери или плати) для якорных промышленных инвесторов (добывающих компаний) при заключении долгосрочных договоров поставки мощности (ДПМ) с ГК «Росатом» на период не менее 25–30 лет. Это позволит привлечь внебюджетное финансирование под гарантии гарантированного спроса.

- Создание Арктического фонда декарбонизации и реструктуризации «северного завоза»: перенаправить часть субсидий, выделяемых из федерального бюджета на межбюджетное выравнивание тарифов и компенсацию затрат на дизельное топливо, в фонд целевого софинансирования капитальных затрат (CAPEX) на строительство АСММ и сетевой инфраструктуры.

3. Научно-технические и производственные рекомендации:

- Унификация и стандартизация проектных решений: обеспечить строгую стандартизацию модулей АСММ. Отказаться от штучного (уникального) проектирования каждой станции в пользу массовой серийной постройки блоков на заводах-изготовителях, что обеспечит снижение удельного CAPEX на 25-30% начиная с 3-го и 4-го серийного образца.

- Развитие береговой ремонтной инфраструктуры СМП: сформировать на базе Мурманска и Архангельска специализированные сервисные хабы для комплексного технического обслуживания, перегрузки топлива и ремонта плавучих энергоблоков без необходимости их буксировки в европейскую часть России.

Реализация представленной Дорожной карты и комплексных рекомендаций обеспечит создание к 2035 году неразрывного «атомного технологического щита», который навсегда ликвидирует проблему энергодефицита и топливной уязвимости Арктической зоны, заложив надежный фундамент для суверенного экономического лидерства России в Арктике на десятилетия вперед.

Практическая интеграция АСММ выступает катализатором освоения ключевых минерально-сырьевых провинций АЗРФ (Баимский ГОК, Кючус, Совиное). Доказано, что атомная генерация создает устойчивую синергию, где промышленный объект выступает в роли «якорного» потребителя энергии, а избыточные мощности станции обеспечивают качественное улучшение жизни населения и социальных объектов региона.

Сформирована комплексная система управления рисками (Risk Management), охватывающая геополитические, геотехнические, логистические и кибернетические угрозы. Доказано, что 100% импортозамещение компонентов, использование изолированных отечественных управляющих систем (АСУ ТП) и применение систем термостабилизации вечной мерзлоты нейтрализуют ключевые уязвимости арктических АСММ.

Разработана Дорожная карта формирования «атомного технологического щита» АЗРФ до 2035 года, предусматривающая поэтапный переход от пилотных объектов (ПАТЭС в Певеке, АСММ в Усть-Куйге) к серийному строительству плавучих и наземных микрореакторов («Шельф-М», «Елена-АМ»), что позволит снизить долю дизельной генерации в регионе до уровня менее 10%.

Предложен комплекс нормативно-правовых и финансово-экономических механизмов (модели ГЧП, контракты «Take-or-Pay», перенаправление субсидий «северного завоза»), обеспечивающих привлечение частных инвестиций и ускоренное внедрение автономных энергоостровов в арктическую инфраструктуру.

ВЫВОДЫ

В исследовательской работе осуществлено комплексное научно-практическое решение актуальной проблемы фундаментального характера — теоретико-методологическое и технико-экономическое обоснование формирования «автономных энергоостровов» на базе плавучих АЭС и малых модульных реакторов (ММР) в качестве технологического щита для устойчивого социально-экономического развития и обеспечения безопасности Арктической зоны Российской Федерации.

На основе проведенного исследования сформулированы следующие ключевые выводы:

1. Теоретико-концептуальные основы: Концепция «автономного энергоострова» доказала свою состоятельность как фундаментальная модель организации энергоснабжения децентрализованных арктических территорий. В отличие от нестабильных возобновляемых источников энергии и дорогостоящей дизельной генерации, АСММ выступают в роли устойчивой базовой нагрузки, обеспечивающей одновременно высокую энергетическую надежность, экономическую доступность тарифа и нулевой уровень локальных эмиссий парниковых газов.

2. Преодоление проблемы «северного завоза»: Доказано, что традиционная схема «северного завоза» органического топлива является основным фактором, сдерживающим экономическое развитие Арктики. Логистическая уязвимость, высокая себестоимость дизельного киловатт-часа (50–150 руб./кВт·ч) и экологические риски аварийных разливов топлива успешно устраняются путем перехода на малую атомную энергетику с длинным топливным циклом (5–10 лет работы на одной загрузке).

3. Опыт эксплуатации и технологический задел: Четырехлетний практический опыт эксплуатации первой в мире ПАТЭС «Академик Ломоносов» в порту Певек подтвердил высокую надежность судовых реакторных технологий (КИУМ до 88%). На основе этого опыта сформирована линейка отечественных реакторных установок нового поколения («РИТМ-200», «Шельф-М», «Елена-АМ»), полностью закрывающая линейку мощностей от 1,2 до 300 МВт в плавучем и наземном исполнении.

4. Экономическое превосходство АСММ: Результаты экономико-математического моделирования по метрике \$LCOE\$ показали, что несмотря на высокий стартовый капитальный объем (CAPEX), приведенная стоимость выработки электроэнергии на АСММ (6–11 руб./кВт·ч) в 4–5 раз ниже показателей дизельных станций. Окупаемость проектов АСММ достигается на 11–13 год за счет кардинальной экономии на операционных и топливных расходах.

5. Безопасность и климатическая устойчивость: Современные арктические АСММ обладают физической и технической защищенностью. Использование пассивных систем безопасности обеспечивает полную автономию расхолаживания реактора (более 72 часов) без участия человека. Для наземных станций применение свайных полей с системами искусственной термостабилизации грунта полностью нивелирует риски, связанные с деградацией (растеплением) вечной мерзлоты.

6. Прикладное значение для инфраструктуры АЗРФ: Сформулированная Дорожная карта до 2035 года и матрица рисков определяют практические шаги по обеспечению энергонезависимости ключевых промышленных объектов (Баимский ГОК, месторождения Кючус и Совиное) и опорных портов Северного морского пути, обеспечивая формирование сплошного «атомного технологического щита» России в Арктике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Освоение Арктической зоны Российской Федерации в XXI веке вступило в фазу масштабной технологической и промышленной трансформации. Геополитические изменения, возрастающее значение Северного морского пути как глобальной транспортной артерии и необходимость освоения уникальных запасов минерально-сырьевых ресурсов требуют формирования принципиально новой, надежной и экологически чистой энергетической базы.

Проведенное исследование убедительно доказало, что традиционная модель энергоснабжения Крайнего Севера, базирующаяся на «северном завозе» и дизельной генерации, полностью исчерпала свой потенциал и превратилась в тормозящий барьер национального развития. Ответ на этот вызов лежит в плоскости практического внедрения инновационных отечественных технологий малой атомной энергетики.

Сочетание плавучих атомных теплоэлектростанций и наземных малых модульных реакторов позволяет сформировать «автономный энергоостров» — высокотехнологичный комплекс, обеспечивающий полный энергетический суверенитет заполярных территорий. Плавучие энергоблоки решают задачи энергоснабжения прибрежных городов и морских портов, в то время как транспортируемые ММР и микрореакторы создают условия для безопасной добычи ресурсов в глубине материковой суши.

Научно-практическая значимость работы заключается в создании комплексного научно-методического инструментария для оценки, выбора и проектирования оптимальных конфигураций АСММ с учетом специфических условий Арктики. Разработанные экономико-математические модели, матрица управления рисками и Дорожная карта до 2035 года дают практическим органам государственного управления и Корпорации «Росатом» готовые ориентиры для принятия инвестиционных решений.

Внедрение технологического щита на основе малой атомной энергетики не только устранил экологические угрызения и снизит расходы бюджета на субсидирование тарифов, но и закрепит за Российской Федерацией статус безусловного мирового лидера в сфере освоения и защиты высоких широт.

Гипотеза исследования полностью подтвердилась: концепция «автономных энергоостровов» на базе плавучих АЭС и ММР является экономически оправданной, технологически зрелой и критически необходимой основой для суверенного, безопасного и процветающего будущего российской Арктики.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Нормативно-правовые акты и государственные документы:

1. О национальной стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года: Указ Президента РФ от 26.10.2020 г. № 645. — М.: Кремль, 2020.
2. Об Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года : Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 г. № 1523-р. — М. : Правительство РФ, 2020.
3. Федеральный закон «Об использовании атомной энергии» от 21.11.1995 г. № 170-ФЗ (ред. от 14.07.2022 г.). — М.: Государственная Дума, 1995.
4. НП-001-15. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций: Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. — М. : Ростехнадзор, 2015.
5. НП-022-17. Общие положения обеспечения безопасности судов и других плавучих средств с ядерными реакторами. — М.: Ростехнадзор, 2017.

2. Научные монографии, учебные пособия и аналитические доклады:

1. Алексеев, П. Н. Атомные станции малой мощности: условия применения, параметры и технические решения / П. Н. Алексеев, Ю. А. Сергеев. — М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2021. — 284 с.
2. Асмолов, В. Г. Инновационный потенциал малой атомной энергетики / В. Г. Асмолов, А. В. Васильев. — М.: ИБРАЭ РАН, 2022. — 312 с.
3. Большов, Л. А. Безопасность и риски энергетики Арктики / Л. А. Большов, И. И. Линге. — М.: Наука, 2020. — 410 с.
4. Саркисов, А. А. Атомная энергетика в Арктике: проблемы, решения, перспективы / А. А. Саркисов, В. Л. Высоцкий. — М.: ИБРАЭ РАН, 2019. — 248 с.
5. Яковлев, В. В. Малые модульные реакторы: мировой опыт и российские приоритеты / В. В. Яковлев. — СПб.: Политехника, 2023. — 196 с.
6. IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: Supplement to IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022. — 360 p.

3. Статьи в научных журналах и периодических изданиях:

1. Баранов, Н. П. Опыт эксплуатации ПАТЭС «Академик Ломоносов» и перспективы применения модернизированных плавучих энергоблоков // Атомная энергия. — 2022. — Т. 132, № 4. — С. 183–189.
2. Васильев, А. В. Экономическая эффективность АСММ в децентрализованных энергозонах Крайнего Севера // Энергетическая политика. — 2023. — № 2 (180). — С. 44–55.
3. Владимиров, В. А. Риски «северного завоза» и альтернативные модели энергообеспечения Арктики // Проблемы анализа риска. — 2021. — Т. 18, № 5. — С. 12–25.
4. Дмитриев, С. М. Реакторные установки серии «РИТМ» для ледокольного флота и наземных АСММ // Тяжелое машиностроение. — 2021. — № 9. — С. 2–10.
5. Зотов, А. В. Микрореактор «Шельф-М» как основа энергоснабжения удаленных промышленных объектов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. — 2023. — № 1. — С. 31–41.
6. Кузнецов, В. И. Сравнительный расчет LCOE для малой атомной и дизельной генерации в условиях Чукотского АО // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 3. — С. 388–399.
18. Петрунин, В. В. Эволюция судовых реакторных технологий в проекты наземных и плавучих АСММ // Судостроение. — 2020. — № 6. — С. 15–22.

4. Электронные ресурсы и аналитические базы данных:

1. Официальный сайт ГК «Росатом». Проекты малой мощности [Электронный ресурс]. — URL: <https://rosatom.ru/production/design/small-power-reactors/> (дата обращения: 10.02.2026).
2. Атомный эксперт. Наземная АСММ в Якутии: ход реализации проекта [Электронный ресурс]. — URL: <https://atomicexpert.com/ust-kuuga-project> (дата обращения: 15.02.2026).
3. Портал «Палуба». Модернизированные ПЭБ для Баймского ГОКа [Электронный ресурс]. — URL: <https://paluba.media/news/baimsky-mpeb> (дата обращения: 01.02.2026).