ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ
УДК 658.7
ББК 65.305.14
https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-3-90-101

Check for updates
CC BY 4.0

Аддитивные технологии как инструмент устойчивого материально-технического обеспечения арктических нефтегазовых промыслов

Самойленко А.В.[1,✉], **Фадеев А.М.**[2]

[1] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия
[2] Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина ФИЦ «Кольский научный центр» Российской академии наук, Апатиты, Россия
✉samoilenko.artem2001@mail.ru

Аннотация. Цель исследования — определить управленческие решения, необходимые для превращения аддитивного производства в устойчивый механизм материально-технического обеспечения арктических нефтегазовых промыслов и сформировать комплекс мероприятий, обеспечивающих его промышленное масштабирование до 2030 года. Исследование сосредоточено на месторождениях Ямала, Гыдана и шельфа Карского моря, где транспортные окна короткие, а затраты на поставки максимальны. Методологическая основа включает диагностическую карту рисков цепочки поставок; системно-динамическую имитационную модель, оценивающую влияние аддитивного производства на простои оборудования; смешанную целочисленную оптимизацию, позволяющую рассчитывать рациональное размещение печатных мощностей и объемы страховых запасов. Для управленческой верификации использованы матрица заинтересованных сторон, метод экспертных оценок и поэтапно-фазовый контроль, обеспечивающий мониторинг зрелости проектов и своевременную корректировку инвестиционного портфеля. Моделирование восьми реально функционирующих промыслов показало, что переход к распределенной сети печати по требованию, дополненной электронным реестром цифровых моделей деталей и ситуационным мониторингом, сокращает среднюю длительность простоев оборудования на 36 %, совокупные логистические затраты — на 18 % и объем выбросов диоксида углерода — на 15 %. Индекс логистического риска снижается с 0,42 до 0,27, а коэффициент технической готовности возрастает до 0,96. Экономия оборотного капитала достигает 24 %, прогнозная аналитика уменьшает непредвиденные закупки на 13 %, а чистая приведенная стоимость остается положительной при росте цен на металлические порошки до плюс 30 %.
Практическая значимость выражается в комплексной программе действий: создании межкорпоративного консорциума для обмена цифровыми спецификациями, утверждении стандарта «готовность к печати», аккредитации поставщиков порошков, двухуровневой системе подготовки кадров и льготном финансировании региональных печатных центров. Предложенный комплекс мероприятий согласует технические, экономические и экологические задачи, укрепляет устойчивость северной инфраструктуры и стимулирует формирование новых производственных кластеров в Арктике. Выводы подтверждены чувствительным анализом модели.

© Самойленко А.В., Фадеев А.М., 2025

Ключевые слова: аддитивное производство, арктические нефтегазовые промыслы, устойчивое материально-техническое обеспечение, логистические риски, системно-динамическое моделирование, оптимизация размещения мощностей, управленческие инновации, сокращение углеродного следа
Конфликт интересов: авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.
Для цитирования: Самойленко А.В., Фадеев А.М. Аддитивные технологии как инструмент устойчивого материально-технического обеспечения арктических нефтегазовых промыслов. *Арктика и инновации.* 2025;3(3):90–101. https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-3-90-101

Additive technologies as a tool for sustainable material and technical support of Arctic oil and gas fields

Artem V. Samoilenko[1,✉], Alexey M. Fadeev[2]

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia
[2]Luzin Institute for Economic Studies, Cola Science Centre, Apatity, Russia
✉samoilenko.artem2001@mail.ru

Abstract. In this study, we aim to establish the managerial decisions needed to make additive manufacturing a sustainable mechanism for the material and technical support of Arctic oil and gas fields and to develop a set of measures ensuring its industrial scale-up by 2030. The research focuses on the Yamal and Gydan peninsulas and the Kara Sea shelf, where the transportation period is short and supply costs are at their highest. The research methodology comprises a diagnostic map of supply-chain risks; a system-dynamics simulation model to assess the impact of additive manufacturing on equipment downtime; and a mixed-integer optimization procedure to determine the optimal placement of printing capacity and the size of safety stocks. Managerial validation employs a stakeholder matrix, the expert-assessment method, and a stage-gate control process, ensuring continuous monitoring of project maturity and timely adjustment of the investment portfolio. The conducted simulation of eight operating fields showed that shifting to a distributed print-on-demand network in combination with an electronic register of digital part models and situational monitoring reduces the average equipment downtime by 36%, the total logistics costs by 18%, and carbon-dioxide emissions by 15%. The logistics-risk index decreases from 0.42 to 0.27, while the technical readiness factor increases to 0.96. Working-capital savings reach 24%; predictive analytics reduces unplanned purchases by 13%; and the net present value remains positive even if metal-powder prices increase by up to 30%.
The practical significance of the study is reflected in a comprehensive action program that includes the creation of an inter-corporate consortium for sharing digital specifications, adoption of a “print-ready” standard, accreditation of powder suppliers, a two-level personnel-training system, and preferential financing for regional printing centers. The proposed measures align technological, economic, and environmental objectives, reinforce the resilience of northern infrastructure, and foster the emergence of new manufacturing clusters in the Arctic. The conclusions are supported by sensitivity analysis.
Keywords: additive manufacturing, Arctic oil and gas fields, sustainable material and technical support, logistics risks, system-dynamics modelling, capacity-allocation optimization, managerial innovation; carbon-footprint reduction

Conflict of interests: the authors report no conflict of interest.
For citation: Samoilenko A.V., Fadeev A.M. Additive technologies as a tool for sustainable material and technical support of Arctic oil and gas fields. *Arctic and Innovations*. 2025;3(3):90–101. https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-3-90-101

Введение

Освоение арктического шельфа занимает одно из ключевых мест в долгосрочных стратегиях топливно-энергетического комплекса России, поскольку именно здесь сосредоточены до четверти потенциальных неразведанных запасов нефти и природного газа страны. Однако эксплуатация месторождений, расположенных к северу от полярного круга, сопряжена со сложнейшими логистическими вызовами: чрезвычайно короткими навигационными окнами, высокой вероятностью метеозадержек, значительной удаленностью от промышленных баз и полным отсутствием наземной инфраструктуры на большей части маршрутов доставки. В этих условиях традиционная система материально-технического обеспечения, основанная на централизованных складских узлах, не только ведет к неэффективному росту оборотного капитала, но и усиливает экологическую нагрузку, поскольку вынуждает задействовать дорогостоящие аварийные авиарейсы для срочной доставки запасных частей.

Переход мировой энергетики к углеродно-нейтральным траекториям усиливает требования к экологической ответственности любой промышленной деятельности, особенно в уязвимых экосистемах Севера. Концепция устойчивого материально-технического обеспечения, подразумевающая баланс экономических, социальных и экологических эффектов, требует переосмысления логистических цепочек с точки зрения минимизации выбросов парниковых газов и повышения надежности поставок. В этот контекст органично вписывается аддитивное производство — технология послойного создания деталей по цифровым моделям, способная радикально сократить потребность в транспортировке, уменьшить объемы складских запасов и обеспечить выпуск высокозатратных комплектующих непосредственно в точке потребления.

Несмотря на бурное развитие аддитивных технологий в авиационно-космическом и медицинском секторах, их потенциал для арктических нефтегазовых промыслов остается исследованным фрагментарно. Существующие публикации преимущественно концентрируются на материаловедческих аспектах или технико-экономических расчетах отдельных кейсов, оставляя без внимания системные управленческие вопросы: модели распределения печатных мощностей, механизмы коллективного доступа к цифровым библиотекам чертежей, стандартизацию квалификационных процедур и инструменты «зеленого» финансирования. Между тем именно комплекс управленческих решений определяет возможность масштабного внедрения аддитивного производства в логистику Крайнего Севера, где стоимость ошибки многократно возрастает.

Настоящая статья восполняет указанный пробел, предлагая целостную управленческую концепцию интеграции аддитивных технологий в систему материально-технического обеспечения арктических промыслов. Цель работы — сформулировать и оценить эффективность комплекса мероприятий, обеспечивающих переход от экспериментальных печатных участков к распределенной сети изготовления деталей по требованию в горизонте до 2030 года. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

1) сформировать диагностическую карту логистических рисков, критичных для северных месторождений, и выявить позиции номенклатуры с наибольшим потенциалом перехода на аддитивное производство;

2) разработать системно-динамическую модель, описывающую влияние локальной 3D-печати на показатели готовности оборудования, затраты поставок и углеродный след;

3) сконструировать оптимизационный инструмент для обоснования размещения печатных мощностей и уровней резервного хранения в условиях многокритериальности;

4) предложить управленческую программу, включающую механизмы кооперации

компаний, стандартизации, кадрового обеспечения и финансовой поддержки печатных центров;

5) провести чувствительный анализ устойчивости полученных эффектов к ценовым колебаниям и изменению внешних условий.

Научная новизна работы заключается в комплексном соединении методов системно-динамического моделирования, смешанной целочисленной оптимизации и инструментов стратегического менеджмента для оценки управленческого потенциала аддитивного производства в контексте устойчивого материально-технического развития Арктики. Практическая значимость выражается в проектной дорожной карте, ориентированной на промышленное масштабирование технологии, снижении логистических рисков и декарбонизации цепочек поставок в регионе, где традиционные методы перестают отвечать требованиям эффективности и экологической безопасности.

Статья структурирована следующим образом. В первом разделе рассматриваются теоретические предпосылки устойчивого материально-технического обеспечения и аддитивного производства для арктических условий. Второй раздел содержит анализ логистических рисков и описание методики исследования. В третьем разделе представлены результаты моделирования и оптимизационного расчета. Четвертый раздел посвящен разработке и обсуждению комплексной программы управленческих мероприятий. Заключение формулирует ключевые выводы и направления дальнейших исследований.

Обзор литературы

Арктическая зона выступает одним из ключевых источников экспортной выручки и инвестиционной активности в энергетическом секторе России. Экстремальные природно-климатические условия, значительные расстояния, короткие навигационные окна и высокая стоимость последнего плеча доставки формируют особую институциональную среду для материально-технического обеспечения. В этих условиях экономический результат определяется не столько минимизацией закупочной цены, сколько поддержанием требуемой готовности технологического оборудования и предсказуемости поставок при приемлемом уровне риска. Управленческая парадигма смещается от приоритета узкой эффективности к балансу устойчивости, гибкости, оперативности и экологической ответственности, что требует переоценки роли запасов, контрактной архитектуры и технологий формирования ценности на поздних стадиях цепи поставок [1; 2, с. 42–56; 3, с. 62–66; 5, с. 5–12]. В стратегических документах государства эти акценты закреплены как долгосрочный приоритет развития, включая роль Северного морского пути и опорных логистических узлов в обеспечении предсказуемости поставок [1; 4, с. 128–133].

Современные исследования демонстрируют, что сокращение неопределенности сроков и повышение надежности доставки в условиях Севера достигаются за счет сочетания территориальной диверсификации узлов снабжения, переноса поздних операций ближе к месту потребления и углубленной цифровизации управленческих контуров. Региональные хабы и предразмещение ресурсов уменьшают вариативность сроков, но требуют развитых процедур контроля качества на местах и наращивания компетенций. Перенос точки окончательной конфигурации изделия к потребителю снижает объем неликвидов и замораживание капитала в запасах; цифровая прослеживаемость данных о парке оборудования, спросе на запасные части и техническом состоянии позволяет согласовывать планы обслуживания и пополнения, выравнивая нагрузку на транспортно-логистическую инфраструктуру [3, с. 61–66; 6, с. 31–35; 4, с. 134–141; 10, с. 29–31]. На этом фоне аддитивное производство рассматривается как управленческий инструмент отложенного изготовления по требованию, который переводит критическую часть операций за границу наибольшей неопределенности и уменьшает зависимость от коротких транспортных окон [7, с. 574–578; 12].

Опыт промышленной эксплуатации подтверждает преимущество локального изготовления для позиций с низкой частотой потребления и высокими потерями от простоя. Речь идет о деталях, снятых с производства, элементах вспомогательной оснастки и компонентах, для которых задержки поставки приводят к непропорционально большим потерям выпуска. Управленческая логика отбора изделий для печати опирается на анализ критичности отказов, сопоста-

вимости материалов и технологий с требованиями эксплуатации, а также на оценку совокупной стоимости владения. Снижение разброса фактического срока поставки при переходе к локальному изготовлению ведет к уменьшению страховых запасов при сохранении целевого уровня обслуживания; решение между печатью и традиционной закупкой целесообразно принимать на основе расширенного расчета, учитывающего потери от простоя, стоимость капитала, вероятность сбоев в транспортной сети и издержки квалификации процессов [7, с. 576–580; 11, с. 180–186; 12].

Для включения аддитивного производства в обычные контуры снабжения требуется стандартизированная «сквозная нить» данных и процедур. Гармонизированные национальные стандарты закрепляют понятийный аппарат, требования к критическим применениям для процессов синтеза из металлических порошков на подложке, а также правила представления и обработки технологических данных. Эти документы формируют язык взаимодействия между заказчиком и производителем, обеспечивают прослеживаемость сырья, режимов и партий, а также описывают существенные переменные процесса, подлежащие фиксации в договорной документации. Для арктических проектов наличие такой рамки снижает трансакционные издержки согласования и создает возможность включать локальную печать в стандартные процедуры закупки и приемки [8; 9; 7, с. 576–578].

Организационная архитектура может опираться на региональный центр печати вблизи портов и баз снабжения с эффектом масштаба и концентрацией компетенций контроля качества, на гибридную схему с распределением задач между центром и площадкой добычи, а также на полевое изготовление ограниченного круга изделий и восстановительных наплавок силами мобильных бригад. Выбор конфигурации зависит от сезонности транспортной доступности, профиля отказов оборудования и допустимого уровня рисков приемки; институциональная среда задается стратегией развития арктической инфраструктуры и рамочными экологическими и социальными стандартами крупных проектов [6, с. 31–35; 4, с. 138–142; 10, с. 29–32]. Технологическая цепочка должна быть интегрирована с системами управления производственными активами, заявочной дисциплиной материально-технического обеспечения и цифровым складом моделей, чтобы обеспечить единые правила учета, приемки и эксплуатации [4; 7, с. 578–580].

Экономическая целесообразность определяется расчетом полной стоимости владения, включающим капитальные вложения в оборудование и инфраструктуру, текущие расходы на материалы и энергию, подготовку персонала и контроль качества, а также сопоставимую выгоду от высвобождения оборотного капитала из запасов, сокращения транспортных операций и уменьшения простоев. Уровень сервиса описывается достижением целевых показателей готовности при минимально необходимом страховом запасе, что требует количественной оценки стоимости сокращения времени поставки и стоимости управленческой гибкости. Экологическая составляющая оценивается методами анализа жизненного цикла с учетом замещенных перевозок и энергетического профиля площадки печати; сопоставление выбросов на деталь и выбросов, связанных с часом простоя, позволяет согласовать технологические и экологические критерии. Риск-профиль проекта анализируется через вероятностные модели нарушений логистики и отказов оборудования, а также через сценарии, учитывающие ледовую обстановку и ограниченность навигационных периодов [11, с. 182–186; 3, с. 63–67; 7, с. 578–580].

Сохраняется потребность в корпоративной конкретизации процедур квалификации критически важных деталей для условий низких температур и удаленных площадок, опирающейся на национальные стандарты и отраслевые регламенты; при отсутствии таких процедур локальная печать будет применяться ограниченно — преимущественно для вспомогательных изделий и ремонтных операций [8, 9]. Требует проработки институциональная интеграция цифрового «склада моделей» с системами подготовки производства и управления активами, включая версионирование и разграничение доступа, поскольку это влияет на скорость согласований и юридическую определенность ответственности за отказ [7, с. 576–579]. В логистическом измерении сезонная доступность и метеозависимость маршрутов требуют увязки планов печати и запасов с оценками рисков транспортной инфраструктуры

и режимами функционирования Северного морского пути [1; 6, с. 33–36; 4, с. 140–142].

Арктический контекст усиливает значение надежности и скорости восстановления работоспособности оборудования как детерминантов экономического результата. Аддитивное производство выступает не самостоятельной целью, а управленческим инструментом, уменьшающим неопределенность сроков, снижающим зависимость от дефицитных логистических окон и высвобождающим капитал из избыточных запасов при сопоставимой технологической надежности. При условии формализации стандартов закупки, прослеживаемости данных и договорных уровней обслуживания, а также при интеграции с планированием обслуживания и управления запасами по критичности данная технология повышает устойчивость арктических промыслов и укрепляет вклад Арктики в экономику страны за счет предсказуемой добычи, снижения совокупных затрат снабжения и смягчения экологических эффектов дальних перевозок [1; 2; 4, с. 128–133; 7, с. 578–580].

Результаты исследования

Эмпирической основой анализа послужили восемь реально функционирующих промыслов Ямала и Гыдана, а также объекты на шельфе Карского моря, различающиеся по уровню транспортной доступности, конфигурации фондов оборудования и профилю отказов. Модельный контур объединяет системно-динамическое описание производственно-логистической системы с имитацией событийного характера отказов и восстановлений, что позволяет согласованно оценивать влияние изменения сроков поставки и локального изготовления на готовность технологических ниток, загрузку транспортной инфраструктуры и профиль запасов. В качестве базового сценария принята традиционная схема снабжения через центры консолидации на материке с сезонным завозом и аварийными авиарейсами в период ледового простоя. Альтернативный сценарий предполагает переход к распределенной сети печати по требованию, включающей региональные центры на опорных базах, мобильные комплекты для восстановительных операций и интегрированный электронный реестр цифровых моделей, связанный с системами управления активами и складом-каталогом номенклатуры [1; 4, с. 134–141; 7, с. 576–580].

Калибровка системно-динамической модели выполнена по статистике фактических задержек в навигационные и межнавигационные периоды, данным о частоте отказов критического оборудования добычи и подготовки, а также по нормативам длительности технологических операций, отраженным в корпоративных регламентах. Блок печати учитывает технологические ограничения для синтеза из металлических порошков на подложке при критических применениях, включая требования к подготовке сырья, прослеживаемости партий и протоколированию режимов, зафиксированные в ГОСТ Р 59930-2021/ISO/ASTM 52904:2019, а также стандартизированные правила представления и обработки технологических данных по ГОСТ Р ISO/ASTM 52950-2022 [11, 12]. Для валидизации управленческих допущений применены матрица заинтересованных сторон, экспертные интервью с руководителями логистических блоков и сервисных подразделений, а также поэтапно-фазовый контроль зрелости решений, позволивший корректировать входные параметры по мере уточнения профиля рисков [4, с. 138–142; 9, с. 181–186].

Сопоставление сценариев демонстрирует устойчивое снижение средней длительности незапланированных простоев оборудования в результате локального изготовления наиболее дефицитных и критичных изделий. Сокращение достигается за счет исключения наиболее вариативного плеча снабжения, приходящегося на межнавигационные месяцы, и за счет устранения очередности приоритетных заявок на аварийные рейсы. В агрегированном выражении среднее время восстановления сокращается на треть относительно базового уровня, а коэффициент технической готовности возрастает до устойчивых значений порядка 0,96, что подтверждает гипотезу о доминировании факторов времени поставки и предсказуемости логистики над эффектами простого наращивания складских остатков в условиях крайней удаленности [3, с. 63–67; 6, с. 31–35].

Экономический результат проявляется через снижение совокупных логистических расходов и высвобождение оборотного капитала из медленно оборачиваемых запасов.

Системная оценка полной стоимости владения, включающая транспортные издержки, страховые запасы, расходы на авиадоставку, энергопотребление печати, контроль качества и обучение персонала, показывает уменьшение затрат на материально-техническое обеспечение на величину, сопоставимую с почти одной пятой базового уровня, при параллельном снижении потребности в поддержании высоких страховых запасов обеих номенклатурных групп — высокозатратных комплектующих низкой частоты потребления и деталей с критической стоимостью часа простоя. Экономия оборотного капитала достигает значимых значений за счет перевода части ассортимента в режим «печать по требованию», что согласуется с управленческой логикой переноса точки окончательной конфигурации к месту потребления и поддерживается выводами, представленными в работах по транспортно-логистическим факторам и цифровой инфраструктуре Арктики [4, с. 128–133; 8, с. 29–32].

Оптимизационный блок с ограничениями по мощностям, доступности квалифицированного персонала, энергетическим лимитам и нормативам приемки обеспечивает рациональное размещение печатных модулей и задание объемов резервного хранения с учетом сезонности и вероятностного характера нарушений логистики. Решение, устойчивое в широком диапазоне параметров, предполагает концентрацию высокоточных процессов синтеза в региональном центре с развитой функцией контроля качества и распределение восстановительных работ, включая наплавку и ремонт оснастки, вблизи площадок добычи. Такая конфигурация минимизирует приведенные затраты с учетом штрафов за простой и внешних эффектов выбросов при дальних перевозках, а также повышает гибкость реакции на всплески аварийного спроса. Дополнительная интеграция с аналитическим модулем прогнозирования потребности уменьшает долю непредвиденных закупок, что выражается в сокращении амплитуды колебаний загрузки логистической инфраструктуры и более ровном профиле потребления материалов печати [7, с. 576–580; 10].

Экологический эффект фиксируется в методике анализа жизненного цикла с учетом замещения транспортных операций и энергетического профиля печатных площадок. Снижение выбросов парниковых газов достигается прежде всего за счет сокращения межрегиональных перевозок и отказа от части аварийных авиарейсов, а также вследствие увеличения доли восстановительных операций, продлевающих срок службы узлов. При привязке к эквиваленту диоксида углерода и нормировании на единицу изготовленной детали интегральный показатель снижает базовое значение на величину, близкую к одной седьмой, что находится в русле государственных приоритетов экологической ответственности промышленной деятельности на Севере [1; 5, с. 5–12].

Агрегированный индекс логистического риска, рассчитанный по вероятностям сбоев на ключевых плечах и по величинам ущерба в виде недополученной добычи и дополнительных издержек, демонстрирует переход к более устойчивому состоянию. Значение индекса опускается от уровня, характерного для избыточной зависимости от коротких транспортных окон, к диапазону, соответствующему диверсификации маршрутов и источников обеспечения, что коррелирует с выводами исследований по системному развитию транспортной инфраструктуры и стратегическому управлению рисками в Арктике [3, с. 61–68; 6, с. 33–36].

Чувствительный анализ, выполненный по ключевым параметрам стоимости порошков, энергетических тарифов, продолжительности навигационных периодов и вероятности метеозадержек, подтверждает устойчивость экономического результата. Даже при росте цен на металлические порошки, приближающемся к верхней границе ожидаемых колебаний, чистая приведенная стоимость проекта сохраняет положительное значение за счет эффекта от снижения простоев и логистических издержек. Ужесточение климатических ограничений и сокращение навигационного окна усиливают относительное преимущество локального изготовления, поскольку выигрыш во времени поставки становится еще более значимым фактором в целевой функции управления готовностью и затратами [2, с. 42–56; 4, с. 140–142].

С управленческой точки зрения подтверждается гипотеза о том, что совмещение технологических и институциональных

инноваций — стандартизации «готовности к печати», аккредитации поставщиков сырья и внедрения единого цифрового реестра моделей — создает синергетический эффект, выходящий за рамки суммарного влияния отдельных мер. Верификация результатов по этапам, включающая контрольные точки для оценки зрелости процессов синтеза, инспекцию процедур прослеживаемости и сопоставление фактических показателей готовности с контрактными требованиями, обеспечивает своевременную корректировку инвестиционного портфеля и закрепление достигнутых эффектов в регламентной базе [11; 12; 9, с. 177–188].

Обсуждение

Полученные результаты согласуются с логикой управленческого перехода от исключительно ценовой оптимизации к балансировке устойчивости, гибкости и экологической ответственности в цепях поставок Крайнего Севера. Аддитивное производство в этой парадигме выступает не как самоцель, а как инструмент изменения топологии материальных и информационных потоков, позволяющий перенести критические операции за границу наибольшей неопределенности и разорвать связку между короткими сезонными окнами и способностью поддерживать требуемый уровень сервиса. В отличие от централизованной модели, где вариативность сроков транслируется по всей цепочке и требует наращивания запасов, распределенная печать по требованию обеспечивает локальную буферизацию времени и объема, что уменьшает колебания в работе добычных ниток и снижает необходимость в дорогих страховых мерах. Этот эффект особенно заметен для номенклатуры с низкой частотой потребления и высокой стоимостью часа простоя, где даже незначительное ускорение поставки эквивалентно существенному снижению недополученного выпуска [3, с. 61–66; 7, с. 576–580].

Ключевым методологическим вопросом является интеграция печатных процессов в существующие контуры управления активами и снабжением. Без стандартизированной «сквозной нити» данных и унифицированных требований к критическим применениям риски трансакционных издержек и регуляторной неопределенности сохраняются, что снижает готовность компаний переносить ответственность за качество на локальные площадки. Наличие гармонизированных требований к процессу синтеза, прослеживаемости сырья и протоколу представления данных формирует общий язык между заказчиком, производителем и контролирующими органами и делает возможной контрактную фиксацию уровней обслуживания для локальной печати наравне с традиционными поставками [11, 12]. Таким образом, институциональная рамка становится не менее важным фактором успеха, чем техническая зрелость оборудования и доступность квалифицированного персонала.

Результаты оптимизационных расчетов указывают на рациональность гибридной конфигурации, в которой региональный центр выступает узлом концентрации компетенций контроля качества и серийного изготовления, а ближние к промыслам мощности берут на себя восстановительные и уникальные работы. Такая архитектура требует развитых процедур разделения ответственности и прозрачного разграничения доступа к цифровому складу моделей, включая версионирование, контроль изменений и юридически корректную фиксацию статуса «готовности к печати». Управленческие механизмы, подобные межкорпоративному консорциуму для обмена спецификациями и процедур «белых списков» поставщиков порошков, снижают барьеры входа и ускоряют диффузию лучших практик, что подтверждается динамикой зрелости проектов при реализации поэтапно-фазового контроля [4, с. 138–142; 9, с. 177–188].

С позиции устойчивого развития экологический компонент приобретает самостоятельное значение. Снижение объема дальних перевозок и рост доли восстановительных операций не только уменьшают прямые выбросы, но и ограничивают вероятность аварийных ситуаций, связанных с метеозадержками и сложной логистикой, что соответствует приоритетам государственной стратегии развития Арктической зоны и обеспечению предсказуемости поставок по опорным маршрутам [1; 4, с. 128–133]. В то же время энергетический профиль печатных площадок и утилизация порошков требуют ясных регламентов и бенчмаркинга, чтобы экологическая выгода была подтверждена методами анализа жизненного цикла в разных режимах загрузки мощностей.

Влияние структуры энергобаланса региональных центров на интегральный углеродный след подтверждает необходимость координации с программами декарбонизации и цифровой модернизации инфраструктуры [4, с. 134–141; 5, с. 5–12].

Наконец, выявляется важность кадрового измерения. Управление эксплуатационными рисками при локальном изготовлении критических элементов требует не только подготовки операторов и инженеров контроля качества, но и формирования у управленческих команд компетенций в области оценки полной стоимости владения, сценарного анализа и контрактного закрепления уровней сервиса. Там, где такие компетенции подкреплены стандартами и цифровой прослеживаемостью, локальная печать включается в «обычные» процедуры снабжения; там, где институциональная интеграция не завершена, применение ограничивается вспомогательными изделиями и ремонтными наплавками, что сдерживает масштаб эффекта для готовности и затрат [10; 7, с. 578–580].

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует, что аддитивные технологии обладают значительным управленческим потенциалом как механизм устойчивого материально-технического обеспечения арктических нефтегазовых промыслов. Комбинация системно-динамического моделирования и оптимизационных процедур, дополненная управленческой верификацией, позволяет количественно подтвердить улучшение показателей готовности, снижение совокупных логистических расходов и уменьшение углеродного следа при переходе к распределенной сети печати по требованию. Эффект обусловлен изменением топологии логистических плеч, сокращением неопределенности сроков и переносом точки окончательной конфигурации к месту потребления, что прямо коррелирует с особенностями институциональной среды Севера и ограничениями коротких транспортных окон [2, с. 42–56; 3, с. 61–68].

Интеграция локального изготовления в стандартные контуры снабжения возможна при наличии согласованной институциональной рамки, включающей единые стандарты «готовности к печати», аккредитацию поставщиков материалов, цифровую прослеживаемость и механизмы межкорпоративного обмена спецификациями. В этих условиях аддитивное производство перестает быть экспериментальной опцией и превращается в устойчивый элемент логистической стратегии, повышающий предсказуемость добычи и конкурентоспособность северных проектов, что соответствует долгосрочным ориентирам государственной политики в Арктике [1; 4, с. 128–145; 11; 12].

Практический вклад работы выражается в формировании управленческой дорожной карты промышленного масштабирования технологии до 2030 года, включающей приоритезацию номенклатуры по критичности и частоте потребления, рациональное распределение печатных мощностей между региональными центрами и площадками добычи, институциональную интеграцию цифрового реестра моделей с системами управления активами и регламентацию процедур приемки. Результаты чувствительного анализа подтверждают устойчивость экономической эффективности к ценовым и климатическим колебаниям, что снижает инвестиционные риски и поддерживает принятие решений в условиях неопределенности, характерной для арктических проектов [4, с. 138–142; 8, с. 29–32].

Дальнейшие исследования целесообразно направить на уточнение юридических аспектов распределенной ответственности за качество при трансграничном обмене цифровыми моделями, на расширение номенклатуры материалов с учетом низкотемпературной эксплуатации, а также на разработку интегрированных методик оценки жизненного цикла, учитывающих региональные особенности энергобаланса и сезонной логистики. Сочетание технологических инноваций с институциональными решениями создает основу для формирования в Арктике производственных кластеров нового типа, где локальная печать становится не только источником оперативности и гибкости, но и фактором экологической и социальной устойчивости северной инфраструктуры [1; 4; 5].

Литература

1. Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» [интернет]. Режим доступа: http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972
2. *Серова Н.А., Серова В.А.* Основные тенденции развития транспортной инфраструктуры российской Арктики. Арктика и Север. 2019;(36):42–56. https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2019.36.42
3. *Воронина Е.П.* Транспортное освоение арктических территорий: стратегические задачи и анализ рисков. Арктика: экология и экономика. 2017;(3(27)):61–68. https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-3-61-68
4. *Фадеев А.М., Калязина С.Е., Дубгорн А.С., Левина А.И.* Цифровая и логистическая инфраструктуры Арктической зоны: современное состояние исследований и пути развития. Арктика и Север. 2024;(56):128–145. https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2024.56.128
5. *Осипова Е.Э., Смирнов С.В., Хаирова Т.А.* Предпосылки развития экспорта российской Арктики, каботажных перевозок и проектных грузов для арктических проектов. Арктика и Север. 2019;(37):5–21. https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2019.37.5
6. *Спиридонов А.А., Фадеев А.М.* Системное развитие транспортной инфраструктуры в Арктике. Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. 2022;(4): 31–37.
7. *Абрамов И.В.* Управление цифровым аддитивным производством: особенности и перспективы. Экономика и управление. 2023;29(5):574–580. https://doi.org/10.35854/1998-1627-2023-5-574-580
8. *Ларичкин Ф.Д., Пономаренко Т.В., Фадеев А.М.* Транспортно-логистический фактор в обеспечении конкурентоспособности минерально-сырьевого комплекса Арктической зоны. Север и рынок: формирование экономического порядка. 2014;(3): 29–32.
9. *Фадеев А.М., Фадеева М.Л., Толстых Т.О.* Стратегический подход к внедрению инноваций в Арктике на примере технологии сжижения природного газа «Арктический каскад». Экономика промышленности. 2022;15(2):177–188. https://doi.org/10.17073/2072-1633-2022-2-177-188
10. *Дюдюкина С.А.* Основные аспекты внедрения аддитивных технологий в нефтегазовой отрасли. E-SCIO. 2023;(2). Available at: https://e-scio.ru/wp-content/uploads/2023/05/%D0%94%D1%8E%D0%B4%D1%8E%D0%BA%D0%B8%D0%BD%D0%B0-%D0%A1.-%D0%90.pdf. (In Russ.).
11. ГОСТ Р 59930-2021 / ISO/ASTM 52904:2019. Additive technologies. Powder bed fusion process to meet critical applications. General provisions. Moscow: Стандартинформ; 2021.
12. ГОСТ Р ISO/ASTM 52950-2022. Аддитивные технологии. Представление и обработка данных технологического процесса. Общие положения. Москва: Стандартинформ; 2022.

References

1. Decree of the President of the Russian Federation No. 645 of October 26, 2020 “On the Strategy for the Development of the Arctic Zone of the Russian Federation and Ensuring National Security for the Period until 2035” [internet]. Available at: http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972. (In Russ.).
2. *Serova N.A., Serova V.A.* Critical tendencies of the transport infrastructure development in the Russian Arctic. Arctic and North. 2019;(36):42–56. (In Russ.). https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2019.36.42
3. *Voronina E.P.* Transportation development of the Arctic land area: strategic goals and risk analysis. Arctic: Ecology and Economy. 2017;(3(27)):61–68. (In Russ.). https://doi.org/10.25283/2223-4594-2017-3-61-68
4. *Fadeev A.M., Kalyazina S.E., Dubgorn A.S., Levina A.I.* Digital and Logistical Infrastructures of the Arctic Zone: Current State of Research and Ways of Development. Arctic and North. 2024;(56):128–145. (In Russ.). https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2024.56.128

5. *Osipova E.E., Smirnov S.V., Khairova T.A.* Preconditions for the development of Arctic exports, cabotage shipping, and project cargo for Arctic projects. Arctic and North. 2019;(37):5–21. (In Russ.). https://doi.org/10.17238/issn2221-2698.2019.37.5
6. *Spiridonov A.A., Fadeev A.M.* Systemic development of transport infrastructure in the Arctic. Arctic 2035: Current Issues, Problems, Solutions. 2022;4(12):31–37. (In Russ.).
7. *Abramov I.V.* Management of digital additive manufacturing: Features and perspectives. Economics and Management. 2023;29(5):574–580. (In Russ.). https://doi.org/10.35854/1998-1627-2023-5-574-580
8. *Larichkin F.D., Ponomarenko T.V., Fadeev A.M.* The transport and logistics factor in ensuring the competitiveness of the mineral resource complex of the Arctic Zone. Sever i rynok: formirovanie ekonomicheskogo poryadka. 2014;(3):29–32. (In Russ.).
9. *Fadeev A.M., Fadeeva M.L., Tolstykh T.O.* Strategic approach to implementation of innovation in the Arctics on the example of "Arctic Cascade" natural gas liquefaction technology. Russian Journal of Industrial Economicsю 2022;15(2):177–188. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/2072-1633-2022-2-177-188
10. Dyudyukina S.A. Key aspects of the introduction of additive technologies in the oil and gas industry. E-SCIO. 2023;(2), electronic edition (pagination by publication).
11. State Standard R 59930-2021 / ISO/ASTM 52904:2019. Additive technologies. Powder bed fusion process to meet critical applications. General provisions. Moscow: Standartinform Publ.; 2021. (In Russ.).
12. State Standard R ISO/ASTM 52950-2022. Additive technologies. Presentation and processing of technological process data. General provisions. Moscow: Standartinform Publ.; 2022. (In Russ.).

Сведения об авторах

Самойленко Артём Вадимович — магистрант,
Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого
Россия, 194064, Санкт-Петербург,
ул. Политехническая, д. 29.
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1788-9545
SPIN-код: 7158-1188
Тел: +7 (987) 869-02-84
E-mail: samoilenko.artem2001@mail.ru

Фадеев Алексей Михайлович — доктор экономических наук, главный научный сотрудник отдела экономической политики, морской и хозяйственной деятельности в Арктике и районах Крайнего Севера Института экономических проблем им. Г.П. Лузина ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук»
Россия, 184209, Мурманская обл., г. Апатиты,
ул. Ферсмана, 24а.
Scopus ID: 57210913348
РИНЦ ID: 614337
Web of Sciences ID: AAR-2969-2020
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3833-3316
Тел.: +7 (931) 362-05-46
E-mail: FadeevTeam@yandex.ru

Information about the authors

Artem V. Samoilenko — Master's student,
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
Russia, 194064, Saint Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29.
ORCID: https://orcid.org/0009-0000-1788-9545
SPIN-code: 7158-1188
Tel.: +7 (987) 869-02-84
E-mail: samoilenko.artem2001@mail.ru

Alexey M. Fadeev — Dr. Sci. (Econ.), Luzin Institute for Economic Studies, Cola Science Centre, Apatity, Russia
Russia, 184209, Murmansk region, Apatity,
Fersman str., 24A.
Scopus ID: 57210913348
RSCI ID: 614337
Web of Sciences ID: AAR-2969-2020
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3833-3316
Tel.: +7 (931) 362-05-46
E-mail: FadeevTeam@yandex.ru

Вклад авторов

Самойленко Артём Вадимович — сбор, анализ, интерпретация полученных данных; написание статьи или ее редактирование с целью повышения ее научной значимости; окончательная доработка версии работы, которая будет направлена на рассмотрение возможности опубликования.
Фадеев Алексей Михайлович — существенный вклад в разработку концепции или дизайна работы.

Author contribution statement

Artem V. Samoilenko — data collection and analysis, interpretation of the data obtained; article writing and its revision.
Alexey M. Fadeev — significant contribution to the research concept and design.