Единое цифровое пространство воздушного транспорта АЗ РФ: моделирование потенциала развития аэропортов труднодоступных регионов

Соколов И.Г.
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
ilyasokolov2001@yandex.ru

Фролова В.А.
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
nikylink_89@inbox.ru

Бородулина С.А.
Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

Аннотация. **В статье рассматриваются концептуальные вопросы формирования единого цифрового пространства воздушного транспорта Арктической зоны РФ как среды для моделирования потенциала развития аэропортов труднодоступных регионов. Показано, что развитие аэропортовой инфраструктуры сдерживается не только ресурсными ограничениями, но и отсутствием обоснованных инструментов оценки потенциала конкретных аэропортов с учётом пространственной связанности территории. Предлагается концептуальный подход, в котором ядром моделирования выступает сценарное моделирование, а обеспечивающими механизмами - интеграция данных, цифровые модели аэропортов и маршрутной сети, геоинформационный анализ доступности и визуализация результатов. Для пространственной оценки потенциала предлагается формирование зон притяжения аэропортов на основе изохрон, строящихся по фактической дорожной сети. В качестве критериальной основы применяется классификация синергетических эффектов развития аэропортов Арктической зоны Российской Федерации по сферам воздействия, которая задает целевые ориентиры для оценки потенциала. Подчёркивается, что статья не предъявляет готовый математический аппарат, а формирует методологическую базу для его последующей разработки.**

Ключевые слова: единое цифровое пространство; воздушный транспорт; Арктическая зона РФ; аэропорты труднодоступных регионов; потенциал развития; сценарное моделирование; синергетические эффекты

I. Введение

Арктическая зона РФ (АЗ РФ) характеризуется наличием труднодоступных территорий, где наземная транспортная сеть развита слабо. В таких условиях воздушный транспорт нередко выполняет роль безальтернативного средства обеспечения связанности территорий, жизнедеятельности населения и промышленного освоения удалённых районов [1]. При этом развитие аэропортовой инфраструктуры сдерживается не только ресурсными и природно-климатическими ограничениями, но и отсутствием обоснованных инструментов оценки потенциала развития конкретных аэропортов. Для региональной экономики важно обосновать приоритеты развития аэропортовой сети исходя из их вклада в пространственное развитие, а не ограничиваться описанием существующей конфигурации аэропортов.

Доклад посвящён концептуальным вопросам моделирования потенциала развития аэропортов труднодоступных регионов АЗ РФ в едином цифровом пространстве воздушного транспорта. Завершённая расчётная методика здесь не представлена. Основной акцент сделан на механизмах, позволяющих организовать моделирование, и на системе критериев, связывающей потенциал аэропортов с будущими синергетическими эффектами развития воздушного транспорта. Под такими эффектами понимается дополнительный полезный результат, возникающий за счет системного взаимодействия авиационной инфраструктуры, цифровых решений и смежных отраслей экономики [2]. Он превышает сумму эффектов от изолированного развития отдельных аэропортов и проявляется в снижении пространственной фрагментации территории, ускорении инвестиционных процессов и повышении устойчивости арктических регионов [3].

II. Единое цифровое пространство как среда для моделирования

Если рассматривать потенциал аэропорта в отрыве от общей транспортной системы, то за рамками оценки остаются ключевые аспекты. Локальный анализ не позволяет комплексно оценить влияние аэропорта на транспортную связанность территории, учесть конкуренцию с другими видами сообщения, а также факторы сезонности и социальные ограничения, которые в условиях АЗ РФ приобретают особую значимость. Следовательно, возникает объективная необходимость перехода от изолированного анализа к системному. В качестве такой среды предлагается рассматривать единое цифровое пространство воздушного транспорта АЗ РФ. Оно формирует единый цифровой контур, в котором агрегируются разрозненные информационные массивы (от пространственных данных до отраслевой статистики) и алгоритмы их обработки [4]. Это создает основу для многокритериального моделирования, где потенциал аэропорта раскрывается через его связи с другими элементами транспортной сети и социально-экономическими процессами на территории.

Информационную основу единого цифрового пространства образуют официальная статистика Росстата и Росавиации, а также отчетность аэропортов. Особое место в этой структуре отводится геоинформационным слоям, которые описывают

пространственную связность территории. Они содержат информацию о конфигурации транспортных коммуникаций, включая зимники и речные маршруты, а также о системе расселения – от опорных пунктов до удаленных поселений. Сопоставление этих данных с климатическими и сезонными факторами, а также с параметрами социальной доступности позволяет формировать целостную картину для последующего моделирования.

Существенным условием для последующего моделирования выступает сопряжение собранных данных с нормативно-правовыми ориентирами. В качестве такого стратегического контура выступают Транспортная стратегия РФ и Стратегия развития Арктической зоны, определяющие приоритеты государственной политики. Их положения раскрываются в региональных программах и документах территориального планирования. При этом учет Стратегии пространственного развития РФ обеспечивает связку отраслевых задач с общими задачами пространственной организации экономики. В результате сценарный анализ приобретает системный характер: векторы развития аэропортов формируются на основе совокупности действующих регуляторных требований и стратегических приоритетов.

Под потенциалом развития аэропорта в докладе понимается управляемый процесс качественных и количественных изменений в аэропортовой инфраструктуре, направленный на повышение транспортной доступности, надежности и безопасности перевозок с учетом накопленной инфраструктурной базы и потребностей региона и страны в целом. Оценка данного потенциала предполагает выявление накопленных ресурсов, возможностей и резервов территории и самого аэропорта для повышения качества авиационного обслуживания, устойчивости функционирования и социально-экономической связанности региона. Для комплексного анализа этого процесса предлагается использовать четыре взаимосвязанных разреза: инфраструктурный, транспортный, экономический и социальный. Такой выбор отражает логику перехода от внутренних ресурсов аэропорта к внешним эффектам для территории. Многомерный характер потенциала предполагает наличие цифровой среды, в рамках которой становится возможным совместный анализ и визуализация данных различной природы.

III. Потенциал развития аэропортов и возникающие синергетические эффекты

Для содержательной оценки потенциала необходима система критериев. В статье предлагается формировать её на основе классификации синергетических эффектов развития аэропортов АЗ РФ по сферам воздействия, представленной на рис. 1. Она включает экономические, социальные, экологические, технологические и стратегические эффекты. Такая логика обусловлена тем, что потенциал развития аэропорта рассматривается как способность создавать предпосылки для возникновения этих эффектов: экономических, социальных, экологических, технологических и стратегических. Иными словами, классификация эффектов задаёт целевые ориентиры, относительно которых выстраиваются критерии потенциала.

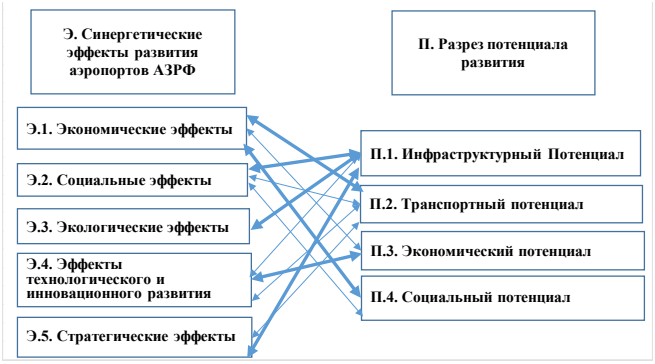


Рис. 1. Взаимосвязь разрезов потенциала развития и синергетических эффектов развития аэропортов АЗ РФ

С позиции формирования системы критериев каждая из выделенных сфер задает свои оценочные параметры. Так, экономическая плоскость фокусирует внимание на оптимизации издержек, росте инвестиционной привлекательности и запуске мультипликативных процессов в смежных отраслях. Социальный вектор ориентирует модель на повышение транспортной доступности, предотвращение изоляции удаленных поселений и сохранение культурного наследия. Экологический вектор приобретает в АЗ РФ критическое значение из-за рисков деградации многолетнемерзлых пород, что требует учета параметров снижения авиационного воздействия. Технологическая сфера задает критерии безопасности, регулярности полетов и восприимчивости инфраструктуры к инновациям. Наконец, стратегическая составляющая увязывает развитие аэропортов с обеспечением суверенного контроля, территориальной связности и надежности инфраструктуры.

Такая система критериев позволяет не сводить потенциал аэропорта к пассажиропотоку. Она показывает, что развитие аэропорта в труднодоступном регионе может давать эффекты, которые проявляются за пределами самого аэропорта – в связанности территории, социальной устойчивости и стратегической управляемости макрорегиона. Оценка синергетических эффектов развития воздушного транспорта в АЗ РФ рассматривается как следующий этап после моделирования потенциала аэропортов, цифровое пространство обеспечивает необходимую базу данных для их расчета.

Для перехода от теоретических критериев к их практическому измерению необходимо определить пространственные границы влияния аэропорта. Оценка потенциала конкретного объекта неразрывно связана с характеристиками территории, на которую он оказывает влияние. В связи с этим возникает необходимость формирования зоны оценки потенциала пространственного развития, опирающейся на реальные параметры транспортной доступности.

IV. Формирование зоны оценки потенциала пространственного развития

Неравномерное пространственное развитие, сконцентрированное преимущественно в западной части страны, приводит к пространственной неоднородности. Она выражается в значительных различиях по плотности населения, транспортной освоенности, масштабам и структуре хозяйственной деятельности [5, 6].

Использование показателя потенциала пространственного развития (ППР) обусловлено необходимостью охарактеризовать территорию и предпосылки для развития конкретного аэропорта. Данный показатель отражает, насколько территория, функционально связанная с аэропортом, обладает устойчивыми и воспроизводимыми демографическими, трудовыми и инвестиционными характеристиками, оказывающими непосредственное влияние на развитие аэропортов.

Территорию, связанную с конкретным аэропортом, можно считать зоной его притяжения. Ее построение предлагается осуществлять на основе изохрон. Это не означает, что за их пределами отсутствует спрос на поездки в данный аэропорт, однако такой принцип позволяет связать абстрактное улучшение транспортной доступности с конкретным показателем времени в пути до аэропорта.

Хотя зона притяжения аэропорта может быть построена по условному радиусу вокруг аэропорта, такой способ практически всегда дает ошибочную картину. Особенно это характерно для АЗ РФ, которая характеризуется малой плотностью, изношенным состоянием автомобильных дорог. Поэтому в основе расчета лежит фактическая дорожная сеть OpenStreetMap (OSM), представленная как взвешенный ориентированный граф. Схематично работа программы представлена на рис. 2.

Исходными данными являются аэропорты и населенные пункты с их географическими координатами, а также автодорожная сеть OSM. Так как время в пути зависит от скорости, то для каждого типа дорог из OSM задается конкретная скорость, позволяющая учитывать общий характер дороги. При этом модель остается упрощенной, так как не учитывается фактический трафик, временные ремонты дорог и максимально разрешенная скорость.

Для построения изохрон используется алгоритм Дейкстры. Все веса дорожных ребер являются неотрицательными. Для такого графа данный алгоритм гарантированно находит минимальную стоимость пути от аэропорта до всех достижимых узлов. При этом все узлы делятся на 2 группы: 1 – достижимые в пределах лимита времени; 2 – недостижимые.

Алгоритм возвращает дорожные узлы и сегменты, которые на карте выглядят как разветвленная сеть линий. Такая сеть точна в дорожном смысле, но неудобна как обзорная изохронная карта. Чтобы получить область, вокруг достижимых линий строится буфер, затем отдельные буферы объединяются и сглаживаются. При этом полигон не следует интерпритировать как утверждение, что каждая точка внутри него доступна автомобилю за заданное время. Она является картографическим обобщением доступной дорожной сети.

Вместе с тем для каждого населенного пункта программа ищет несколько ближайших дорожных узлов. Для каждого аэропорта проверяется, есть ли среди этих узлов достижимый и рассчитывается итогове время. После этого выполняются 2 независимые проверки:

1 достижим ли данный населенный пункт по дорожному графу в пределах лимита;

2 попадает ли его координата внутрь построенного полигона или рядом с его границем.

Затем формируется автономный HTML-файл с интерактивной картой. На нее выводятся изохроны, аэропорты, населенные пункты, всплывающие сведения о времени пути и расстоянии, граничные точки временного лимита. Полигоны имют разные цвета, которые зависят от времени изохроны, что позволяет одновременно наглядно отображать для каждого аэропорта несколько временных лимитов.

Важно отметить, что использование сглаживания и буфера влияют на форму зоны. Они могут включить в полигон пространство без дороги или, наоборот, оставить достижимый населенный пункт рядом с внешней границей. Однако их использование позволяет сформировать более наглядную карту.

Предложенный алгорит является универсальным и может применяться не только к АЗ РФ, но и к другим регионам. Необходимо только изменять входные данные.

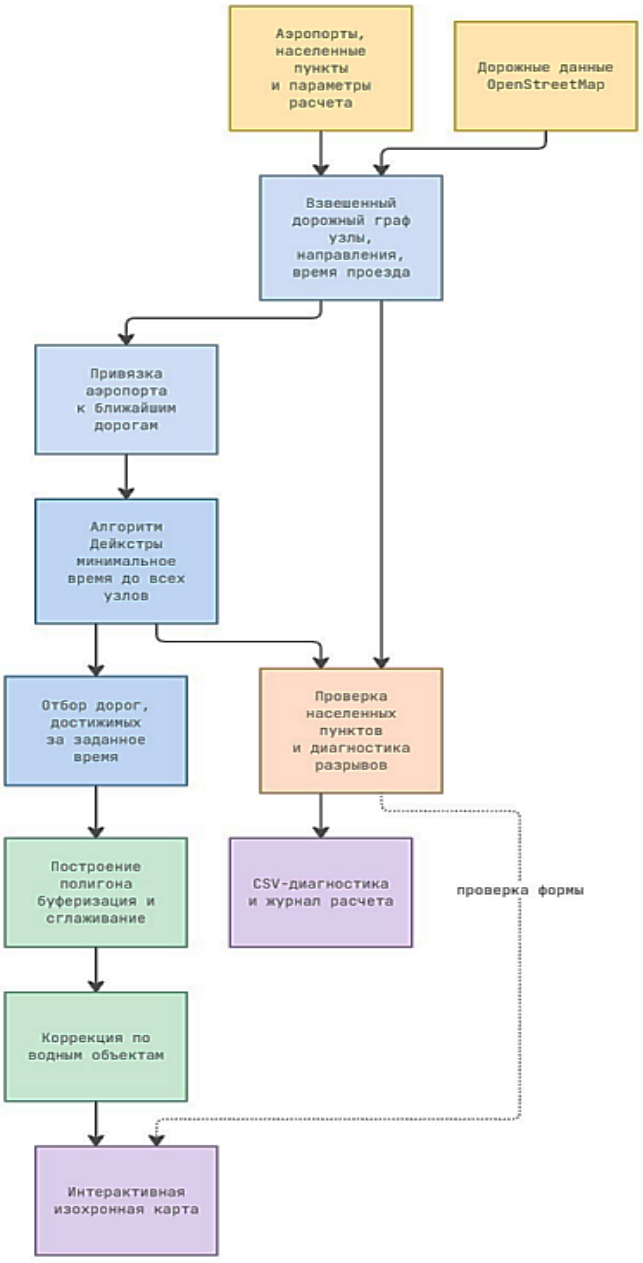


Рис. 2. Схема построения изохронной карты

Построенные таким образом зоны притяжения и рассчитанные изохроны становятся базой для дальнейшего сценарного моделирования. Именно они позволяют перейти от статичной оценки к динамическим сценариям, оценивая, как изменение инфраструктуры или маршрутной сети повлияет на доступность территорий.

V. Механизм сценарного моделирования

Ядром подхода выступает сценарное моделирование потенциала развития аэропортов в едином цифровом пространстве. В рамках данного подхода сценарий формализуется как совокупность варьируемых параметров, определяющих выбор рассматриваемых аэропортов, характер предполагаемых изменений, а также ресурсные, климатические и инфраструктурные ограничения. Сценарное моделирование не подменяет собой строгий математический аппарат, а формирует для него информационно-аналитическую базу, обеспечивая структурирование данных, критериев и альтернативных вариантов развития.

Методологией исследования предусмотрено формирование трех альтернативных сценариев. Базовый сценарий отражает сохранение текущей архитектуры аэропортовой сети. Второй вариант базируется на селективной (точечной) модернизации аэропортов с максимальным потенциалом доступности. Третий сценарий акцентирует приоритетное развитие аэропортов-хабов, обеспечивающих связанность труднодоступных территорий. Каждый из сценариев предполагает изменение исходных параметров дорожной сети или инфраструктуры аэропортов, что влечет за собой пересчет изохрон и позволяет оценить прирост зон притяжения и, соответственно, потенциала пространственного развития территории.

Инструментальную основу сценарного моделирования формируют интеграция разнородных данных в едином цифровом пространстве, цифровые модели аэропортов и маршрутной сети, геоинформационный анализ пространственной доступности (на базе построенных изохрон), а также визуализация результатов. Поскольку строгий математический аппарат находится в стадии разработки, сопоставление сценариев на текущем этапе предполагает применение методов многокритериального ранжирования, балльных и экспертных оценок, а также качественного сценарного анализа. Полученные результаты визуализируются в цифровой среде (в виде карт, панелей индикаторов и сравнительных профилей), что обеспечивает наглядную поддержку при принятии решений экспертами и региональными органами власти.

VI. Заключение

В докладе представлена постановка задачи моделирования потенциала развития аэропортов труднодоступных регионов АЗ РФ в едином цифровом пространстве воздушного транспорта. Обоснована целесообразность многомерного рассмотрения потенциала, а в качестве критериальной основы предложено использовать классификацию синергетических эффектов по сферам воздействия. Для пространственной оценки потенциала обоснован метод формирования зон притяжения аэропортов на основе изохрон, рассчитываемых по фактической дорожной сети. Ядром моделирования определено сценарное моделирование, опирающееся на интегрированные данные, цифровые модели, построение изохрон, геоинформационный анализ и визуализацию. Поскольку работа закладывает основы для дальнейших расчетов, она не претендует на представление завершенной математической модели, а формирует методологическую базу: определяет состав данных, критерии потенциала, набор сценариев и методы их сопоставления. Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой математического аппарата оценки потенциала, синергетических эффектов и его апробацией на эмпирических данных конкретных аэропортов АЗ РФ.

Список литературы

[1] Полешкина И.О. Роль малой авиации в обеспечении транспортной доступности Арктических регионов: проблемы и направления развития // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2022. Т. 25. № 2. С. 54–69.

[2] Бородулина С.А., Фролова В.А., Фролов Д.О. Синергетический эффект развития воздушного транспорта Арктической зоны Российской Федерации // Финансы и учетная политика. 2026. № 1. С. 84–95.

[3] Губенко А.В., Бородулина С.А., Крутцов А.С. Подход к моделированию региональных эффектов при реализации инфраструктурных проектов воздушного транспорта // Экономика и управление. 2023. Т. 29, № 4. С. 435–442.

[4] Маркина А.А., Коновалова У.В., Иванова А.С. Проблемы формирования единой цифровой транспортной системы // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: сб. статей VII Всерос. науч.-практ. конф. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2026. С. 110–113.

[5] Коломак Е.А. Неравномерное пространственное развитие в России: объяснения новой экономической географии // Вопросы экономики. 2013. № 2. С. 132–150.

[6] Наумов И.В., Никулина Н.Л. Оценка пространственной неоднородности экономической деятельности хозяйствующих субъектов в муниципальных образованиях Свердловской области // Экономика региона. Т. 18, № 3. 2022. С. 820–836.