

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
(ФГУП ГОСНИИ ГА)

На правах рукописи

Егошин Сергей Федорович

**МЕТОДИКА ВЫБОРА ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ
ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ СТРАНЫ**

Специальность 2.9.6 «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники»

Диссертация

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Шапкин Василий Сергеевич,
д-р техн. наук, профессор

Москва – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ СТРАНЫ	13
1.1 Проблемы обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны	13
1.2 Особенности организации местных воздушных перевозок и современного парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны	17
ГЛАВА 2 МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ВЫБОРА ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ СТРАНЫ	33
2.1 Существующие методы расчёта парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны.....	33
2.2 Задача выбора парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны.....	36
2.3 Критерии задачи выбора парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны.....	46
2.4 Комплекс моделей для задачи выбора парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны	52
2.4.1 Модель расчёта времени типовой операции местных воздушных перевозок	55
2.4.2 Модель расчёта стоимости типовой операции местных воздушных перевозок	61
2.4.3 Модель расчёта объёмов местных воздушных перевозок	70
2.4.4 Прочие модели.....	76
ГЛАВА 3 АЛГОРИТМ МЕТОДИКИ ВЫБОРА ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ	

ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ СТРАНЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ	84
3.1 Предварительная оценка эффективности обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны с применением современных воздушных судов.....	85
3.2 Выделение локальных авиатранспортных подсистем.....	86
3.3 Поиск рациональной структуры локальных авиатранспортных подсистем.....	95
3.4 Оптимизация маршрутной сети местных авиалиний с учётом возможной промежуточной посадки	103
3.5 Оптимизация локальных авиатранспортных подсистем с учётом применения винтокрылых летательных аппаратов.....	106
3.6 Алгоритм расстановки парка воздушных судов по авиалиниям для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны	120
ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ВЫБОРА ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ СТРАНЫ	123
4.1 Структура программного комплекса с учётом алгоритма выбора парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны	123
4.2 Формирование типоразмерного ряда парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны	127
4.3 Результаты расчётов парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	143
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	146
Приложение А Сравнение фактического и расчётного времени перелёта самолёта L-410 на МВЛ.....	158

Приложение Б Примерная схема генерального плана аэропорта III категории ..	160
Приложение В Соответствие кластеров целесообразного применения вертолётов.....	161
Приложение Г Рассчитанные показатели рассматриваемых сценариев при условиях «частота рейсов – 5 рейсов в неделю» и «суммарное время местной поездки – не более 4 часов».....	162

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение транспортной доступности территорий является одной из важных задач, стоящим перед любым государством. От ее решения напрямую зависят суверенитет, устойчивое развитие и непосредственно существование государства.

Конституцией Российской Федерации гарантированы равные возможности граждан на всей ее территории, в том числе права населения в области здравоохранения, образования и других государственных услуг. В силу неравномерного развития инфраструктуры наземного транспорта субъектов РФ, неоднородного распределения населения по их территории, невозможно или очень сложно обеспечить, например, одинаковое время поездки для всех граждан России.

Отсюда одним из путей повышения транспортной доступности (и в конечном счете доступности услуг высокотехнологичной медицинской помощи, высшего образования, ряда административных и доступа к магистральной транспортной сети) является применение воздушного транспорта как ключевого фактора, определяющего успешное социально-экономическое развитие страны. Вопросы развития потребного парка воздушных судов (ВС), как составляющего элемента транспорта, находятся во внимании государства, и тем самым требуют постоянного научно-методического сопровождения.

Актуальность работы

В «Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» [18] в числе задач государства указаны повышение доступности и качества транспортных услуг для жителей труднодоступных территорий, в том числе в части скорости обслуживания пассажиров. Указанная задача ставится применительно ко всем типам транспортных перевозок, включая местные воздушные пассажирские перевозки (местные воздушные авиалинии, далее МВЛ).

В субъектах Российской Федерации (РФ) с труднодоступными территориями (далее для простоты называемыми «регионы») большие расстояния и малая плотность населения делают нецелесообразной, а иногда и невозможной организацию круглогодичного наземного сообщения. Вследствие этого, МВЛ зачастую становятся единственной возможностью перемещения между населёнными пунктами. Характерной особенностью местных перевозок является их несопоставимо высокая себестоимость по сравнению со средним уровнем доходов населения труднодоступных территорий, что делает эти перевозки коммерчески непривлекательными и, в силу социальной значимости, вынуждает государство выделять значительные ресурсы на организацию этих перевозок.

Таким образом, отмечается наличие противоречия практического характера между отсутствием необходимых организационно-технических решений при организации МВЛ, в частности возможностью выбора потребного парка ВС, и необходимостью повышения транспортной доступности труднодоступных территорий.

Кроме того, выявлено противоречие научного характера между необходимостью формализации и оценки уровня транспортной доступности труднодоступных территорий и отсутствием необходимого модельно-методического аппарата, в т.ч. в части расчёта парка ВС МВЛ, вследствие невозможности применения рыночных подходов.

Степень разработанности темы исследования

В данной области наиболее известными отечественными исследователями (основоположниками) следует считать Ю.Б. Гермейера, Е.С. Вентцель, Д.Б. Юдина и др. В более узком сегменте научной специализации, применительно к задачам исследования парка ВС, известны разнообразные системные исследования, проводившиеся в 70-80-е гг. в СССР: это работы В.В. Виноградова, В.Г. Дабагына, В.И. Емельянова, В.Н. Касьяненко, Г.Г. Когут, Е.Ф. Косиченко, В.П. Кошкина, А.В. Медведева, Е.Г. Пинаева, Э.И. Ресина, Г.В. Рулева, В.Н. Рябова, Р.В. Сакача, А.А. Фридлянда. Также заметный вклад в решение задач анализа пассажироперевозок на воздушном транспорте, включая МВЛ, внесли

А.В. Башун, Г.С. Дибров, Е.П. Лисин, И.А. Самойлов, С.Ю. Скрипниченко, И.И. Споткай, А.Н. Хижняк. Среди исследований последнего времени можно отметить работы М.А. Бородина, В.П. Горбунова, И.Б. Ивенина, В.В. Клочкова, И.В. Лесниченко, В.П. Маслакова, Р.Р. Низаметдинова, И.О. Полешкиной, В.И. Самойлова, О.Ю. Страдомского, Д.Л. Тукеева, Г.М. Фридмана и др.

Аналогичные зарубежные исследования, посвящённые анализу применения ВС при развитии труднодоступных территорий, немногочисленны, поскольку проблема организации МВЛ присуща только государствам с большой площадью территорий (РФ, США, Канада). Работы, посвящённые данной тематике, проводили Т.Л. Гэлловей, Дж. Р. Дин, Дж. Спинцык, Дж.А. Стерн, Д.У.Хэйворд, У.Дж. Эванс и др.

Существующие подходы к рациональному выбору парка ВС строятся на рассмотрении удельных технико-экономических характеристик (ТЭХ) ВС, на решении ряда декомпозированных задач оптимизации авиатранспортных систем (АТС) с фиксированной или варьируемой структурой сети маршрутов или инфраструктуры, на решении транспортных задач математического программирования. В последнем случае, сложность решения подобных задач связана с их большой размерностью, многоэкстремальностью и наличием дискретных переменных. Указанная сложность крайне затрудняет решение задач в общем виде, и к настоящему времени выработано ограниченное количество методов решения подобных задач при некоторых дополнительных допущениях.

В настоящей работе сформирован не рассматривавшийся ранее комбинированный подход на основе статистических данных, аналитических моделей и методов математического программирования, ключевой особенностью которого является формализация уровня качества транспортного обслуживания пассажиров, что позволило реализовать методику поиска рационального решения задачи как программный комплекс (ПК) с применением современных вычислительных технологий.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является транспортная доступность труднодоступных территорий страны.

Предметом исследования являются модели и методы выбора парка ВС, обеспечивающих транспортную доступность местных перевозок с учётом ограничений, являющихся формализованным описанием уровня качества транспортного обслуживания труднодоступных территорий.

Методы исследования

В диссертационной работе использовались методы системного анализа, имитационного моделирования, линейного и нелинейного математического программирования, статистического анализа.

Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение транспортной доступности труднодоступных территорий страны посредством рационального выбора парка воздушных судов для перспективной сети местных авиалиний, построенной с учётом ограничений, являющихся формализованным описанием уровня качества транспортного обслуживания труднодоступных территорий.

Для достижения цели работы решаются **следующие задачи:**

1. анализ транспортной доступности труднодоступных территорий страны с целью выбора субъектов РФ, для которых повышение транспортной доступности труднодоступных территорий посредством МВЛ является актуальным;
2. разработка методики выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий с учётом формализации соответствующих показателей и моделирования пассажирских перевозок;
3. формализация показателей транспортной доступности труднодоступных территорий;
4. формулировка оптимизационной задачи выбора парка ВС и критериев эффективности обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий;

5. разработка алгоритма решения задачи выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий, в т.ч. формулирование правила рационального выбора парка ВС в этой задаче;

6. разработка ПК с целью апробации методики выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий;

7. апробация работы ПК для оценки транспортной доступности конкретных труднодоступных территорий.

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

1. Предложена формализация критериев транспортной доступности труднодоступных территорий, включающая максимальное время местной поездки и частоту рейсов как вводимые ограничения, с выбором их рациональных значений.

2. Разработана методика выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий, отличающаяся поиском рационального решения транспортной задачи математического программирования при совместной оптимизации маршрутной сети и инфраструктуры с учётом вводимых ограничений и с учётом особенностей МВЛ на труднодоступных территориях.

3. Разработан алгоритм решения задачи выбора парка ВС для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий, снижающий требования к используемым вычислительным мощностям за счёт декомпозиции многоэтапного поиска.

4. Получены результаты расчётов парка ВС для конкретных труднодоступных территорий, обеспечивающего транспортную доступность с учётом рациональных значений вводимых ограничений; по результатам расчётов получен парк ВС в сочетании с его эффективностью решения задачи обеспечения транспортной доступности на примере труднодоступных территорий Республики Саха (Якутия), при этом в числе прочих рассматривались концепции ВС, в отношении которых требуется принятие решения о целесообразности их дальнейшей разработки или внедрения.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные в диссертации результаты позволяют: рассчитывать потребный парк ВС с учётом ограничений на максимальное время местной поездки и частоту рейсов совместно со структурой маршрутной сети МВЛ; выработать решение, обоснованное данной методикой, о возможных направлениях развития МВЛ; сформировать рациональные требования к перспективным ВС МВЛ в зависимости от максимального времени местной поездки и частоты рейсов; проводить сравнительный анализ различных концепций перспективных ВС с учётом вводимых ограничений. Работоспособность ПК продемонстрирована на примере следующих ВС и концепций ВС с применением новых авиационных технологий: самолёт L-410NG; самолёт ЛМС-901 «Байкал»; синтез-облик семейства самолётов ЛМС разработки ФГУП «ЦАГИ»; самолёт короткого взлёта и посадки (КВП) на базе L-410 с системой обдувки крыла. Для этих ВС представлены расчёты с учётом существующего уровня характеристик новых технологий (например, электрических силовых установок).

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается корректностью применения математических методов и соответствием результатов, полученных посредством математического моделирования местных перевозок, закономерностям функционирования существующих транспортных систем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. **Методика выбора** парка ВС для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий страны на основе решения транспортной задачи математического программирования при совместной оптимизации маршрутной сети и инфраструктуры с учётом вводимых ограничений и с учётом особенностей МВЛ на труднодоступных территориях.

2. **Многоэтапный алгоритм** декомпозированного поиска рационального решения задачи выбора парка ВС для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий за приемлемое время.

3. *Результаты расчётов* парка ВС, обеспечивающего транспортную доступность с учётом рациональных значений вводимых ограничений, для конкретных труднодоступных территорий.

Апробация результатов исследования

Результаты и основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 4-ой научно-практической конференции «Проблемы управления научными исследованиями и разработками. Государство и наука: новые модели управления» (ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, 2018 г.); 5-ой научно-практической конференции «Управление научными исследованиями и разработками: роль науки в достижении национальных целей» (ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, 2019 г.); XXVII научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» (МАИ, г. Евпатория, 2023 г.); МНПК «Транспорт России: проблемы и перспективы-2024» (ИПТ РАН, г. Санкт-Петербург, 2024 г.).

Внедрение результатов работы

Результаты диссертационных исследований представлены в т.ч. в материалах отчётов по НИР «Альтернатива» (2017-2019 гг.), «MANGo-ЦАГИ» (2022-23 г.), что подтверждено соответствующими актами.

Личный вклад

Основные результаты диссертационной работы являются оригинальными, получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии, что подтверждено публикациями. Во всех работах по теме исследования, в том числе совместных, автору принадлежат основные положения по разработке модельно-методического аппарата, проведенные расчеты и выводы по их результатам.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и четырёх приложений.

Содержание работы изложено на 163 страницах, включая 58 рисунков и 6 таблиц. Библиографический список литературы включает 98 наименований.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 12 работах, в том числе: 8 статей в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК при Минобрнауки РФ, и 3 работы в трудах и сборниках материалов научных конференций.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРОБЛЕМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ СТРАНЫ

1.1 Проблемы обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны

Согласно «Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года» [18], транспортной доступностью называется «мера способности территории быть достигнутой при помощи транспорта, измеряемая временем, в течение которого данная территория может быть достигнута из определенной точки или другой территории при помощи различных видов транспорта по транспортной сети».

В этом же документе [18] труднодоступными территориями называются такие территории, «где постоянно или на сезонной основе отсутствует техническая возможность круглогодичного и регулярного наземного сообщения альтернативными видами транспорта с административным центром соответствующего субъекта Российской Федерации». В дальнейшем изложении субъекты РФ будут называться термином «регионы», а перевозки внутри регионов – местными.

Следует отметить, что в нормативных документах РФ имеются разночтения в части терминологии, каким образом следует называть рассматриваемые территории. Так, в том же документе [18] термин «труднодоступные территории» используется 3 раза, но в то же время термин «удаленные территории» – 7 раз и без определения. В других документах, например, в «Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года» [17] термин «труднодоступные территории» используется 22 раза, «удаленные территории» – 32 раза, а также 1 раз – термин «отдаленные территории».

В настоящей работе будет использоваться термин «труднодоступные территории», что связано с рассматриваемой предметной областью (подробнее – р.2.3).

В большинстве европейских регионов и некоторых экономически развитых регионах Урала, Сибири, Дальнего Востока местные пассажирские перевозки на труднодоступных территориях реализуются благодаря развитой автомобильной и железнодорожной сети. При этом высокий уровень транспортной доступности обеспечивается как низкой стоимостью проезда, так и достаточно высокой регулярностью и интенсивностью движения транспортных средств.

Иная картина наблюдается для труднодоступных территорий Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока. Как показывает анализ [50], для этих территорий, при отдалённости территории от столицы субъекта РФ более 500 км плотность населения падает до значения менее 1 чел./кв. км (рисунок 1):



Рисунок 1 – Зависимость плотности населения территории от её отдалённости от столицы региона

Аналитическая аппроксимация плотности населения, рассчитанная методом минимизации среднеквадратичного отклонения:

$$\rho = \frac{1,5 \times 10^7}{L^{2,65}}, \quad (1)$$

где L – расстояние от столичного аэропорта до «единицы площади» на территории региона.

Как следует из (1), по мере удаления от столицы плотность населения убывает быстрее, чем $1/L^2$. Для многих местных авиалиний пассажиропоток не превышает 4-5 тысяч человек в год, и в таких регионах МВЛ часто становятся единственным и, как следствие, социально значимым способом внутрирегионального сообщения при условии обеспечения приемлемого уровня транспортной доступности для населения [73].

При этом, с учётом сложных природно-климатических условий, становятся значительными финансовые затраты на перевозки в расчёте на одного человека: например, в 2014 г. себестоимость воздушных перевозок МВЛ находилась в диапазоне 190-460 руб./т-км [89] или, в пересчёте, 17-42 руб./пасс.-км. С учётом дальностей МВЛ, это эквивалентно стоимости перевозки одного пассажира в одну сторону на уровне не ниже 10-15 тыс. рублей, а полные затраты на перевозки МВЛ, с учётом содержания авиационной инфраструктуры, составляли не менее 20 тыс. рублей [50].

Таким образом, если бы стоимость билета на рейс МВЛ полностью включала в себя себестоимость авиаперевозок – данный вид транспортных услуг стал бы практически недоступен для большинства жителей труднодоступных территорий России, поскольку стоимость билета была бы сопоставима с их месячным доходом [7]. Приведённые сведения означают, что функционирование МВЛ невозможно без государственной поддержки.

В то же время, общегосударственные проблемы в 90-х и начале 2000-х годов вызвали кризис в гражданской авиации России. Было упразднено большое количество МВЛ. Обновление парка ВС носит эпизодический характер, эксплуатируются преимущественно ВС производства СССР [84]. При этом постоянный дефицит финансирования авиатранспортной отрасли привёл к критическому износу инфраструктуры и неудовлетворительному состоянию основных фондов аэропортов и аэродромов [30]. Большинство взлётно-посадочных полос (ВПП) с искусственным покрытием были построены более 30 лет назад, что обуславливает высокий уровень их физического и морального

износа. Как результат, закрытые аэродромы перестали использоваться даже в качестве запасных, что также сказывается на выборе парка эксплуатируемых ВС.

Преодоление кризиса и улучшение экономической ситуации в стране вновь повышают значимость задачи восстановления местного воздушного сообщения на труднодоступных территориях.

Одной из задач, стоящих перед прикладной авиационной наукой, является поиск путей развития, направленных на достижение целей в тех областях стратегических интересов государства, где необходимо применение авиации. Тематика развития парка ВС МВЛ, затрагиваемая в настоящей работе, относится к обеспечению транспортной доступности и качества транспортных услуг для населения труднодоступных территорий, и потому входит в стратегические интересы государства.

При этом следует отметить, что транспортные системы, предназначенные для обслуживания труднодоступных территорий, могут рассматриваться как обособленные транспортные системы в масштабах государства. Это обусловлено территориальными особенностями и экономическими потребностями регионов в транспортно-экономических связях [69, 70].

Для принятия решения о направлениях развитии МВЛ, включая выбор парка ВС, необходима разработка комплексного инструментария оценки эффективности обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий. Данный инструментарий должен включать в себя расчёт показателей транспортной доступности с учётом возможных альтернатив выбора парка ВС авиакомпаниями, выполняющими местные пассажирские перевозки в аэропорты на труднодоступных территориях регионов.

В настоящее время при проектировании транспортных систем (в т.ч. авиатранспортных) в первую очередь рассматривают их стоимостные характеристики, за период времени или за весь жизненный цикл. Минимизация затрат соответствует однокритериальной задаче, а другие возможные показатели (качества обслуживания и пр.) в данном случае выступают лишь в качестве ограничений. Многокритериальная же оптимизация системы, в силу

противоречивости возможных критериев, приводит к появлению множеств Парето. Указанная противоречивость является неотъемлемой особенностью многокритериальных задач оптимизации, и здесь под противоречивостью критериев понимается ухудшение значений одного критерия при улучшении значения другого. Если бы это было не так, т.е. было возможным одновременное улучшение значений критериев, то задача сводилась бы к однокритериальной. До некоторых пор такие возможности одновременного улучшения конфликтных показателей (улучшения по Парето) существуют, но когда они исчерпываются, достигается множество Парето, на котором улучшение любого целевого показателя уже сопряжено с ухудшением других.

Для более подробного анализа и с целью выработки необходимого инструментария с учётом выявляемых противоречий в настоящей работе рассматривается Республика Саха-Якутия. Поскольку данный регион является наиболее крупным в составе РФ (площадь – более 3 млн. кв. км), то можно, с учётом многообразия условий применения ВС, априорно утверждать, что выбор парка ВС для этого региона в части рассматриваемых типов ВС, дальности и пассажироместимости ВС будет наиболее вариативен. Следовательно, разработанный инструментарий будет применим и для других регионов с меньшей вариативностью географических и социально-демографических факторов.

1.2 Особенности организации местных воздушных перевозок и современного парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны

Для принятия решений о наиболее рациональных путях развития МВЛ в рассматриваемом регионе, необходимо иметь представление об их современном состоянии и особенностях, в том числе в сравнении с общей ситуацией по стране.

В силу того, что открытые данные, доступные на сайте Росавиации¹, не позволяют выполнить подробный статистический анализ перевозок МВЛ, в т.ч. для 2022-23 гг., использовались имевшиеся в наличии данные для 2015 и 2019 гг.:

- расписание регулярных воздушных перевозок (предоставлено Центром расписания и тарифов ПАО «Транспортная клиринговая компания»);
- географические сведения о местонахождении аэродромов на территории регионов (данные Межрегиональной общественной организации пилотов и граждан-владельцев ВС «РАОПА»).

Актуальность результатов, полученных для 2015 и 2019 гг., применительно к настоящему времени обосновывается тем, что за период 2015-2021 гг. пассажирооборот и объёмы перевозки пассажиров изменялись незначительно (рисунок 2):

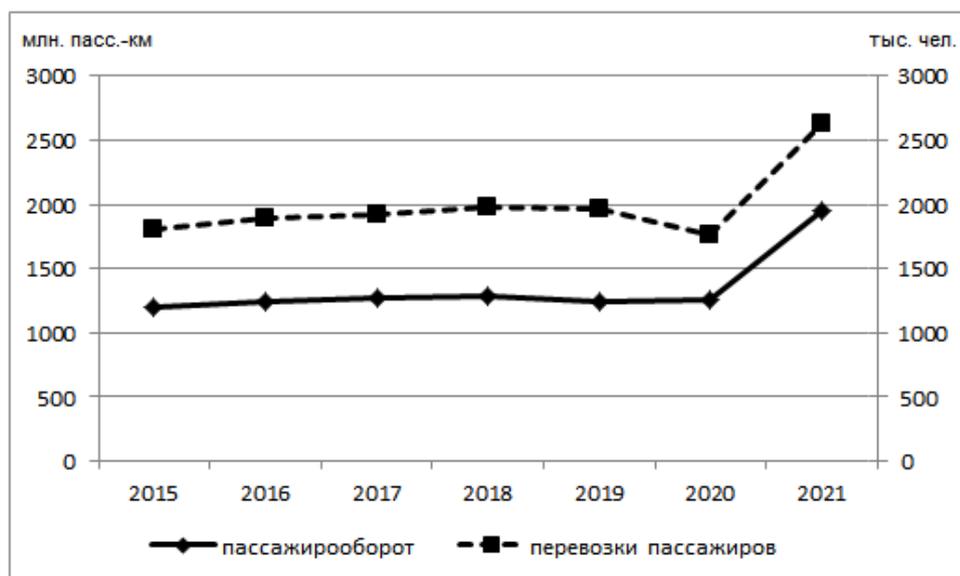


Рисунок 2 – Пассажирооборот (левая ось) и объёмы воздушных пассажирских перевозок (правая ось) за 2015-2021 гг.

За указанный период времени, за исключением 2021 г., приведённые показатели МВЛ изменялись не более чем на 8-9 %, а темп роста не превышал 1,2 % в год [56, 87]. Подобная стагнация объёмов местных воздушных перевозок отмечается и другими исследователями [21]. Это позволяет изучить особенности

¹ На момент выполнения работы по ссылкам <https://favt.gov.ru/deyatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy-osnovnie-proizvodstvennie-pokazateli-aeroportov-obyom-perevoz/> и <https://favt.gov.ru/deyatelnost-vozdushnye-perevozki-osnovnye-proizvodstvennye-pokazateli-ga/> доступны данные только на февраль 2022 г.

организации МВЛ путём их анализа в указанные годы и трактовать применимость результатов анализа для прогнозирования социально-экономического развития труднодоступных территорий в ближне- и среднесрочной перспективе.

Значительный же рост в 2021 г. объясняется особенностями статистического учёта перевозок МВЛ: поскольку аэропорты для каждой авиалинии находятся в пределах одного региона, в статистику были формально включены те из них, которые связывают аэропорты в субъектах, не имеющих труднодоступных территорий в регионе (например, «Краснодар - Сочи» в Краснодарском крае). При дальнейшем анализе такие авиалинии были исключены из рассмотрения. Также допущением анализа является рассмотрение Таймырского Долгано-Ненецкого района как обособленного региона со столицей в Норильске в силу исторически сложившихся связей (вошёл в состав Красноярского края в 2007 г.).

Результаты анализа состояния местных воздушных перевозок таковы.

В целом, местные воздушные пассажирские перевозки составляют малую часть от общего объёма внутренних пассажирских авиаперевозок в Российской Федерации. Например, за период 2015-2019 гг. их доля в общем объёме авиаперевозок – 3% по числу пассажиров и 1% по пассажирообороту. Среднее количество пассажиров на рейс МВЛ составило менее 40 человек, что отражается в применении преимущественно ВС меньшей пассажироместимости, чем на магистральных и региональных авиалиниях.

Основным типом ВС, применявшихся для пассажирских перевозок МВЛ, оставался самолёт Ан-24/26, на который в 2015-2019 гг. приходилось 40-45% рейсов в масштабах страны и 70-75% рейсов в Республике Саха-Якутия (рисунки 3-4).

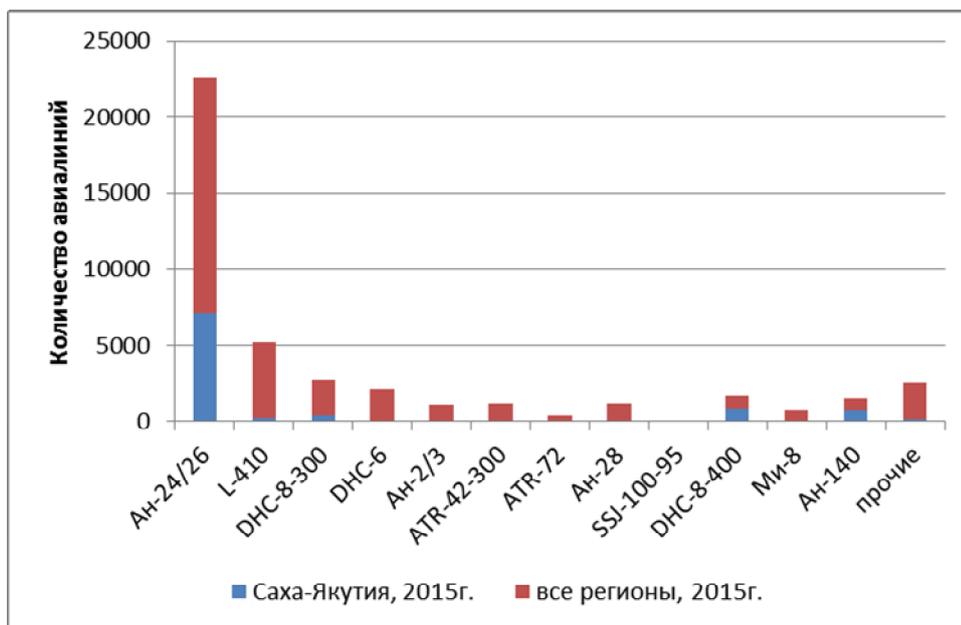


Рисунок 3 – Распределение рейсов МВЛ по типам применяемых ВС (2015 г.)

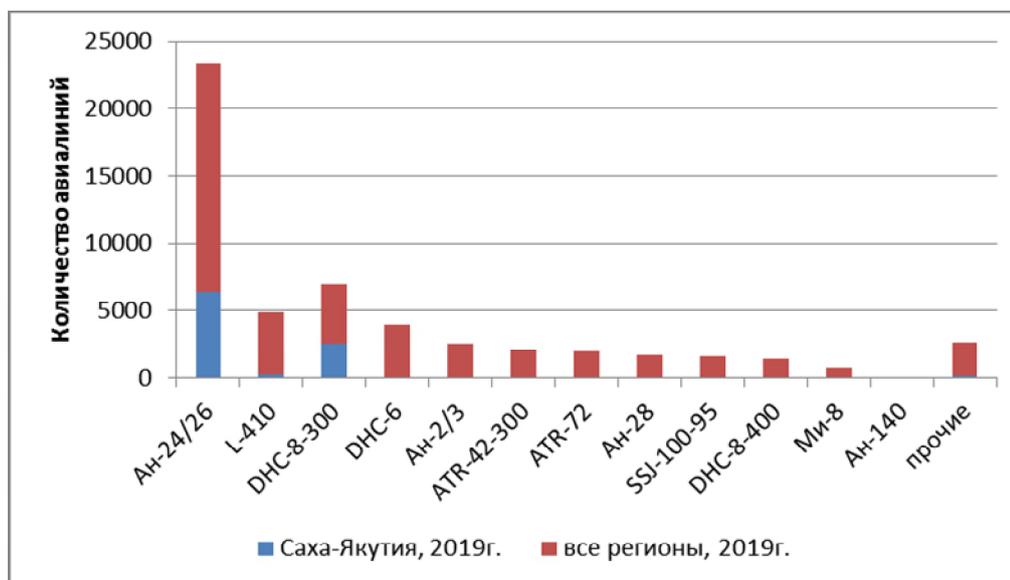


Рисунок 4 – Распределение рейсов МВЛ по типам применяемых ВС (2019 г.)

Это связано с тем, что, применительно к условиям МВЛ в регионах России, самолёты Ан-24/26 являются наиболее эффективными ВС при необходимости эксплуатации с грунтовых ВПП [24] и с учётом загрузки попутными грузами. К тому же, в силу значительного возраста этих ВС (производство самолёта завершилось в 1979 г.), можно утверждать, что амортизация их первоначальной стоимости давно произведена. Как результат, даже с учётом повышенных затрат на поддержание лётной годности и при неполной заполняемости салона, авиакомпаниям выгоднее осуществлять перевозки с применением данных ВС,

насколько позволяет продление их ресурса [25] вместо перехода на эксплуатацию новой авиационной техники.

Обращает внимание, что, начиная с 2019 г., заметно (до ~10%) выросла доля самолёта DHC-8-300 (также обозначаемого Dash 8 Q300). Рост доли данного типа ВС обусловлен именно постепенным списанием самолётов Ан-24/26 с учётом возможности применения Dash 8 в сложных природно-климатических условиях труднодоступных территорий.

Другим типом ВС по доле рейсов (~10%) является самолёт L-410, однако, в силу особенностей Республики Саха-Якутия, применение данного ВС в этом регионе мало.

Фактический парк ВС авиакомпаний «Якутия» и «Полярные авиалинии», выполнявших местные воздушные перевозки в Республике Саха (Якутия), на примере 2021 г. (открытые данные «Росавиации»), представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Парк ВС авиакомпаний «Якутия» и «Полярные авиалинии», 2021 год

Тип ВС	Класс ВС	Количество, экз.	Доля, %
Boeing 737-800	2	4	5,8
Dash 8	3	4	5,8
Ан-24/26	3	15	21,7
Як-40	3	4	5,8
L-410	4	3	4,3
Ан-2/3	4	12	17,4
РС-6	4	1	1,4
ДА-40	4	2	2,9
Ми-8	1 (вертолёт)	24	34,8
ВСЕГО:		69	100

Наблюдаемая неоднородность парка ВС в части пассажироместимости ВС связана с неоднородностью пассажиропотоков МВЛ: по факту распределение населения неоднородно и отличается от осреднения по формуле (1). В этом случае авиакомпании, благодаря наличию в современных условиях на рынке значительного количества типов и модификаций ВС, могут прибегать к дифференцированному подходу при выборе оптимального ВС в зависимости от параметров авиалинии, что дает им возможность минимизировать расходы.

Агрегированный анализ применения ВС по классам ВС показывает, что если в масштабах страны на долю ВС 3-го класса приходится ~2/3 количества рейсов, а ВС 4-го класса (условно далее «малая авиация») стабильно выполняют ~30% рейсов, то для Республики Саха-Якутия ВС 3-го класса выполняют более 90% регулярных рейсов МВЛ (рисунок 5).

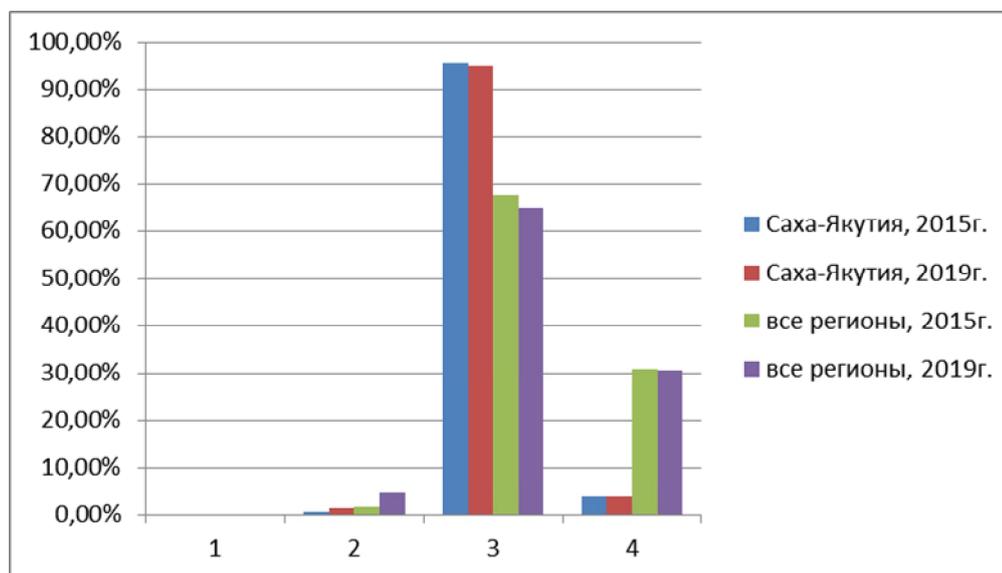


Рисунок 5 – Распределение рейсов МВЛ по классам ВС, без учёта вертолётов

Погрешность полученного результата может быть связана с неполнотой данных, поскольку самолёты малой авиации выполняют нерегулярные воздушные перевозки в окрестностях труднодоступных аэропортов МВЛ. Оценка объёмов пассажирских перевозок данного типа, выполняемых самолётами малой авиации, составляет 5-10% от общего объёма местных воздушных пассажирских перевозок в Республике Саха-Якутия, что позволяет говорить об адекватности выводов анализа. Широкое применение ВС 3-го класса в т.ч. отражает закономерность: консолидация множества небольших пассажиропотоков в несколько укрупнённых на ограниченном количестве авиалиний даёт возможность сократить затраты на перевозку пассажиров. И это при том, что «крупные» ВС могут эксплуатироваться на дальностях полёта, существенно отличающихся от расчётных (рисунки 6-8, на примере 2019 г.):

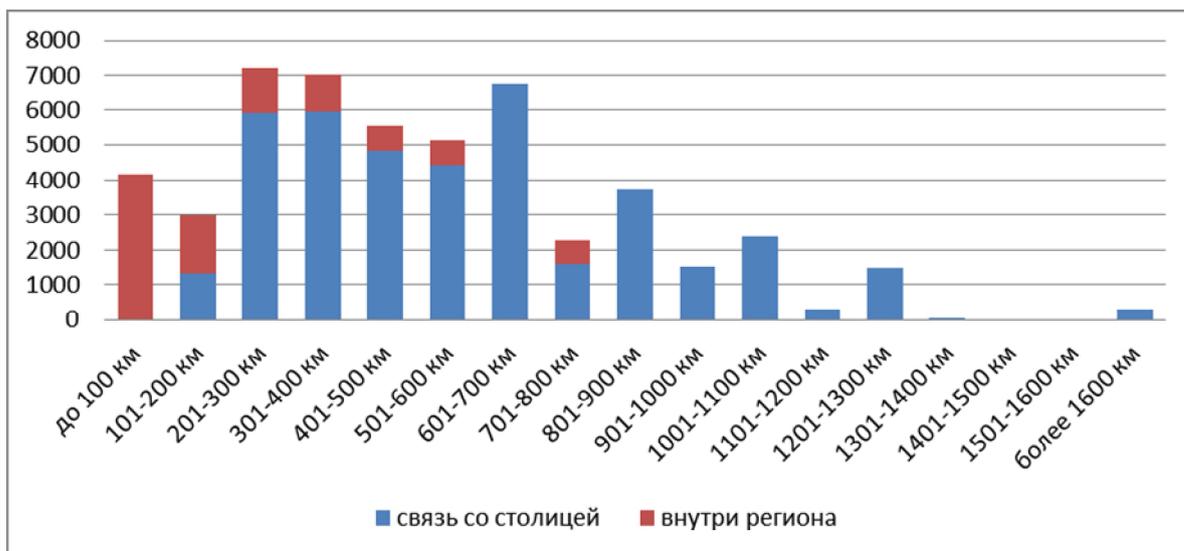


Рисунок 6 – Распределение количества рейсов МВЛ в масштабах страны по диапазонам дальности полёта, 2019 г.

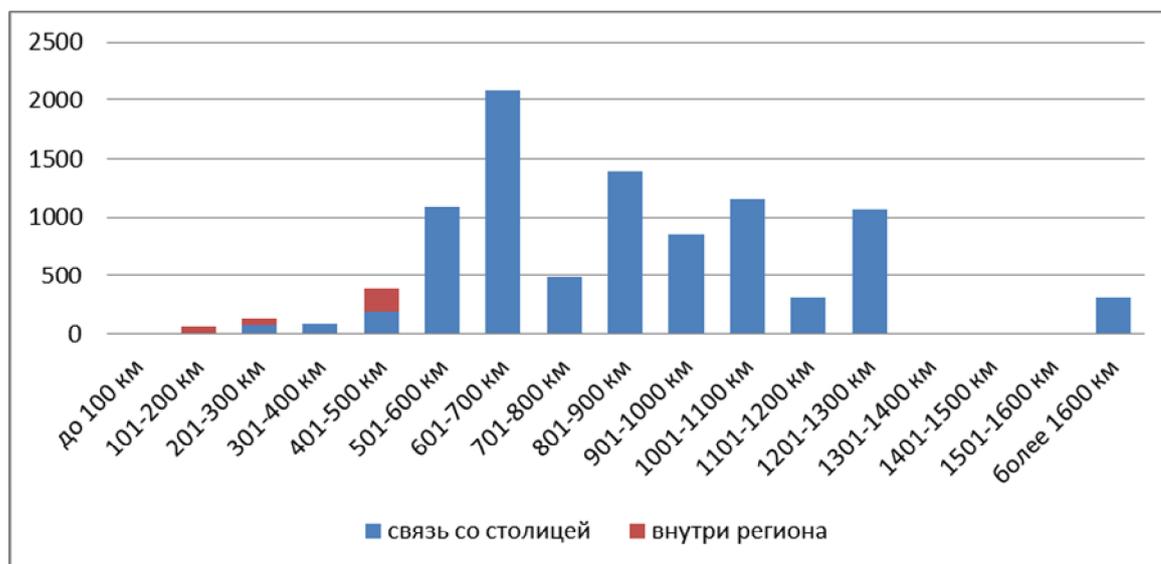


Рисунок 7– Распределение количества рейсов МВЛ в Республике Саха-Якутия по диапазонам дальности полёта, 2019 г.

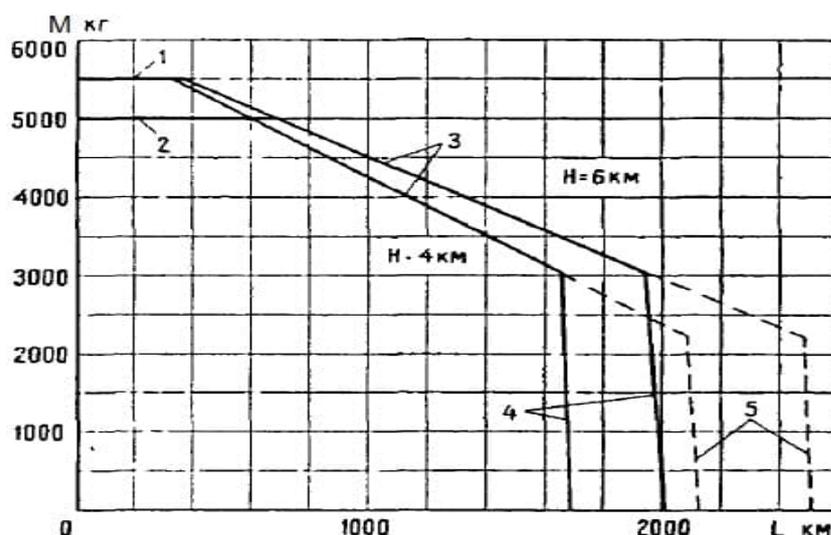


Рисунок 8 – Зависимость коммерческой нагрузки от дальности полёта Ан-24 на режиме максимальной крейсерской мощности (взлётный вес 21000 кг, максимальный запас топлива 3950 кг или 4800 кг, остаток топлива на посадке 580 кг): 1 – полёт с максимальной коммерческой нагрузкой 5500 кг (экспортный вариант); 2 – полёт с максимальной коммерческой нагрузкой 5000 кг, 3 – полёт с максимальным взлётным весом; 4 – полёт с максимальным запасом топлива 3950 кг; 5 – полёт с максимальным запасом топлива 4800 кг; М – коммерческая нагрузка; L – дальность полёта; Н – высота полёта [11]

Расчётной дальностью обычно называется максимальная дальность полёта самолёта с максимальной коммерческой нагрузкой [23, 47]. Для самолётов Ан-24, применяемых в России, проектная дальность соответствует ограничению прямой 2 рисунка 8 справа, т.е. составляет ~600-700 км. Сопоставление этой дальности с диаграммой рисунка 6 показывает, что диапазон примерно соответствует средней дальности МВЛ в масштабах страны. Это обусловлено тем, что на территориях, отдалённых от административного центра региона более чем на 700 км, несмотря на высокую востребованность авиаперевозок [78], численность проживающего населения мала и, как следствие, невелико количество выполняемых рейсов МВЛ.

В то же время (рисунок 7) средняя дальность МВЛ в Республике Саха-Якутия существенно больше 700 км. Это означает, что на этих авиалиниях авиакомпании с целью минимизации расходов прибегают к

дифференцированному подходу при выборе применяемого ВС, но в существующих условиях этот выбор не всегда оптимален, т.к. самолёты эксплуатируются с неполной коммерческой загрузкой.

Также диаграммы рисунков 6-7 отражают структуру спроса на местные перевозки. Первоочередная задача, выполняемая МВЛ, – это обеспечение транспортной связи со столицей региона [78]: для ~90% рейсов (синий цвет, условно «связь со столицей») один из аэропортов является аэропортом, расположенным в столице региона, а другой – аэропортом МВЛ на труднодоступных территориях. При этом указанный аэропорт МВЛ является хабом (промежуточным пунктом) для обслуживания пассажиров в окрестности этого аэропорта, что соответствует большинству меж- и внутрирайонных авиалиний (красный цвет, условно «внутри региона»).

Данная особенность МВЛ раскрывается при отдельном рассмотрении применения самолётов и вертолётов (рисунок 9²): за редким исключением, практически весь пассажиропоток между столичными аэропортами и отдалёнными аэропортами МВЛ перевозился с применением самолётов прямыми рейсами или с одной промежуточной посадкой, в то время как вертолёты применялись для локальных перевозок пассажиров в ближайшей окрестности отдалённых аэропортов-хабов.

2 Приводится анализ статистики пассажирских перевозок только за 2015 г. ввиду неполноты сведений о пассажирских перевозках вертолётными за 2019 г.

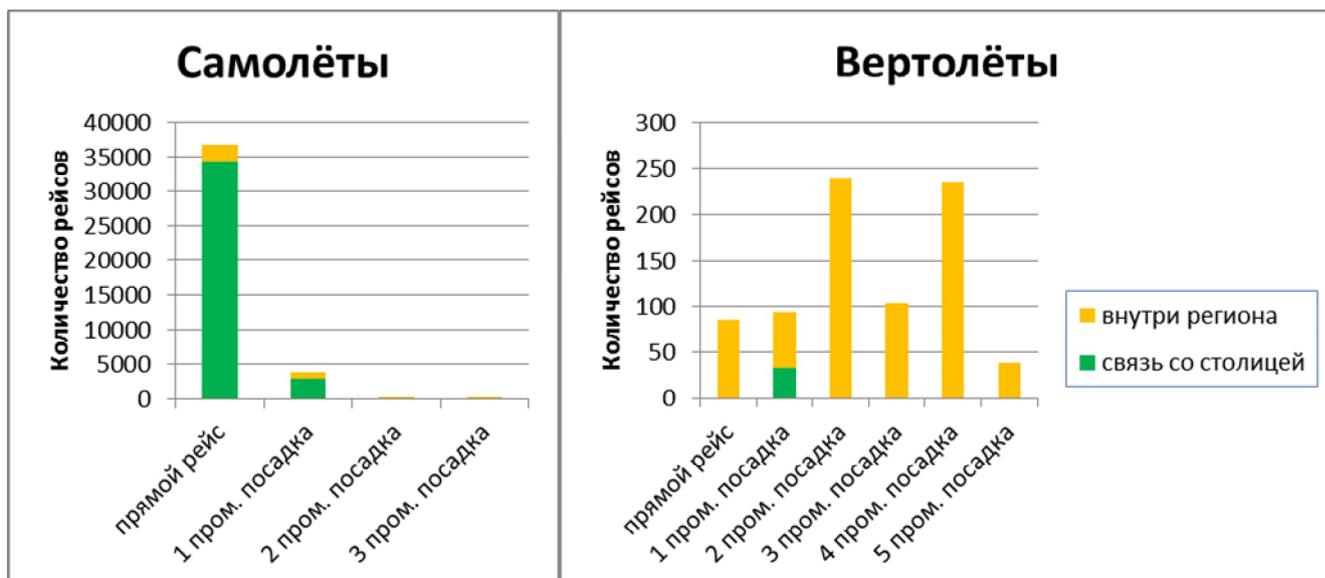


Рисунок 9 – Распределение рейсов МВЛ в масштабах страны по наличию/отсутствию связи со столичным аэропортом с учётом количества промежуточных посадок, по типам применявшихся ВС, 2015 г.

Такое распределение ВС по авиалиниям обусловлено особенностями ТЭХ самолётов и вертолётов и возможностью при хабовой структуре маршрутной сети МВЛ дополнительно снизить суммарные затраты на перевозки [51].

Также выбор парка ВС МВЛ зависит от регулярности выполнения рейсов (рисунок 10, на примере 2019 г.):

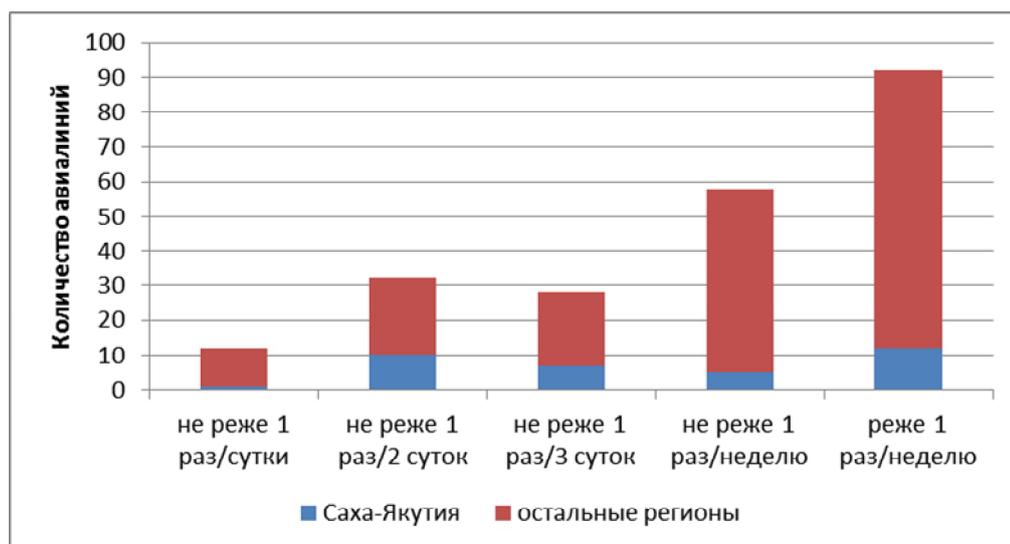


Рисунок 10 – Распределение МВЛ в зависимости от регулярности рейсов, 2019 г.

При общем количестве 222 авиалинии, только для 12 из них (5%) рейсы выполнялись как минимум ежедневно. Впрочем, часть таких рейсов могла попасть во второй столбец: будучи ежедневными, в некоторых случаях рейсы могли быть отменены по причине погодных условий или неисправности ВС, но даже с учётом данного факта доля ежедневных рейсов не превысила бы 20%. Основная же доля рейсов МВЛ (~80%) выполнялась с регулярностью не чаще, чем раз в трое суток. Для Республики Саха-Якутия состояние МВЛ схоже с ситуацией по стране в целом, хотя в последнем случае значение показателя составляет ~70%.

Другими словами, даже с учётом консолидации пассажиропотоков в хабовой транспортной системе, количество пассажиров на рейс МВЛ невелико, и в ряде случаев для их перевозки достаточно применения ВС пассажироместимостью не более 19 человек. С учётом бюджетных ограничений, это вынуждает авиакомпании сокращать частоту рейсов, что можно трактовать как существенное снижение транспортной доступности труднодоступных территорий.

Ещё одним возможным способом снижения затрат, помимо хабов, является выполнение рейсов с промежуточными посадками, по мере выполнения которых происходит постепенное заполнение салона (рисунок 11, на примере 2019 г.):

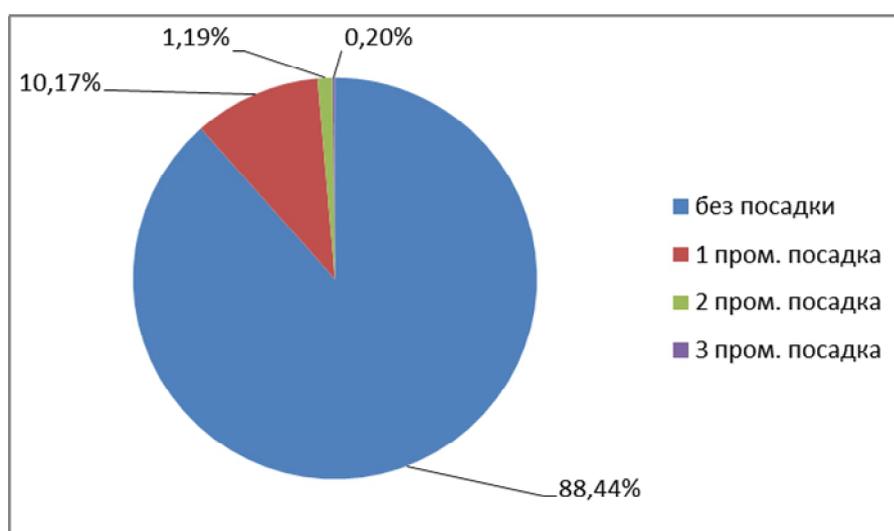


Рисунок 11 – Распределение МВЛ в масштабах страны по количеству промежуточных посадок, 2019 г.

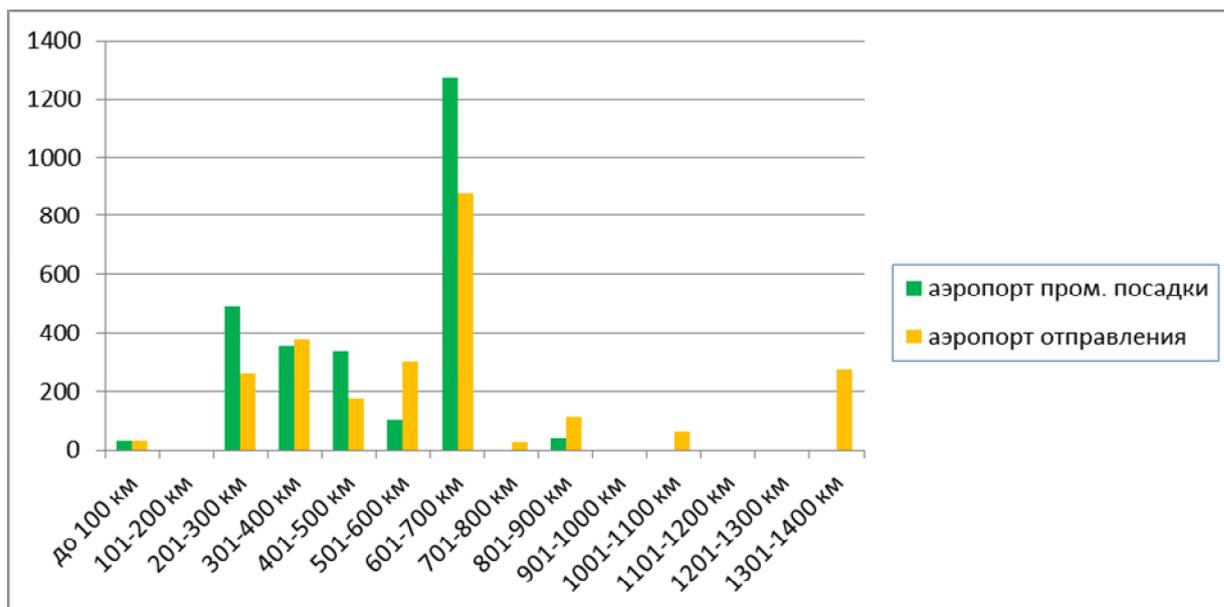


Рисунок 12 – Распределение количества рейсов МВЛ в масштабах страны в зависимости от ортодромической отдалённости аэропортов, если рейс выполнялся с одной промежуточной посадкой

Около 12% рейсов МВЛ (рисунок 11) выполнялись как минимум с одной промежуточной посадкой. Поскольку рейс с промежуточными посадками условно может считаться заменой нескольким беспосадочным рейсам в столичный аэропорт региона, выполнение подобного рейса МВЛ при малых пассажиропотоках также является эффективным способом снижения затрат. При выполнении рейса с промежуточными посадками происходит постепенное заполнение салона, а экономия затрат по порядку величин сопоставима с затратами на несуществующие беспосадочные рейсы. В то же время, авиаперевозки с промежуточными посадками следует считать снижением качества предоставляемых транспортных услуг, т.к. большинством пассажиров востребованы именно беспосадочные рейсы.

Особенностью выполнения рейсов МВЛ с промежуточной посадкой является выбор аэродрома промежуточной посадки (рисунок 12): если средняя отдалённость аэропорта промежуточной посадки от аэропорта в столице региона составляет 400-500 км, то средняя отдалённость аэропорта отправления/прибытия, не имеющего прямой связи со столицей, – 600-650 км. Другими словами, при выполнении рейса МВЛ с однозвенным маршрутом на дальность 400-500 км, с

целью увеличения заполняемости салона экономически выгодно добавить к рейсу второе звено маршрута, чтобы дополнительно забрать небольшое количество пассажиров из аэропорта, отдалённого на 600-650 км, что качественно обуславливается закономерностью рисунка 1.

В то же время, обособленный анализ МВЛ Республики Саха-Якутия показал, что, например, в 2015-19 гг. в регионе количество рейсов с промежуточными посадками не превышало 1% от общего количества рейсов МВЛ. Это связано, в том числе, с особенностями спроса на авиаперевозки и особенностями распределения населения по территории региона: ввиду безальтернативности воздушного транспорта при больших (в среднем по стране) дальностях МВЛ (рисунок 7), рейсы выполняются с полезной нагрузкой, заметно превышающей 50% от максимальной полезной нагрузки ВС. Это делает нецелесообразной посадку в некотором промежуточном аэропорте МВЛ с целью догрузки, поскольку для перевозки всех пассажиров из этого промежуточного аэропорта в любом случае потребуется ещё один рейс. Тем не менее, при моделировании АТС и расчёте потребного парка ВС возможность промежуточной посадки должна быть учтена.

Также при анализе МВЛ следует отметить следующую существенную особенность, косвенно вытекающую из предназначения местных перевозок, а именно, порядок выполнения рейсов. Распределение рейсов по дням недели и по времени отправления выглядит следующим образом (рисунки 13-15):

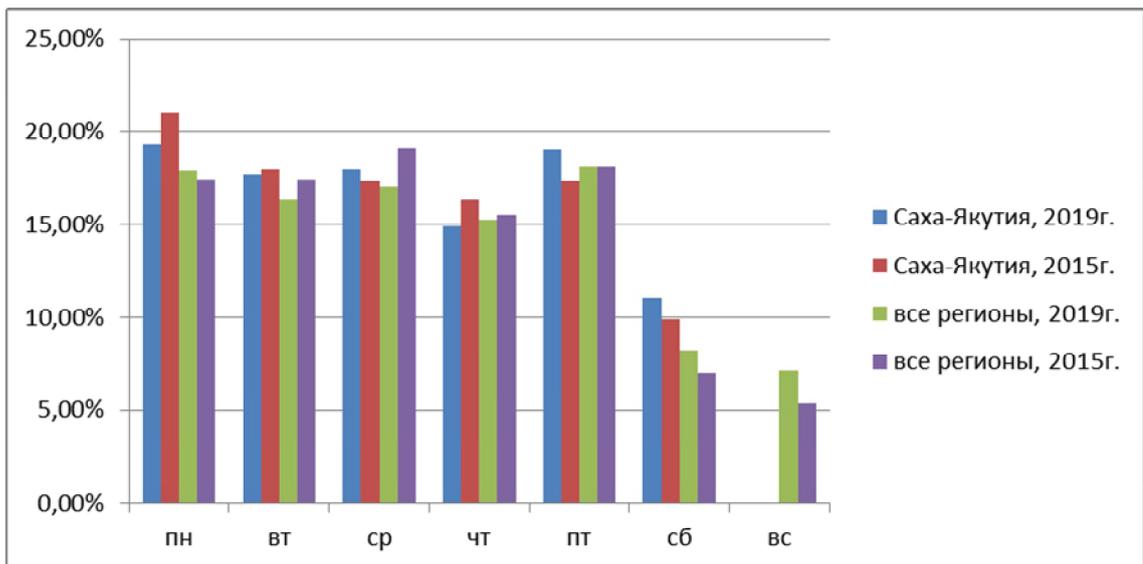


Рисунок 13 – Распределение рейсов МВЛ по дням недели

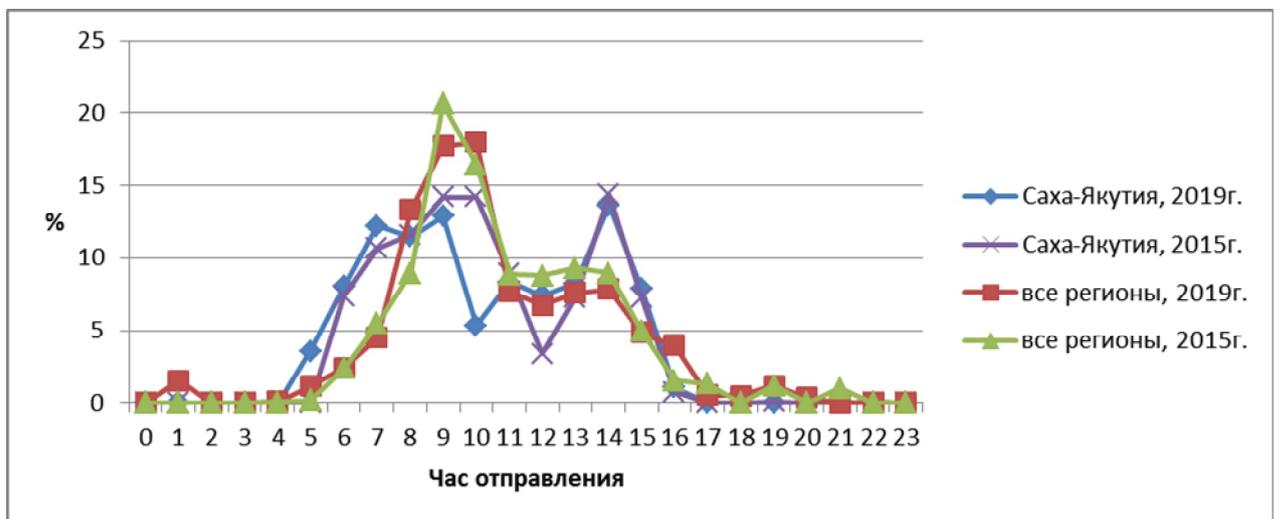


Рисунок 14 – Распределение долей рейсов МВЛ по времени отправления рейса (диапазоны – целые часы времени отправления)

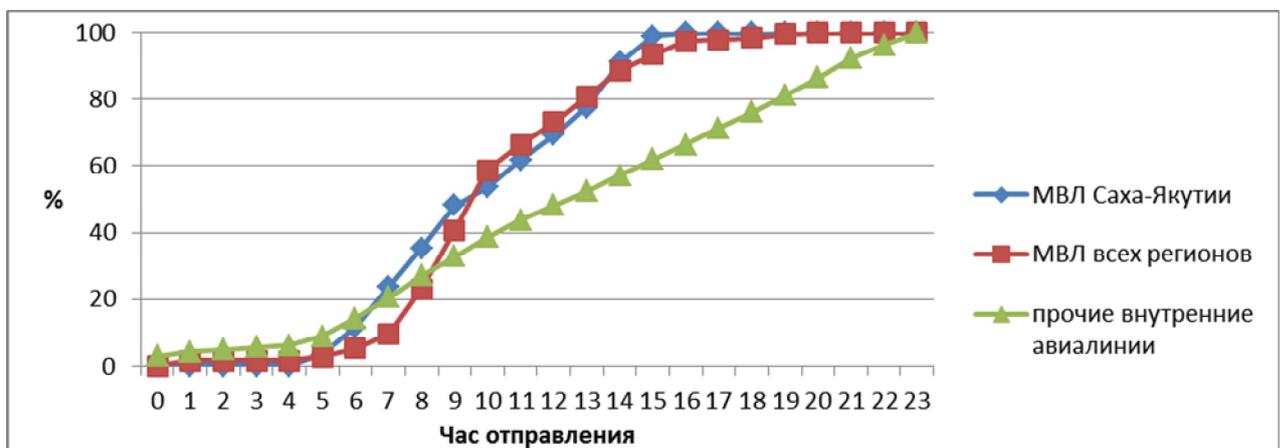


Рисунок 15 – Распределение рейсов по времени отправления, нарастающим итогом (диапазоны – целые часы времени отправления, 2019 г.)

Как можно видеть, МВЛ имеют некоторые характерные особенности: например, рейсы выполняются преимущественно по рабочим дням (рисунок 13). Время отправления рейсов МВЛ приходится преимущественно на светлое время суток (утренние и дневные часы), в то время как времена отправления рейсов прочих внутренних авиалиний, за исключением небольшого ночного периода, равномерно распределяются по всем часам суток (рисунки 14-15).

Данная особенность МВЛ объясняется тем, что при организации местных перевозок в первую очередь ориентируются на наиболее насущные потребности граждан в части совершения местных поездок: получение услуг государственных учреждений, медицинских центров, образовательных учреждений, выполнение служебных поручений по работе (командировки), бизнес-деятельность и т.д. [77]. Эти разновидности потребностей напрямую связаны с необходимостью совершать поездки в рабочие часы рабочих дней недели. И именно такой распорядок выполнения рейсов МВЛ позволяет в наибольшей степени удовлетворить спрос при ограниченности бюджета на организацию МВЛ и требования обеспечения безопасности полётов (прохождение медкомиссии лётным персоналом, централизованная охрана/стоянка и техобслуживание ВС в крупных столичных аэропортах в промежутках между рейсами).

Прочие потребности пассажиров (посещение родных, доступ к магистральной транспортной сети) подобная организация МВЛ также удовлетворяет, хотя и с меньшим удобством: планировать и совершать поездку приходится заранее, например, с временным запасом для пересадки на магистральный транспорт.

Выводы по главе 1.

По итогам проведённого анализа следует констатировать наличие проблем (низкая частота рейсов, совершение поездок с промежуточными пересадками и пр.) с транспортной доступностью в регионах Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, где авиация зачастую является единственным средством совершения местных поездок. Решение указанных проблем становится особенно

важным для нашей страны, если в качестве примера рассмотреть программу развития европейского транспорта «Flightpath 2050» [95], где ставится задача обеспечить к 2050 г. для 90 % населения возможность совершать поездку в пределах Европы «от двери до двери» за 4 часа в любое время суток. Безусловно, в российских реалиях подобные требования к местным воздушным перевозкам, с учётом площадей регионов, плотности и доходов населения, ограниченности государственного бюджета, могут оказаться невыполнимыми. Но данное обстоятельство дополнительно актуализирует необходимость разработки комплекса моделей и методов, позволяющих давать оценку мерам, направленным на повышение транспортной доступности труднодоступных территорий регионов, в т.ч. в части выбора наиболее эффективных ВС МВЛ.

ГЛАВА 2 МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ВЫБОРА ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ СТРАНЫ

2.1 Существующие методы расчёта парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны

Исследование АТС в части расчёта оптимального потребного парка ВС как одного из её элементов относится к задачам большой размерности [75]. Сложность решения подобных задач определяется не только их огромной размерностью вследствие многообразия учитываемых условий эксплуатации ВС, но также нелинейными взаимосвязями параметров, как, например, зависимостью себестоимости авиаперевозок от дальности полёта ВС [43, 48], и динамическим характером развития систем [39, 91].

В общем случае, это не позволяет использовать известные методы нахождения точного решения. Для получения же практических результатов, при поиске решения задач большой размерности широко применяется метод декомпозиции исходной глобальной задачи на взаимосвязанные подзадачи меньшей размерности, сформулированные, как правило, в терминах линейного и целочисленного математического программирования [36, 63]. Получаемое при этом решение носит рациональный характер, не гарантирующий достижение оптимума или хотя бы попадание в его окрестность.

В качестве примера может быть приведён подход, выработанный в ГосНИИ ГА к 80-м гг. [75, 79], на первом этапе включающий последовательно решаемые подзадачи в статической АТС (без учёта времени):

- маршрутизация пассажирских потоков;
- формирование авиалиний с посадками;
- оптимальная расстановка парка на авиалиниях без промежуточных посадок.

Динамика развития парка ВС, как дальнейший этап решения задачи, может рассматриваться как цепочка последовательно решаемых задач при статических АТС с учётом изменения по времени внешних факторов [82] в течение выбранного периода планирования или как задача динамического программирования [79]. При этом отдельно рассматриваются такие подзадачи, как прогноз развития сети аэропортов и формирование сети авиационно-технических баз по местам базирования ВС [65]. Возможно также дополнительное разбиение на ещё более «низкоуровневые» подзадачи, решение которых, тем не менее, может влиять на выбор парка ВС [36]:

- расстановка парка ВС по рейсам;
 - составление цепочек рейсов;
 - составление расписания для экипажей ВС;
- и т.д.

В то же время, рост возможностей вычислительной техники, начиная с 80-х гг. XX века, обусловил дальнейшее развитие методологии оптимизации элементов АТС и позволил увеличить размерность решаемых подзадач, как за счёт увеличения количества варьируемых параметров в рамках одной подзадачи без изменения их качественного состава, так и за счёт объединения подзадач в одну укрупнённую (т.н. интеграция задач планирования) [37]. Наибольшее внимание уделялось объединению задач расстановки парка ВС по рейсам, составления цепочек рейсов и связей для экипажей, хотя и в этом случае затраты времени на вычисления – существенны (не менее нескольких часов).

К настоящему времени известны подходы к расчёту парка ВС как в упрощённой постановке (целочисленные задачи математического программирования с ограничениями на количество аэропортов и авиалиний, решаемые методом ветвей и границ [60, 63]), так и сложные неклассические задачи вариационного исчисления, требующие привлечения специального математического аппарата [59].

При этом для пассажирских авиаперевозок в качестве критерия оптимизации в первую очередь выбираются затраты на их выполнение,

абсолютные или удельные. В последнем случае выбираемый критерий соответствует обобщающему показателю эффективности \mathcal{E} [38]:

$$\mathcal{E} = \frac{P}{Z}, \quad (2)$$

где P – конечный результат деятельности, Z – затраты, обусловившие результат P . Разновидностью показателя \mathcal{E} является обратная величина как цена C результата деятельности (для случая пассажирских авиаперевозок – например, стоимость перевозки одного пассажира или пассажиро-километра):

$$C = \frac{Z}{P}, \quad (3)$$

Все вышесказанное в полной мере может быть отнесено и к проблеме выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий регионов страны. Хотя, с начала активного освоения данных регионов (60-е гг. XX века), с учётом их географических и природно-климатических особенностей, исследователями отмечалось необходимость поиска комплексного решения о перспективных направлениях развития авиационных перевозок [86], декомпозиция глобальной задачи традиционно рассматривалась как возможность получения практического решения в части расчёта парка ВС МВЛ [28]. В качестве критерия оптимизации при этом выбирался минимум расходов на перевозки при условии обеспечения необходимого уровня эффективности использования ВС (объёмов перевозок).

В качестве дальнейших направлений развития методологии расчёта парка ВС МВЛ (80-е гг.) указывались:

- разработка комплексных критериев, учитывающих не только экономические, но и социальные интересы граждан и потребности народного хозяйства в целом [69];
- формирование сети авиалиний и парка ВС МВЛ с учётом развития других видов транспорта в регионах [70];
- увеличение размерности решаемой задачи [39], и др.

Применительно к МВЛ, к настоящему времени известны такие исследования, как:

- определение сети МВЛ и последующий расчёт парка ВС с учётом сезонности в рамках задачи целочисленного программирования по критерию суммарных затрат на выполнение рейсов [76];

- выбор оптимального ВС для фиксированной сети МВЛ с учётом затрат на аэропортовую инфраструктуру по критерию суммарных затрат на перевозки (стоимость выполнения рейсов и содержания инфраструктуры) при обособленном рассмотрении каждой авиалинии [21];

- расчёт потребного парка в рамках ситуационного моделирования на основе структуризации спроса и регрессионных тенденций развития существующего парка ВС [83];

- а также ряд других работ, сопоставимых по уровню сложности / принципам декомпозиции исходной задачи.

В отличие от перечисленных выше работ, в настоящей работе рассматривается методика выбора парка ВС в рамках единой задачи целочисленного программирования по обобщённому критерию обеспечения транспортной доступности, сформулированной с учётом наземного транспорта, сезонности и суммарных затрат на перевозки, и предлагается метод решения подобной задачи большой размерности применительно к условиям МВЛ.

2.2 Задача выбора парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны

Методика выбора парка ВС строится на методологии системного анализа, который предполагает следующие шаги: построение модели исследуемого объекта, постановку задачи исследования, решение поставленной математической задачи [22].

В качестве моделируемой системы, в рамках которой планируется применение ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных

территорий, рассматривается внутрирегиональная транспортная система местных перевозок.

Данная система обладает необходимыми признаками, позволяющими говорить о ней именно как о «системе» и применять соответствующий математический аппарат [22]:

1) система структурирована и обладает новыми свойствами по сравнению со свойствами взаимосвязанных элементов, из которых она состоит;

2) организация всей системы подчинена определённой цели, назначению системы;

3) система обладает свойством оптимальности.

Выполнение этих условий достигается тем, что:

1) внутрирегиональная транспортная система местных перевозок состоит из двух основных групп элементов: парка транспортных средств (включая искомый парк ВС) и обеспечивающей их функционирование инфраструктуры;

2) местные перевозки (включая МВЛ) предназначены для оказания транспортных услуг населению труднодоступных территорий рассматриваемого региона в соответствии со спросом (целями) на местные поездки;

3) оптимальность построения внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок обусловлена, как указывалось выше, необходимостью субсидирования государством местных перевозок, что априори предполагает наличие соответствующих управленческих решений на государственном уровне.

Внешней средой, с которой внутрирегиональная транспортная система местных перевозок взаимодействует как сложная система, является население регионов в местах своего компактного проживания: население не рассматривается как часть сложной системы, т.к. проживание людей сложилось исторически и не является предметом регулирования при организации местных перевозок.

Структура внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок как сложной системы может быть задана как иерархия уровней моделирования (рисунок 16):

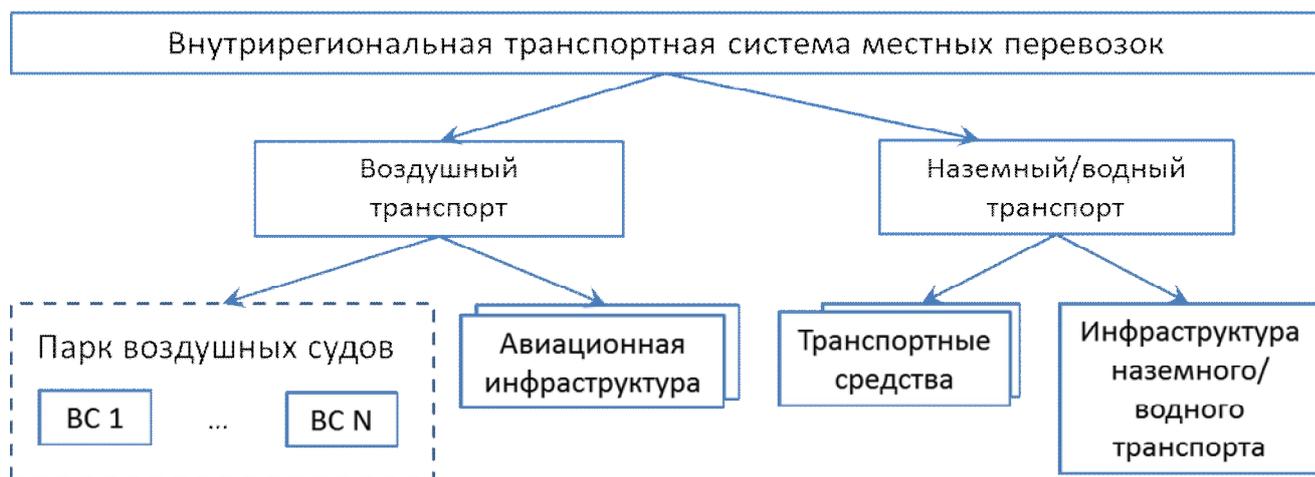


Рисунок 16 – Иерархия внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок

Система образована из двух частей: воздушного и наземного/водного транспорта, каждый из которых включает парк транспортных средств и соответствующую инфраструктуру. Авиационная составляющая моделируется состоящей из парка ВС и аэропортов/посадочных площадок, прочие объекты авиационной инфраструктуры в настоящей работе не рассматриваются.

При формировании математической модели внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок учитывается, что количество пассажиров, совершающих местные поездки из мест своего проживания в столицу региона («прямой» пассажиропоток), совпадает с количеством пассажиров, перемещающихся в обратном направлении («обратный» пассажиропоток). Если бы это было не так, то наблюдалась бы миграция населения в ту или иную сторону. В силу равенства «прямого» и «обратного» пассажиропотоков, не имеет значения, что считать пунктами отправления и назначения при разработке математической модели – столичный аэропорт или аэропорты в населённых пунктах на труднодоступных территориях. В целях удобства было выбрано, что поездки совершаются из населённых пунктов в столицу.

Математическое описание внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок задано как сбалансированная транспортная модель с

промежуточными пунктами [33, 88], традиционно используемая в математическом программировании (рисунок 17):

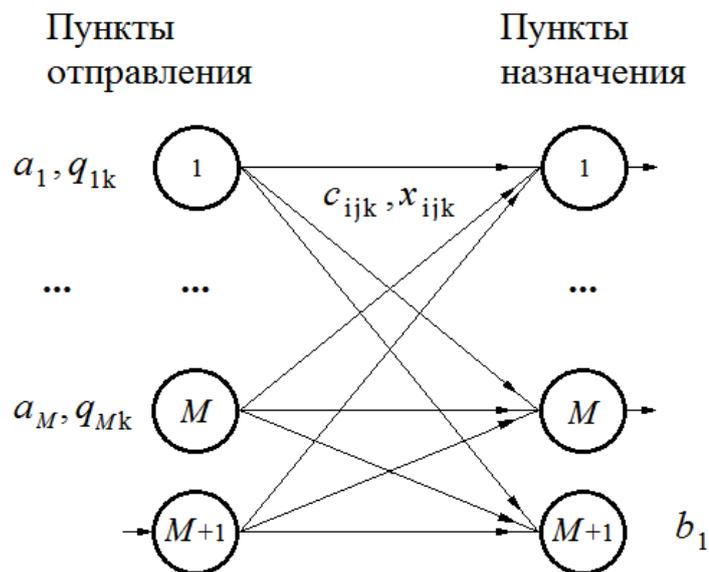


Рисунок 17 – Сбалансированная транспортная модель с промежуточными пунктами внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок

Модель означает следующее: в рассматриваемом регионе имеется M пунктов отправления, $1 \leq i \leq (M+1)$, каждому из которых соответствует a_i отправляемых пассажиров. Пунктом назначения служит столица региона – $(M+1)$ -ый пункт, в него прибывает суммарный поток пассажиров:

$$b_1 = \sum_{i=1}^M a_i . \quad (4)$$

k – соответствует индексу применяемого для перевозки типа транспортного средства в общем парке транспортных средств ($1 \leq k \leq N$). Для заданных объёмов перевозок выполняется:

$$\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^{M+1} x_{ijk} = a_i , \quad i = 1, \dots, M ; \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M x_{ijk} = \sum_{i=1}^M a_i = b_1 , \quad j = M + 1 , \quad (6)$$

где x_{ijk} – количество пассажиров, перевозимых из пункта i в пункт j посредством k -го типа транспортного средства, $1 \leq k \leq N$.

В целях упрощения записи задачи, под пунктами отправления и прибытия подразумеваются и непосредственно населённые пункты, и аэропорты (как пункты с нулевым количеством пассажиров). При этом c_{ijk} – стоимость перевозки x_{ijk} пассажиров между i -ым и j -ым пунктами, но также в задаче учитываются q_{ik} – управляющие переменные, которые задают суммарные затраты на авиационную инфраструктуру (а следовательно, и наличие таковой) в i -ом пункте в зависимости от типа k -го транспортного средства:

$$q_{ik} = \begin{cases} 0, & \{x_{ijk} = 0, \forall j\}, \{x_{ijk} > 0, \forall j, k \notin S^{BC}\} \\ c_{ik}^{ПП-верт}, & x_{ijk} > 0, \forall j, k \in S^{верт} \\ c_{ik}^{АЭРО}, & x_{ijk} > 0, \forall j, k \in S^{сам} \end{cases}, \quad (7)$$

где $c_{ik}^{ПП-верт}$ – затраты на содержание вертолётной площадки;

$c_{ik}^{АЭРО}$ – затраты на содержание аэропорта МВЛ;

$S_{верт}$, $S_{сам}$, S_{BC} – подмножества индекса, соответствующие вертолётам, самолётам и всем ВС, соответственно.

В работе не рассматривается задействование посадочных площадок (ВПП), предназначенных для приема-выпуска самолётов, по следующим причинам:

- рассматривается перспективная АТС, в которой комфорт пассажиров и безопасность круглогодичных полётов может быть обеспечена только с помощью аэропортов МВЛ;

- в настоящее время отсутствуют необходимые нормативные документы, регламентирующие работу посадочных площадок для самолётов, а новые требования к аэропортовой инфраструктуре будут пересматриваться [71].

Условие (7) означает: если перевозка пассажиров из любого i -го пункта в любой j -ый производится воздушным транспортом – в этом i -ом пункте отправления должна быть или вертолётная посадочная площадка, или аэропорт МВЛ, пригодный для полётов и самолётов, и вертолётов. Для прочих видов транспорта потребная инфраструктура не рассматривается, за исключением дорог

или путей, наличие или отсутствие которых учитывается в соответствующих стоимостях c_{ijk} для наземных/водных транспортных связей.

В частных случаях линейного или целочисленного программирования c_{ijk} может быть задана как линейная зависимость от единичного тарифа на перевозку одного пассажира. Однако в настоящей работе данная стоимость рассматривается в общем виде, с учётом условий региона, в котором эксплуатируется k -ое транспортное средство. Это, как уже отмечалось выше [48], напрямую связано с предметной областью настоящей работы: стоимость перевозки воздушным судном одного пассажира-километра нелинейно зависит от заполняемости салона, что особенно существенно для ВС небольшой пассажироплощности. Стоимость c_{ijk} перевозки пассажиропотока x_{ijk} может быть записана как произведение количества рейсов и затрат на выполнение одного рейса:

$$c_{ijk} = \left(\left[\frac{x_{ijk}}{z_k(L_{ij})} \right] + 1 \right) c_k^{OP}(i, j, w_{ijk}, q_{ik}, q_{jk}), \quad \forall i, \forall j, \forall k \in S^{BC}, \quad (8)$$

где здесь и далее $[]$ – целая часть числа;

L_{ij} – расстояние (ортодромическое) между i -ым и j -ым пунктами;

$z_k(L)$ – пассажироплощность ВС k -го типа как функция от расстояния L , на которое совершается перелёт (рисунок 8);

$c_k^{OP}(i, j, w_{ijk}, q_{ik}, q_{jk})$ – стоимость типовой операции МВЛ, т.е. стоимость разовой перевозки пассажиров в количестве w_{ijk} человек посредством ВС k -го типа из i -го пункта в j -й при наличии в них соответствующей авиационной инфраструктуры (переменные q_{ik}, q_{jk}). Здесь количество пассажиров на рейс есть

$$w_{ijk} = \left[\frac{x_{ijk}}{\left[\frac{x_{ijk}}{z_k(L_{ij})} \right] + 1} \right]. \quad (9)$$

В силу тематики настоящей работы, стоимость перевозки прочими видами транспорта ($\forall k \notin S^{BC}$) моделируется линейными соотношениями между стоимостью поездки, дальностью и количеством пассажиров.

Возможность перевозки через промежуточные пункты означает возможность перемещения пассажиров между любой парой пунктов – из i -го пункта отправления в j -ый пункт прибытия, $1 \leq j \leq (M+1)$. Чтобы это учесть формально, в процессе решения задачи вводится искусственный буфер [88], который есть суммарное количество перевозимых пассажиров b_I .

Тогда для рассматриваемого региона формулируется следующая задача оптимизации эффективности местных перевозок с целью выбора парка ВС для обеспечения доступности труднодоступных территорий:

$$\begin{cases} X_0 = \arg \max_X E(X) \\ F(X) = A \\ G(X) \leq D \end{cases}, \quad (10)$$

где X – вектор варьируемых параметров внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок;

$E(X)$ – эффективность обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий внутрирегиональной транспортной системой местных перевозок;

$F(X)$ – функция требуемых объёмов перевозок A (вектор, состоящий из переменных a_i – количеств перевозимых пассажиров);

$G(X)$ – функция ограничений D , накладываемых на транспортную систему.

Здесь вектор X включает в себя:

- целочисленные количества пассажиров x_{ijk} ;

- управляющие переменные q_{ik} .

Отличительной особенностью формулируемой в настоящей работе задачи является то, что, в силу многокритериальности транспортной доступности, в качестве оптимизируемой целевой функции вводится единый критерий эффективности обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий E . Критерий вводится как отношение уровня обеспечения транспортной доступности W (функция от объёмов пассажирских перевозок, не выполненных с учётом ограничений) к ресурсам R , затраченным на осуществление этих перевозок:

$$E = \frac{W}{R} . \quad (11)$$

Данный шаг есть возможный вариант свертки противоречивых по Парето показателей транспортной доступности в рамках единого критерия оптимизации.

Как отмечалось выше, ключевым признаком, позволяющим говорить о существовании внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок, является государственное субсидирование (в масштабах региона), рассчитываемое за период моделирования. Тогда, с учётом введённых X и c_{ijk} , в качестве затраченных ресурсов могут рассматриваться суммарные затраты C на организацию местных перевозок:

$$R \equiv C = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{M+1} c_{ijk} + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M q_{ik} . \quad (12)$$

В выражении (12) при суммировании по i учтено, что в $(M+1)$ -ом пункте (т.е. в столице) всегда существует инфраструктура, необходимая для организации местных перевозок: аэропорт, вокзал, автотранспортное предприятие и т.д. Считается, что затраты на содержание этой инфраструктуры постоянны и могут не учитываться, так как при сравнении вариантов парка ВС внутрирегиональных транспортных систем местных перевозок они будут одинаковы.

Что касается функции W , то её вид неразрывно связан с критериями рассматриваемой задачи и подробно рассматривается в следующем разделе.

Решение задачи (10) – вектор X_0 – задаёт множество маршрутов местных перевозок. Подмножество маршрутов, на которых при этом применяются ВС, есть совокупность МВЛ рассматриваемого региона. Для каждой из авиалиний совокупности известен тип применяемого ВС, время и стоимость перелёта. Отсюда искомый парк ВС может быть найден с помощью последующего алгоритма расстановки ВС по авиалиниям с учётом ранее выявленных (раздел 1.2) особенностей организации МВЛ.

Размерность решаемой задачи будет зависеть в т.ч. от рассматриваемого региона, т.е. количества населённых пунктов в нём, и количества типов

транспортных средств в парке. На примере Республики Саха (Якутия), количество пунктов отправления и пунктов прибытия (если таковыми считать городские и сельские поселения) превысит 400 штук. Тогда, при количестве типов транспортных средств в парке не менее пяти, количество независимых варьируемых переменных составит не менее 10^6 , что, с учётом нелинейности рассматриваемой задачи, позволяет говорить о её большой размерности.

В силу этого, а также ограниченности вычислительных ресурсов, возникает необходимость выработки рационального решения этой задачи. Рациональное решение задачи (10) – это значение вектора варьируемых параметров X , полученное за некоторое заданное количество итераций решения (10) согласно разработанному алгоритму. Выбор рационального решения производится следующим образом (рисунок 18):

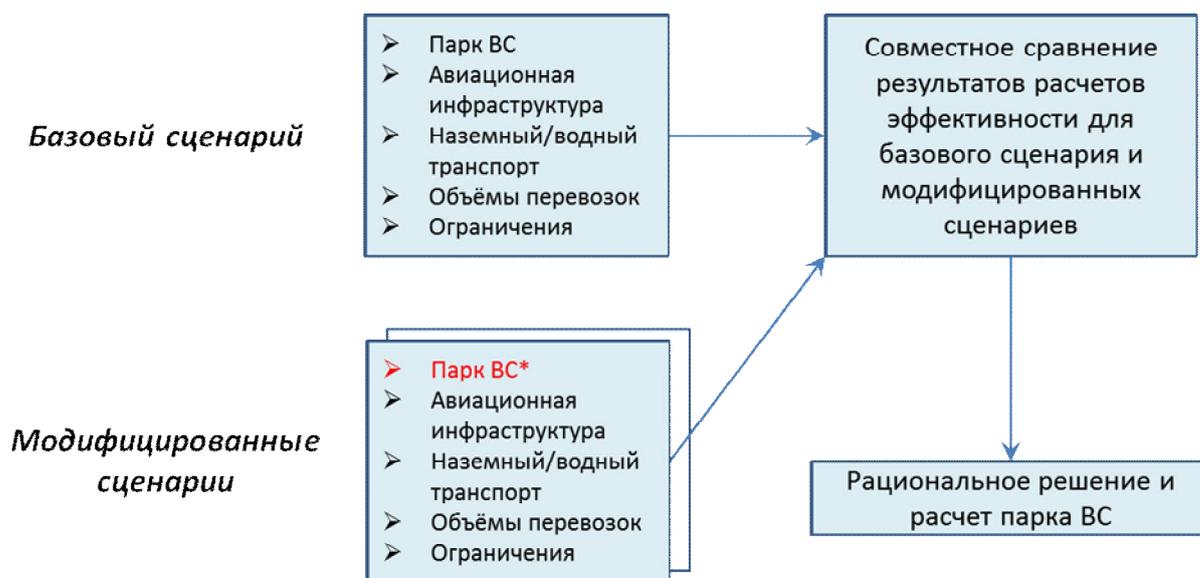


Рисунок 18 – Процедура выработки рационального решения задачи выбора парка ВС для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий

Сначала формируется т.н. «базовый сценарий», включающий некоторый исходный N -типовой парк ВС, объекты инфраструктуры, объёмы перевозок и ограничения. Для данного сценария ставится задача (10) и находится её рациональное решение, т.е. находится значение критерия эффективности E (11) с соответствующими сетью авиалиний и распределением ВС по авиалиниям.

Затем формируются модифицированные сценарии, каждому из которых соответствует новый парк ВС, полученный путём замены в парке ВС базового сценария одного из типов ВС на другой тип ВС при неизменных объёмах работ и ограничениях. Для каждого из модифицированных сценариев также находится рациональное решение задачи (10).

Окончательно проводится сравнение результатов расчётов для базового и модифицированных сценариев. Наилучший искомый парк ВС соответствует сценарию с максимумом критерия E эффективности обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий.

Получаемое решение задачи (10) с учётом (4)-(12) соответствует статической модели формирования парка ВС [39]. В то же время, приемлемость получаемых результатов расчётов достигается за счёт следующих факторов:

- в рассматриваемой внутрирегиональной транспортной системе местных перевозок перевозка пассажиров должна выполняться круглогодично независимо от объёмов спроса, тем самым решается проблема неопределённости целей функционирования парка ВС [39];

- характеристики современных ВС близки к предельным значениям вследствие выхода современного гражданского авиастроения (причём, не только в России, а во всём мире) на участки насыщения трендов технологического развития [61], следовательно, структура парка ВС МВЛ существенно не изменится вследствие незначительного прогнозного изменения ТЭХ перспективных ВС;

- полученное решение может рассматриваться как предельное значение, которое может быть достигнуто в части повышения эффективности E обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий без учёта начального состояния парка ВС, динамики его развития и ограничений на темпы поставок новых ВС.

Адекватность методики расчёта парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий будет проверяться сопоставлением результатов расчётов с фактическим парком (раздел 4.3).

Более глубоким исследованием при формулировании задачи (10) для выбора парка ВС следует считать не минимизацию затрат на организацию МВЛ как таковых, а минимизацию суммы государственных дотаций авиационной промышленности и гражданской авиации на организацию МВЛ [40]. В этом случае в вектор управляющих переменных должны быть добавлены тарифы на перевозку (стоимости билетов), а знаменатель в E задаваться как разница между рассматриваемыми в настоящей работе расходами R и доходами от продажи билетов с учётом зависимости авиационной подвижности населения от тарифов на перевозку. Исследование подобных АТС является наиболее полным подходом к проблеме выбора парка ВС для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий [62]. Однако сложность решения таких задач, по сравнению со сформулированной задачей (10), значительно выросла бы не только из-за увеличения количества варьируемых переменных, но и в силу необходимости разработки эконометрической модели авиационной подвижности населения, что само по себе уже является достаточно сложной задачей.

Без введения же в рассмотрение этой эконометрической зависимости, возможны ситуации (по сути, фиксация тарифов на билеты):

- доходная часть оптимизируемой функции задаётся константой, и тогда суть задачи полностью сводится к задаче (10);
- доходная часть складывается из доходов на каждой авиалинии, тем самым затраты пропорционально уменьшаются, и задача вновь сводится к задаче (10).

Поскольку разработка зависимости авиационной подвижности населения от тарифов выходит за рамки настоящей работы, выбор парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий через решение (10) для различных сценариев применения ВС МВЛ следует считать приемлемым.

2.3 Критерии задачи выбора парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны

Вводимые для задачи (10) ограничения D являются набором критериев, при соблюдении которых будет формироваться парк ВС для обеспечения

транспортной доступности труднодоступных территорий страны. Эти критерии задаются как очевидным образом, так и с учётом специфики местных перевозок и применяемых транспортных средств:

$$x_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \wedge \forall j \wedge \forall k ; \quad (13)$$

$$\sum_{k=1}^N \xi(x_{ijk}) = 1, \quad \forall i \wedge \forall j, \quad \xi(x_{ijk}) = \begin{cases} 0, & x_{ijk} = 0 \\ 1, & x_{ijk} > 0 \end{cases} ; \quad (14)$$

$$x_{izk} = 0, \quad \forall x_{zjk} > 0, j \neq M + 1, k \in S^{cam} ; \quad (15)$$

$$k = k^*, \quad \forall x_{izk} > 0, \forall x_{zjk^*} > 0, j = M + 1, k \in S^{cam}, k^* \in S^{cam} ; \quad (16)$$

Данные ограничения означают:

- условие (13) – количество перевозимых пассажиров не может быть отрицательным;
- условие (14) – поездка между любой парой пунктов возможна с применением транспортных средств только одного типа;
- условие (15) – выполнение рейсов самолётами более чем с одной промежуточной посадкой невозможно, а для остальных транспортных средств подобное условие не задаётся;
- условие (16) – при совершении местной поездки пересадка из одного самолёта в другой не производится.

Условие (14) является необязательным: в действительности не существует ограничений, запрещающих перевозку из одного пункта в другой посредством различных транспортных средств одновременно. С другой стороны, организацию альтернативных способов поездки следует считать скорее способом повышения надёжности функционирования транспортной системы. И поскольку решаемая задача касается поиска рациональной организации перевозок при заданном качестве транспортных услуг, не включающих фактор надёжности (а повышение надёжности функционирования системы невозможно без дополнительных затрат), – как результат, введение условия (14) позволяет упростить задачу (10).

Условия (15)-(16) – с одной стороны, также необязательны, и являются отражением существующей ситуации в соответствии с анализом рисунков 11-12. С другой стороны, несмотря на поставленную цель минимизации затрат, данные условия следует трактовать как требования к комфорту современных авиационных пассажиров.

Поскольку задачей настоящей работы является расчёт требуемого парка ВС, количество в распоряжаемом парке транспортных средств любого типа должно быть не меньше количества, требуемого для перевозки всех пассажиров силами только этих транспортных средств:

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{M+1} Park(x_{ijk}) \leq N_k, \quad \forall k, \quad (17)$$

где N_k – парк доступных в регионе транспортных средств k -го типа, причём требуемый парк этих транспортных средств рассчитывается при помощи функции $Park()$. Следовательно, условие (17) для задачи (10) можно не вводить: искомый требуемый парк транспортных средств k -го типа N_k будет относиться не к ограничениям, а к показателям внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок. Методика расчёта требуемого парка ВС будет приведена ниже в разделе 3.6 в составе алгоритма выбора парка ВС.

Кроме того, в задаче вводятся два ключевых ограничения как условия выбора парка ВС с целью именно повышения транспортной доступности труднодоступных территорий как понятия, которое, в соответствии с определением, данным в разделе 1.1, связано с временными характеристиками транспортной системы. Эти условия – условие соблюдения общего времени в пути «от двери до двери» и условие соблюдения частоты перевозок:

- суммарное время поездки по любому маршруту, связывающему i -ый пункт со столичным $(M+1)$ -ым пунктом, не должно превышать нормативную продолжительность местной поездки $T_{МАРШ}$;

- частота движения транспортных средств на любом маршруте, связывающем i -ый пункт со столичным $(M+1)$ -ым пунктом, должна быть не реже, чем нормативная регулярность перевозок $T_{РЕГ}$.

С формальной математической точки зрения, без задания ограничения $T_{МАРШ}$ местные воздушные перевозки осуществлялись бы только в населённые пункты, для которых отсутствует наземная/водная транспортная связь со столицей региона. Это следует из того, что воздушные перевозки являются заведомо более дорогим типом пригородного транспорта по сравнению с остальными. Без задания же $T_{РЕГ}$ получалось бы решение, не согласующееся с реалиями пригородного сообщения: наиболее дешёвый способ перевозки – посредством наиболее крупных по пассажироместности транспортных средств при частоте поездок, близкой к 100%-ой заполняемости салона.

Также необходимость введения условий для $T_{МАРШ}$ и $T_{РЕГ}$ связана с коммерческой непривлекательностью местных поездок, поскольку только государственное регулирование в этой сфере позволяет обеспечить приемлемое качество местных перевозок как оказываемых транспортных услуг за счёт увеличения частоты и скорости перевозок до уровня, отвечающего высоким социальным стандартам транспортной доступности. Тогда, при таком введении ограничений для $T_{МАРШ}$ и $T_{РЕГ}$, их следует трактовать как нормативные стандарты к качеству местных перевозок, вводимые на общегосударственном уровне [53]. Повышение качества воздушного сообщения за счёт увеличения регулярности авиаперевозок, в том числе благодаря государственной поддержке, отмечается как непереносимое условие перехода к перспективной российской АТС, отвечающей установленным социальным стандартам транспортной доступности [26, 46, 66].

Математическая формализация ограничений для $T_{МАРШ}$ и $T_{РЕГ}$ производится следующим образом.

Требование к суммарному времени в пути «от двери до двери» вводится как суммарное техническое время поездки по любому маршруту, связывающему i -ый пункт со столичным $(M+1)$ -ым пунктом, не превышающее нормативную продолжительность местной поездки $T_{МАРШ}$:

$$t_{i z_1 k} + t_{z_1 z_2 k} + \dots + t_{z_{h-1} z_h k} + t_{z_h z_{h+1} k} + \dots + t_{z_H z_{M+1} k} \leq T_{МАРШ},$$

$$1 \leq h \leq H \leq M, \forall i, \forall k, \quad (18)$$

где t_{ijk} – время выполнения поездки k -ым транспортным средством из i -го пункта в j -ый.

Под техническим временем поездки подразумевается время, обусловленное только техническими характеристиками транспортных средств без учёта организационных мероприятий на местах: времени ожидания, пересадки и пр. Данный подход приемлем, так как время поездки есть сумма времён всех этапов поездки, и, следовательно, параметры, связанные со временами ожидания, пересадки и пр., могут быть опущены при одновременном уменьшении $T_{МАРШ}$: например, задание времени всех пересадок «1 час» и стандарта «5 часов» равносильно заданию нулевого времени пересадок и стандарта «4 часа».

Без этого упрощения, для повышения точности расчёта времени поездки потребовалось бы собрать и оцифровать огромное количество дополнительных данных (координаты, устройство и состояние всех объектов транспортной инфраструктуры и зданий, расписание движения общественного транспорта и т.п.), что в рамках настоящей работы представляется труднореализуемым.

Требование к частоте движения транспортных средств на любом маршруте, связывающем i -ый пункт со столичным $(M+1)$ -ым пунктом, удовлетворяется через непосредственное задание численных значений a_i :

$$a_i = \left[T_{РЕГ} \times k_{сез} \times \frac{a_i^{(\Sigma)}}{365} \right] + 1, \quad \forall i, \quad (19)$$

где $a_i^{(\Sigma)}$ – суммарный годовой объём перевозок из i -го пункта отправления;

$k_{сез}$ – коэффициент сезонности спроса на авиаперевозки;

значение $T_{РЕГ}$ задаётся как «количество рейсов в сутки».

Другими словами, поскольку требование к частоте движения задаётся одинаковым для любых маршрутов местных перевозок, то его соблюдение может быть практически реализовано через моделирование периода перевозок как равного $T_{РЕГ}$.

По итогам рассмотрения условий для $T_{МАРШ}$ и $T_{РЕГ}$ следует отметить, что при неограниченности парка транспортных средств условие (19) будет

выполняться всегда, в то время как выполнение условия (18) будет зависеть от скорости наиболее скоростного ВС в парке. Тогда при некотором выборе типов ВС в парке возможно возникновение ситуации, что для некоторых пунктов отправления i^* будет справедливо:

$$t_{i^*M+1k} \geq T_{МАРШ}, \quad \exists i^*, \forall k, \quad (20)$$

В качестве примера может быть рассмотрен посёлок Черский, для обслуживания которого функционирует авиалиния «Якутск – Черский» протяжённостью более 1600 км. Пусть задано $T_{МАРШ} = 4$ часа и рассматривается однотипный парк ВС МВЛ на основе самолёта L-410 (максимальная крейсерская скорость – 380 км/ч, перегоночная дальность – около 1400 км [14]). Для данного ВС время беспосадочного перелёта на рассматриваемом маршруте составило бы 4,2 часа, а с учётом необходимости выполнить промежуточную посадку (т.к. 1400 км < 1600 км) суммарное время поездки составило бы не менее 5 часов. Тем самым выполняется условие (20), что противоречит ограничению (18) и указывает на отсутствие решения задачи (10). По факту, выполнение условия (20) означает, что для пассажиров в пунктах отправления i^* нормативные требования к скорости местной поездки при заданном $T_{МАРШ}$ не могут быть выполнены.

Во избежание подобных ситуаций, возможны два равносильных шага:

- обособленное рассмотрение подобных пунктов отправления i^* с последующим их учётом при итоговом расчёте парка ВС;

- более усложнённая запись условия (18) в виде

$$t_{i z_1 k} + t_{z_1 z_2 k} + \dots + t_{z_{h-1} z_h k} + t_{z_h z_{h+1} k} + \dots + t_{z_H z_{M+1} k} \leq T_{МАРШ}, \quad 1 \leq h \leq H \leq M, \forall i \notin S^*, \forall k, \quad (21)$$

$$V_{k^*}^{КРЕЙС} = \max(V_k^{КРЕЙС}), \quad \forall i \in S^*, \forall k, \quad (22)$$

где k^* – соответствует наиболее скоростному ВС в парке³;

³ Также теоретически возможны ситуации, когда условие (18) выполняется для некоторых наиболее скоростных ВС в парке, но при этом максимальная дальность полёта этих ВС недостаточна для беспосадочного перелёта, а при совершении ими промежуточной посадки условие (18) уже не выполняется. Подобные ситуации в работе не рассматриваются, поскольку при наличии в парке самолётов пассажироместимостью более 19 мест, с учётом лётно-технических характеристик (ЛТХ) существующих ВС, возникновение подобных ситуаций при проведении практических расчётов невозможно.

S^* – множество пунктов отправления i^* ;

$V_k^{КРЕЙС}$ – крейсерская скорость ВС.

Впрочем, во избежание подобного усложнения задачи (10), в практическом плане целесообразно применение следующей процедуры:

- предварительный поиск пунктов отправления с гарантированным невыполнением стандарта $T_{МАРШ}$ при заданных типах ВС в парке;
- выделение подобных пунктов отправления в обособленную группу (формирование множества S^*);
- расчёт рациональных маршрутов рейсов для пунктов из множества S^* (и соответствующих стоимостей) после нахождения оптимума для всех остальных пунктов отправления.

Тогда, с учётом условий (18-22), функция уровня обеспечения транспортной доступности W может быть задана как имеющая максимальное значение, если множество S^* пусто, и имеющая значение меньше максимального, если множество S^* непусто.

Для проведения практических расчётов, вид W был выбран следующим образом:

$$W = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M a_i^*}{b_1}, \quad (23)$$

где $a_i^* \in S^*$ – соответствуют тем населённым пунктам, для которых, с учётом типов рассматриваемых транспортных средств, не существует ни одного маршрута, для которого выполняется условие (18).

2.4 Комплекс моделей для задачи выбора парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны

Особенностью математического моделирования больших систем является обстоятельство, что требования к вводимым моделям и условиям – противоречивы. С одной стороны, модели должны достаточно просто и адекватно

отражать суть рассматриваемой предметной области, чтобы реализованный на их основе ПК обеспечивал получение приемлемых результатов в разумные сроки. С другой стороны, излишнее упрощение не должно приводить к существенному искажению результатов и их несоответствию действительности. Таким образом, в каждой задаче системного анализа необходима выработка индивидуального подхода, дающего разумный компромисс между точностью, временем и стоимостью проведения расчётов [33, 47].

В настоящей работе математические модели авиационных элементов (ВС и инфраструктуры) внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок строятся на основе следующих характеристик (таблица 2):

Таблица 2 – Используемые характеристики авиационных элементов внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок

Подсистема	Характеристики
<p>ВС k-го типа</p>	<ul style="list-style-type: none"> - максимальная взлётная масса $m_{\max k}$ - масса пустого $m_{\text{ПУСТ } k}$ - максимальный запас топлива $m_{\text{ТОПЛ } k}$ - зависимость максимальной коммерческой нагрузки от дальности полёта $m_{\text{КОММ } k}(L)$ (рисунок 8) - пассажировместимость $z_{\max k}$ - экипаж $n_{\text{ЭК } k}$ - скорости: <ul style="list-style-type: none"> набора высоты $V_k^{\text{НАБОР}}$ крейсерская $V_k^{\text{КРЕЙС}}$ снижения $V_k^{\text{СНИЖ}}$ - высота крейсерского полёта $h_k^{\text{КРЕЙС}}$ - аэродинамическое качество: <ul style="list-style-type: none"> при наборе высоты $K_k^{\text{НАБОР}}$ крейсерское $K_k^{\text{КРЕЙС}}$ при снижении $K_k^{\text{СНИЖ}}$ - количество двигателей $n_{\text{ДВ } k}$ - тяга двигателя (для ВС с реактивными двигателями): <ul style="list-style-type: none"> минимальная $P_{\min k}$ крейсерская $P_{\text{КРЕЙС } k}$ максимальная продолжительная $P_{\max k}$ - мощности двигателя (для ВС с турбовинтовыми или

	<p>поршневыми двигателями):</p> <ul style="list-style-type: none"> минимальная $N_{\min k}$ крейсерская $N_{\text{КРЕЙС } k}$ максимальная продолжительная $N_{\max k}$ - удельный расход топлива двигателя $c_{E k}$ или $c_{R k}$ (в зависимости от типа двигателя силовой установки) - потребная длина ВПП l_k^{BC} - назначенный ресурс ВС (планера $T_{PEC k}$, двигателей) - срок службы ВС - удельные трудозатраты, нормативы и стоимости обслуживания по типам технического обслуживания и ремонта (ТОиР) - стоимость $C_{BC k}$
<p>Авиационная инфраструктура (i-ый аэропорт или посадочная площадка)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - географические координаты (центр ВПП) x_{ir}, y_{ir} - высота над уровнем моря h_{ir} - длина ВПП $l_{ir}^{AЭРО}$ - стоимость строительства - стоимость эксплуатации - срок службы до капитального ремонта - аэропортовые тарифы и сборы

Хотя некоторые из рассматриваемых характеристик ЛА добавлены избыточно (могут быть получены одна из другой), они традиционно декларируются авиапроизводителями, что облегчает проведение расчётов.

Взаимосвязи характеристик ВС и авиационной инфраструктуры задаются с применением следующих величин (таблица 3):

Таблица 3 – Взаимосвязанные характеристики авиационных элементов

ВС	Авиационная инфраструктура
<ul style="list-style-type: none"> - максимальная взлётная масса ЛА - максимальный запас топлива - пассажировместимость - потребная длина ВПП - удельные трудозатраты, нормативы и стоимости обслуживания (по типам ТОиР) 	<ul style="list-style-type: none"> - длина ВПП - стоимость строительства - стоимость эксплуатации - аэропортовые тарифы и сборы

Прочие возможные характеристики и взаимосвязи, в силу своего многообразия, при моделировании транспортной системы или явно не упомянуты, или не учитываются.

2.4.1 Модель расчёта времени типовой операции местных воздушных перевозок

В первом приближении, в формулах (18), (20)-(21) и т.д. время поездки между пунктами i и j посредством ВС МВЛ могло бы быть задано как время перелёта $t_{ijk}^{КРЕЙС}$ при ортодромической дальности авиалинии L_{ij} и крейсерской скорости ВС $V_k^{КРЕЙС}$:

$$t_{ijk}^{КРЕЙС} = \frac{L_{ij}}{V_k^{КРЕЙС}}, \quad \forall k. \quad (24)$$

Однако анализ корректности формулы (24), выполненный на примере самолёта L-410UVP-E20 [14] как самолёта МВЛ, показывает, что эта формула применима только для дальностей свыше 100 км (рисунок 19):

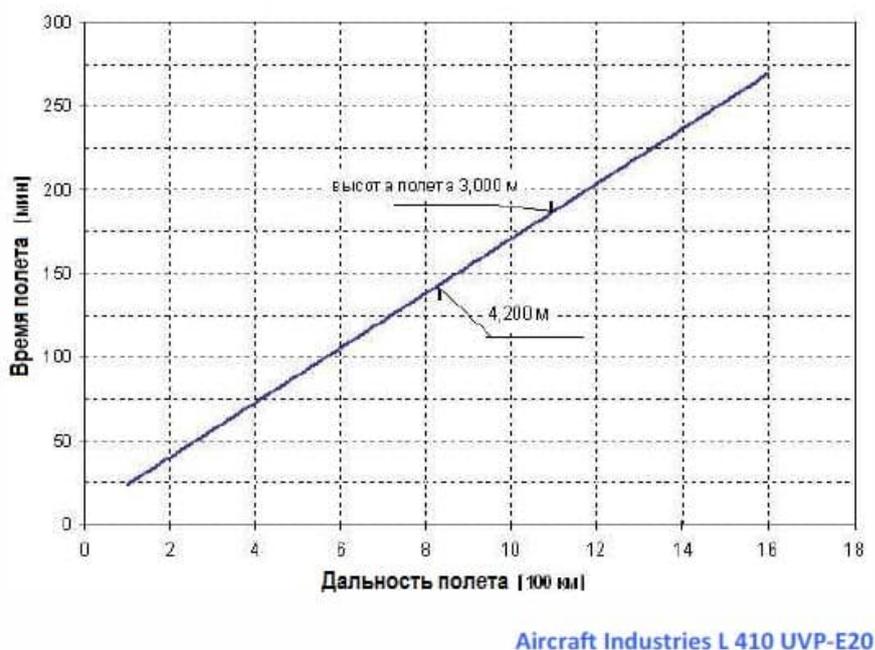


Рисунок 19 – Время полёта самолёта L-410UVP-E20

На рисунке 19 угол наклона графика соответствует максимальной крейсерской скорости полёта самолёта. Зависимость линейна только для

дальностей свыше 100 км, что может иметь существенное значение при расчёте коротких перелётов с выполнением промежуточной посадки (см. анализ рисунка 12).

Помимо необходимости уточнения времени полёта на дальность менее 100 км по сравнению с рассчитанным по формуле (24), также из рисунка 19 следует, что существует погрешность, связанная с высотой полёта (вертикальные отрезки для высот 3000 м и 4200 м). Это косвенно свидетельствует о целесообразности учёта высоты аэродрома над уровнем моря, так как ряд аэродромов МВЛ могут быть горными.

Как следствие, в качестве времени t_{ijk} как типовой операции МВЛ используется блоковое время перелёта ВС $t_{ijk}^{БЛОК}$ – время, отсчитываемое от момента закрытия салонной двери в i -ом аэропорте отправления до момента её открытия в j -ом аэропорте прибытия:

$$t_{ijk} \equiv t_{ijk}^{БЛОК} = t_{ijk}^{НАЗ} + t_{ijk}^{НАБОР} + t_{ijk}^{КРЕЙС} + t_{ijk}^{СНИЖ}, \quad (24)$$

где $t_{ijk}^{НАЗ}$ – время выполнения ВС наземных операций (запуск двигателей, руление, взлёт/посадка и т.д.);

$t_{ijk}^{НАБОР}$, $t_{ijk}^{СНИЖ}$ – времена набора крейсерской высоты и время снижения, соответственно;

$t_{ijk}^{КРЕЙС}$ – продолжительность крейсерского участка полёта ВС.

Формула (24) соответствует упрощённому профилю полёта ВС, состоящему из условных воздушного и наземного участков (рисунок 20):

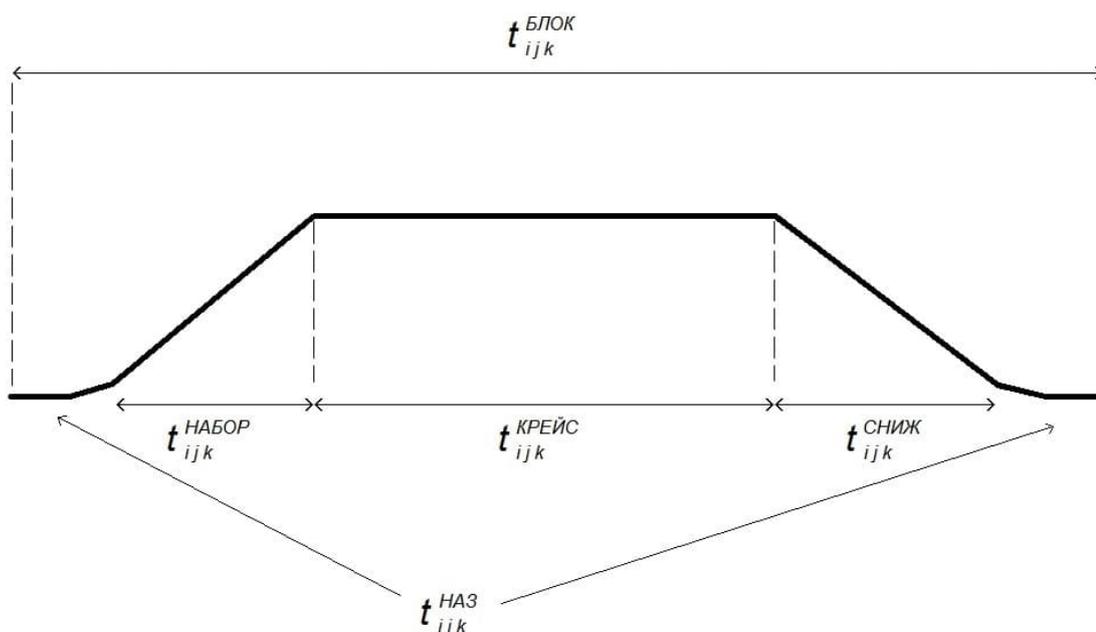


Рисунок 20 – Составляющие блокового времени полёта ВС

Рассмотрим далее расчёт характеристик обоих участков.

Для воздушного участка профиля полёта вводятся следующие упрощающие предположения:

- полёт происходит вдоль ортодромической линии, соединяющей аэропорты отправления и прибытия;
- набор крейсерской высоты полёта производится равномерно и при режимах работы двигателей, близких к максимальному продолжительному режиму и позволяющих выдерживать постоянную скорость набора высоты;
- крейсерский полёт выполняется при постоянстве скорости и высоты полёта;
- не рассматривается участок захода на посадку: предполагается, что ВС снижается с постоянной скоростью и при режиме работы двигателей «полётный малый газ».

Временным составляющим воздушного участка профиля $t_{ijk}^{НАБОР}$, $t_{ijk}^{КРЕЙС}$ и $t_{ijk}^{СНИЖ}$, т.е. без учёта воздушных участков взлёта и посадки, соответствуют дальности $L_{ijk}^{НАБОР}$, $L_{ijk}^{КРЕЙС}$ и $L_{ijk}^{СНИЖ}$ так, что:

$$L_{ij} = L_{ijk}^{НАБОР} + L_{ijk}^{КРЕЙС} + L_{ijk}^{СНИЖ}, \quad \forall k. \quad (25)$$

С учётом возможных малых расстояний L_{ij} , алгоритм расчёта времени t_{ijk} имеет вид (рисунок 21):

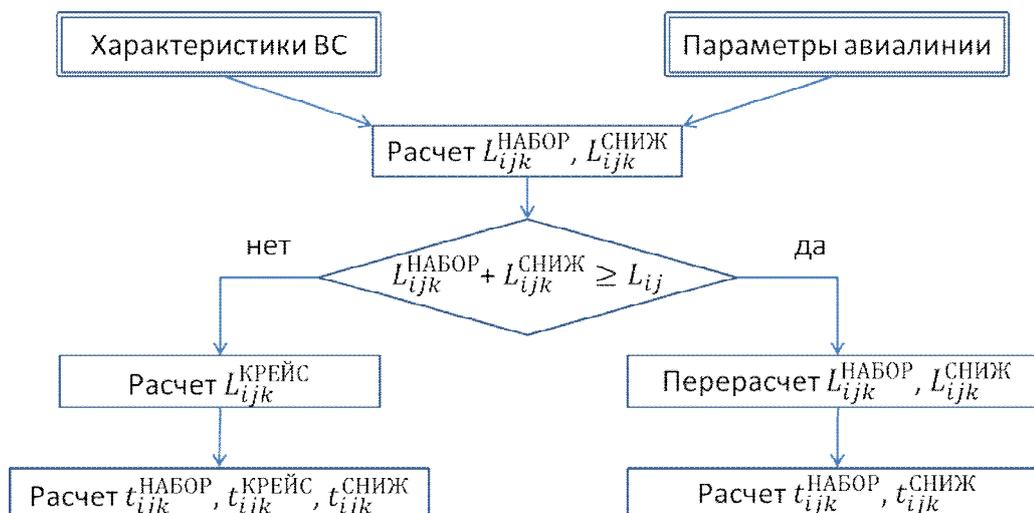


Рисунок 21 – Алгоритм расчёта времени типовой операции МВЛ

Приведённый алгоритм означает следующую последовательность действий. На основе характеристик ВС (таблица 2) и параметров авиалинии производится расчёт длины участков набора высоты и снижения:

$$L_{ijk}^{\text{НАБОР}} \approx \frac{h_k^{\text{КРЕЙС}} - h_i}{\theta_k^{\text{НАБОР}}(w_{ijk})}, \quad (26)$$

$$L_{ijk}^{\text{СНИЖ}} \approx \frac{h_k^{\text{КРЕЙС}} - h_j}{\theta_k^{\text{СНИЖ}}(w_{ijk})}, \quad (27)$$

где $\theta_k^{\text{НАБОР}}(w_{ijk})$, $\theta_k^{\text{СНИЖ}}(w_{ijk})$ – соответственно, углы наклона траектории при наборе высоты и снижении в зависимости от полезной нагрузки, приближённо рассчитываемые из баланса сил в полёте как

$$\theta_k^{\text{НАБОР}}(w_{ijk}) = \frac{P_k^{\text{НАБОР}}}{m_k^{\text{ВЗЛ}}(w_{ijk})} - \frac{1}{K_k^{\text{НАБОР}}}, \quad (28)$$

$$\theta_k^{\text{СНИЖ}}(w_{ijk}) = \frac{1}{K_k^{\text{СНИЖ}}} - \frac{P_k^{\text{СНИЖ}}}{m_k^{\text{ПОС}}(w_{ijk})}. \quad (29)$$

Здесь $P_k^{\text{НАБОР}}$, $P_k^{\text{СНИЖ}}$ – соответственно, тяга двигателей при наборе высоте и снижении;

$m_k^{ВЗЛ}(w_{ijk})$, $m_k^{ПОС}(w_{ijk})$ – соответственно, взлётная и посадочная массы ВС, также в зависимости от полезной нагрузки.

Если сумма длин указанных участков не превышает ортодромическую протяжённость авиалинии L_{ij} – рассчитывается длина горизонтального участка полёта и соответствующие времена:

$$L_{ijk}^{КРЕЙС} = L_{ij} - L_{ijk}^{НАБОР} - L_{ijk}^{СНИЖ} , \quad (30)$$

$$t_{ijk}^{НАБОР} = \frac{L_{ijk}^{НАБОР}}{V_k^{НАБОР}} , \quad t_{ijk}^{КРЕЙС} = \frac{L_{ijk}^{КРЕЙС}}{V_k^{КРЕЙС}} , \quad t_{ijk}^{СНИЖ} = \frac{L_{ijk}^{СНИЖ}}{V_k^{СНИЖ}} . \quad (31)$$

Если же сумма длин $L_{ijk}^{НАБОР}$ и $L_{ijk}^{СНИЖ}$ превышает L_{ij} , то это означает, что ВС не успевает достигнуть высоты крейсерского полёта. В этом случае производится перерасчёт этих длин участков набора высоты и снижения, а суммарное время перелёта рассчитывается также по формулам (31), но с учётом, что:

$$L_{ijk}^{НАБОР} \approx \frac{L_{ij}\theta_k^{СНИЖ}(w_{ijk}) + h_j - h_i}{\theta_k^{НАБОР}(w_{ijk}) + \theta_k^{СНИЖ}(w_{ijk})} , \quad (32)$$

$$L_{ijk}^{СНИЖ} \approx \frac{L_{ij}\theta_k^{НАБОР}(w_{ijk}) + h_i - h_j}{\theta_k^{НАБОР}(w_{ijk}) + \theta_k^{СНИЖ}(w_{ijk})} , \quad (33)$$

$$L_{ijk}^{КРЕЙС} = 0 . \quad (34)$$

Формулы (26)-(34) являются приближёнными расчётными выражениями, вводимыми без учёта возможных изменений траектории полёта вследствие выработки топлива, нелинейных высотных характеристик двигателей, уборки/выпуска шасси и прочих факторов. Взлётная масса ВС задаётся как сумма масс пустого ЛА, экипажа, пассажиров и топлива на полёт (как предварительное значение по формуле Бреге), посадочная масса – сумма тех же величин, кроме массы топлива на полёт.

Что касается наземного участка профиля, то основную часть времени движения ВС по земле $t_{ijk}^{НАЗ}$ занимают операции, связанные с рулёжкой ВС от перрона до стартовой точки на ВПП и от конечной точки пробега по ВВП до

перрона. Расчёт затрат времени на эти операции несложен, однако может быть выполнен только в привязке к конкретному аэродрому. В то же время, на основе расписания МВЛ можно построить следующую зависимость времени перелёта от расстояния между аэродромами (рисунок 22):

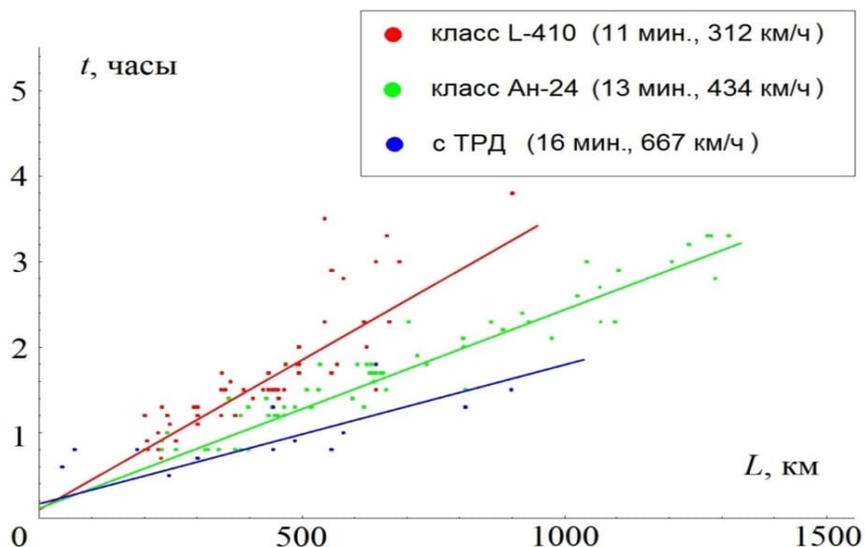


Рисунок 22 – Аппроксимация времени перелёта ВС МВЛ

Времена выполнения рейсов, разбитые по условным классам ВС с учётом пассажироместимости и силовой установки (точки красного, зеленого и синего цветов), могут быть аппроксимированы прямыми линиями. При дальности $L = 0$ км эти прямые пересекают ось ординат в диапазоне времени от 11 до 16 минут. Данный диапазон, как постоянный вклад во время перелёта, можно считать оценкой, включающей в себя и время движения ВС по земле (наряду с необходимостью поправки на кривизну маршрута ВС и пр.):

$$t_{ijk}^{HA3} \cong 15 \text{ минут}, \quad \forall i, j, k. \quad (35)$$

Поскольку, как известно из практики авиастроения, время разбега и пробега ВС не превышает 1-2 мин. [48], их вклад при расчёте $t_{ijk}^{БЛОК}$ можно отдельно не рассматривать.

Оценка точности методики расчёта блокового времени выполнена на примере самолёта L-410 на основе расписания МВЛ, где этот самолёт применялся в 2015 году. Результаты расчёта времени перелёта, выполненного для крейсерской

скорости 350 км/ч, представлены в таблице Приложения А: за исключением некоторых случаев, абсолютная погрешность вычислений не превышает 0,2 часа, при этом разброс в зависимости от дальности авиалинии не имеет систематического характера. В диапазон погрешности 0,2 часа не попадают всего три линии со значительным превышением фактического времени над расчётным: «Орск – Светлый» (0,5 часа), «Петропавловск-Камчатский – Усть-Хайрюзово» (0,3 часа) и «Салехард – Тарко-Сале» (0,4 часа). Это может быть связано как с особенностями организации рейсов (задержки в аэропорту), так и полётными условиями (неортодромический характер траектории). В силу этого, данные линии могут быть исключены из рассмотрения.

Таким образом, поскольку точность вычислений не превышает эмпирическое время движения ВС по земле 0,25 часа в формуле (35), полученный результат можно считать приемлемым.

2.4.2 Модель расчёта стоимости типовой операции местных воздушных перевозок

Одной из особенностей методики является исключение из рассмотрения затрат на аэропортовое обслуживание. Данный шаг обусловлен тем, что выбор парка ВС будет одинаков как при минимизации субсидий на местные воздушные перевозки, так и при рассматриваемой в настоящей работе минимизации суммы затрат на выполнение местных воздушных перевозок. Соответствие между приведёнными выше составляющими затрат представлено на рисунке 23:

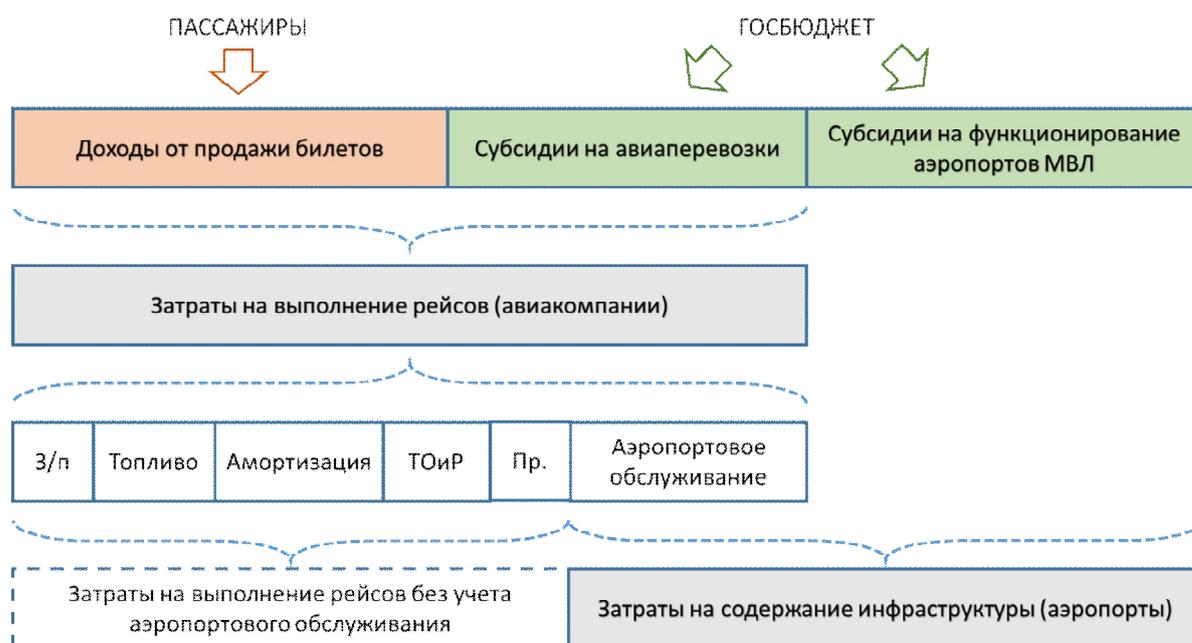


Рисунок 23 – Соответствие между различными затратами в АТС МВЛ

Здесь суммарная ширина прямоугольников верхнего ряда соответствует суммарным затратам на местные воздушные перевозки и совпадает с суммарной шириной прямоугольников нижнего ряда. При этом следует обратить внимание, что если бы суммарные затраты на местные воздушные перевозки рассчитывались как сумма затрат на выполнение рейсов и затрат на содержание инфраструктуры (серые прямоугольники на рисунке 23) – это привело бы к двойному учёту затрат на аэропортовое обслуживание в искомой сумме. Отсюда следует, что величина аэропортовых сборов не имеет значения, если берётся суммарная ширина прямоугольников нижнего ряда: изменение величины сборов за аэропортовое обслуживание приводит лишь к перераспределению долей субсидий между авиакомпаниями и аэропортами.

Данное утверждение справедливо только для АТС (к которым относится и АТС МВЛ), в которых сборы за аэропортовое обслуживание меньше затрат на содержание инфраструктуры. Например, для магистральных авиалиний сборы за аэропортовое обслуживание превышают затраты на содержание инфраструктуры; аэропорты, как самостоятельные предприятия, приносят прибыль от своей деятельности, и тогда, например, для оценки экономической эффективности

магистральных самолётов достаточно моделирования затрат на выполнение рейсов.

Таким образом, расчёт суммарных затрат на МВЛ, при отсутствии информации о размере/принципах субсидирования местных воздушных перевозок, может быть равноценно заменён на сравнение с точки зрения суммы затрат на инфраструктуру и затрат на авиаперевозки без учёта аэропортовых сборов с введением соответствующих математических моделей.

Для ВС формула (8), стоимость c_{ijk} типовой операции МВЛ, может быть записана с учётом ограничения перегоночной дальности $L_{k\text{пер}}$ в виде:

$$c_{ijk}(x_{ijk}) = \begin{cases} \left(\left[\frac{x_{ijk}}{z_k(L_{ij})} \right] + 1 \right) c_{ijk}^{OP}(i, j, w_{ijk}, q_{ik}, q_{jk}), & L_{ij} < L_{k\text{пер}} \\ \infty, & L_{ij} \geq L_{k\text{пер}} \end{cases}, \forall i, \forall j, \forall k \in BC, \quad (36)$$

Область определения функции $z_k(L)$ ограничена перегоночной дальностью ВС k -го типа $L_{k\text{пер}}$. Отсюда при бóльших дальностях затраты на перевозку в формуле (27), во избежание неоднозначностей, обращаются в бесконечность. В этом случае, при практической реализации ПК, вводятся заведомо большие значения стоимости, или перебор подобных транспортных связей исключается алгоритмически.

Расчёт стоимости $c_{ijk}^{OP}(i, j, w_{ijk}, q_{ik}, q_{jk})$ основывается на методике [4], модифицированной с учётом современного законодательства РФ и с некоторыми упрощениями, касающимися непосредственно функционирования МВЛ. В задаче (10) эта стоимость задаётся как среднее от стоимостей перелёта «из аэропорта i в аэропорт j » $c_{ijk}^{PEЙС-П}(i, j, w_{ijk})$ и «из аэропорта j в аэропорт i » $c_{ijk}^{PEЙС-О}(j, i, w_{ijk})$, т.е. как половина стоимости парного рейса:

$$c_{ijk}^{OP}(i, j, w_{ijk}, q_{ik}, q_{jk}) = \frac{c_{ijk}^{PEЙС-П}(i, j, w_{ijk}) + c_{ijk}^{PEЙС-О}(j, i, w_{ijk})}{2}. \quad (37)$$

Рассмотрим далее, например, расчёт стоимости $c_{ijk}^{РЕЙС-П}(i, j, w_{ijk})$, блок-схема которого представлена на рисунке 24:

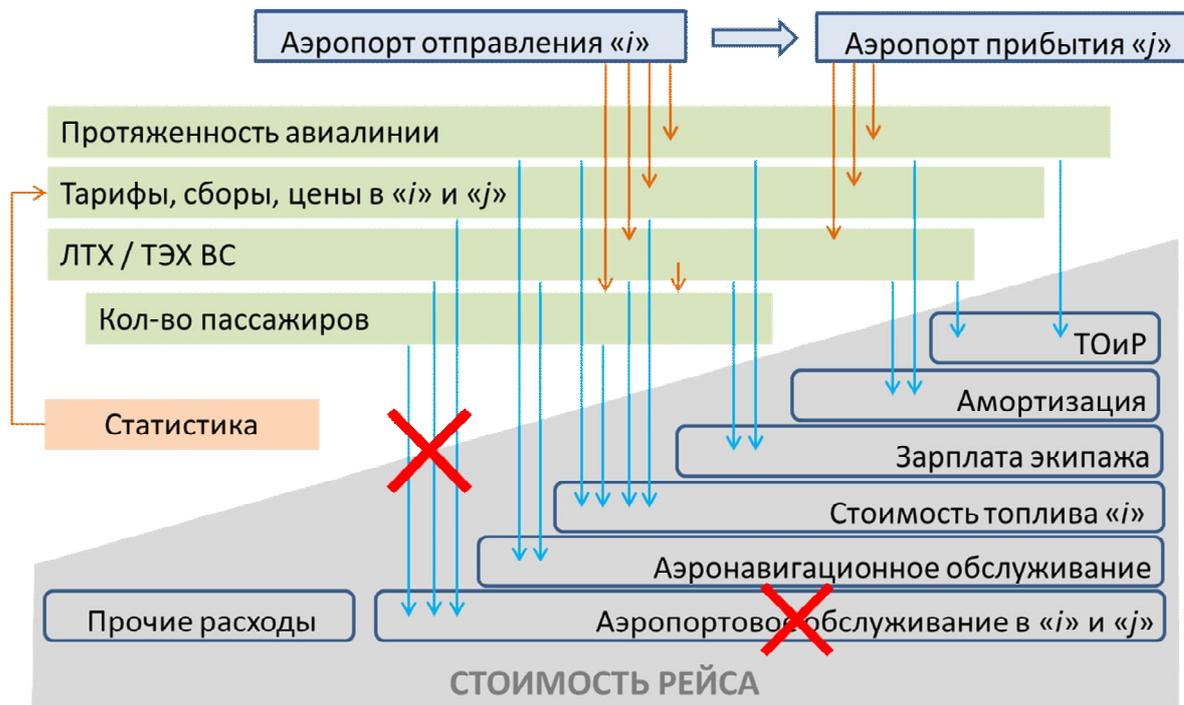


Рисунок 24 – Блок-схема методики расчёта стоимости рейса

Стоимость выполнения типовой операции будет складываться из расходов, непосредственно связанных с выполнением конкретного рейса, и расходов, одинаковых для любых рейсов, но зависящих при этом от продолжительности рейса:

В первую группу включены:

- затраты на наземное обслуживание ВС $c_{ik}^{НАЗ}$;
- затраты на горюче-смазочные материалы (ГСМ) $c_{ik}^{ГСМ}$;
- аэронавигационные сборы $c_{ijk}^{НАВ}$;
- агентские отчисления $c_{ik}^{агент}$.

Во вторую группу расходов входят:

- амортизация стоимости ВС $c_{ijk}^{ВЛАД}$;
- оплата труда лётного состава $c_{ijk}^{ЗП}$;

- начисления на заработную плату лётного состава $c_{ijk}^{НЗП}$;
- расходы на ТОиР $c_{ijk}^{ТОиР}$;
- страхование $c_{ijk}^{страх}$.

Прочие расходы, которые прямо отнести на выполнение рейсов не представляется возможным, учитываются через поправочный коэффициент $K_{НАКЛ}$ (к этим расходам отнесены сбор за сверхнормативную стоянку, расходы на оплату труда наземного персонала и начисления на эту заработную плату, общехозяйственные расходы и пр.).

Затраты на наземное обслуживание c_{ik}^{HA3} , зависящие от типа ВС, рассчитываются только в том случае, если аэропорт отправления – это место базирования ВС, и задаются следующим образом:

$$c_{ik}^{HA3} = \begin{cases} c_{ik}^{OTO} (K_{ik}^{ТТО} + K_{ik}^{OBB}), & i = M + 1 \\ 0, & i \neq M + 1 \end{cases} \quad (38)$$

где c_{ik}^{OTO} – тарифная ставка трудоёмкости работ по техническому обслуживанию по форме А-1 (А-транзитная) и обеспечению вылета и встречи и осмотра ВС;

$K_{ik}^{ТТО}$ – норматив трудоёмкости работ [чел.-ч.] по техническому обслуживанию по форме А-1 (А-транзитная);

K_{ik}^{OBB} – норматив трудоёмкости работ [чел.-ч.] по обеспечению вылета и встречи и осмотра ВС.

Затраты на ГСМ $c_{ik}^{ГСМ}$ рассчитываются с учётом упрощённого профиля полёта ВС:

$$c_{ik}^{ГСМ} = 1,03 (c_{ik}^{ТОПЛ} + c_{ik}^{ЗАПР}) \times (m_{ijk}^{НАБОР} + m_{ijk}^{КРЕЙС} + m_{ijk}^{СНИЖ}) \quad (39)$$

где $c_{ik}^{ТОПЛ}$ – цена авиационного топлива в аэропорте отправления;

$c_{ik}^{ЗАПР}$ – тариф за обеспечение заправки ВС авиационным топливом;

$m_{ijk}^{НАБОР}$, $m_{ijk}^{КРЕЙС}$, $m_{ijk}^{СНИЖ}$ – соответственно массы топлива, затрачиваемые ВС при наборе высоты крейсерского полёта, на участке крейсерского полёта и снижении при выполнении перелёта из i -го аэропорта в j -й;

1,03 – поправочный коэффициент затрат на авиационные технические жидкости.

Массы топлива, затрачиваемые ВС k -го типа на участках набора высоты и снижении:

$$m_{ijk}^{НАБОР} = c_{Rk} n_{\text{дек}} P_{\text{max}k} t_{ijk}^{НАБОР}, \quad m_{ijk}^{СНИЖ} = c_{Rk} n_{\text{дек}} P_{\text{min}k} t_{ijk}^{СНИЖ} \quad (40)$$

для самолёта с реактивными двигателями или

$$m_{ijk}^{НАБОР} = c_{Ek} n_{\text{дек}} N_{\text{max}k} t_{ijk}^{НАБОР}, \quad m_{ijk}^{СНИЖ} = c_{Ek} n_{\text{дек}} N_{\text{min}k} t_{ijk}^{СНИЖ} \quad (41)$$

для самолёта с турбовинтовыми или поршневыми двигателями.

Масса топлива на крейсерском участке полёта рассчитывается по формуле Бреге с учётом массы топлива $m_{ijk}^{СНИЖ}$ и аэронавигационного запаса (АНЗ), которые должны оставаться на борту ВС по завершении крейсерского участка полёта.

Аэронавигационные сборы $c_{ijk}^{НАВ}$ есть:

$$c_{ijk}^{НАВ} = c_i^{АНО-АД} \lceil m_{\text{max}k} \rceil + c_k^{АНО-ТР} \left\lceil \frac{L_{ijr}}{100} \right\rceil + c_j^{АНО-АД} \lceil m_{\text{max}k} \rceil, \quad (42)$$

где $c_i^{АНО-АД}$ – ставка сбора за аэронавигационное обслуживание (АНО) в районе аэродрома (i -го аэропорта) в радиусе 10 км за каждую тонну максимальной взлётной массы ВС;

$c_k^{АНО-ТР}$ – ставка сбора за АНО по маршруту за каждые 100 км, зависящая от принадлежности ВС к определённому классу по критерию максимальной взлётной массы;

$\lceil \rceil$ – оператор округления до ближайшего целого «сверху».

Если аэропорт в i -ом или j -ом пункте существует, то при выполнении расчётов по формуле (42) используются фактические данные об аэропортовых тарифах и сборах, предоставленные ПАО «Транспортной клиринговой палатой»

(«ТКП»). В противном случае используются значения, осреднённые по аэропортам МВЛ рассматриваемого региона.

Что касается *агентских отчислений* $C_{ik}^{агент}$, то они могут быть условно включены в общий поправочный коэффициент $K_{НАКЛ}$.

Ввиду разнообразия форм владения ВС, для расчёта *амортизации стоимости ВС* $C_{ijk}^{ВЛАД}$ вводится предположение, что авиакомпании берут ВС в финансовый лизинг с выплатой их полной стоимости.

Выбор именно такого способа учёта стоимости владения ВС связан с двумя факторами. Во-первых, при лизинге затраты, связанные с оплатой налога на имущество, обучением персонала, закупкой необходимого для эксплуатации ВС оборудования и т.д., относятся к компетенции лизингодателя и для упрощения расчётов могут быть разово учтены через процентную ставку лизинга. Во-вторых, предполагается, что МВЛ организуются на долгосрочной основе и функционируют круглогодично, а потому финансовый лизинг по своей сути является формой долгосрочного кредитования арендатора. В этом случае полная стоимость владения ВС k -го типа должна быть отнесена к продолжительности его эксплуатации, и тогда:

$$C_{ijk}^{ВЛАД} = \frac{C_{ВСК} + C_{ЛИЗk}}{T_{РЕСк}} \times t_{ijk}^{БЛОК}, \quad (43)$$

где $C_{ЛИЗk}$ – суммарные выплаты по лизингу.

В настоящей работе рассматривается лизинг ВС без первоначального платежа и с осуществлением авиакомпанией периодических платежей за первые несколько лет эксплуатации ВС. Формула для расчёта суммарных лизинговых платежей в этом случае будет иметь вид [4]:

$$C_{ЛИЗk} = \frac{T_{ЛИЗ} \xi}{1 - \left(1 + \frac{\xi}{w_{год}}\right)^{-w_{год} T_{ЛИЗ}}} \times C_{ВСК}, \quad (44)$$

где $T_{ЛИЗ}$ – период лизинга, полное количество лет;

$w_{год}$ – количество платежей за год;

ξ – величина годовой процентной ставки лизинга.

Расчёт заработной платы лётного персонала в авиакомпаниях является достаточно сложной процедурой, учитывающей оклады, надбавки за класс, премии, северные надбавки, вознаграждения за выслугу лет, надбавки за условия полёта и пр. В настоящей методике для простоты считается, что вся **оплата труда лётного состава** происходит сдельно:

$$c_{ijk}^{3П} = c^{ЛЧ} n_{ЭКk} t_{ijk}^{БЛОК}, \quad (45)$$

где $c^{ЛЧ}$ – часовая ставка одного члена экипажа.

Начисления на заработную плату лётного состава учитываются через коэффициент социальных отчислений и налогов $K_{СОЦ}$:

$$c_{ijk}^{НЗП} = K_{СОЦ} c_{ijk}^{3П}, \quad (46)$$

В соответствии с Налоговым кодексом РФ, включая статью 429 (введена федеральным законом от 03.07.2016 г №243-ФЗ, ред. от 29.09.2019), учитывались все платежи, выплачиваемые авиакомпанией государству, и поэтому в расчётах применялось значение $K_{СОЦ} = 1,95$.

Расходы на ТОиР $c_{ijk}^{ТОиР}$ задаются через оценочную суммарную стоимость ТОиР в расчёте на лётный час [96] в единицах стоимости USD:

$$c_{ijk}^{ТОиР} = 1,7 \times (175 + 0,0041 m_{ПУСТk} + 0,00029 P_{ВЗЛk}) t_{ijk}^{БЛОК}, \quad (47)$$

где $P_{ВЗЛk}$ – суммарная взлётная тяга двигателей;

1,7 – коэффициент пересчёта в текущие цены, связанный с инфляционным удорожанием (цены, заложенные в методику [96], относятся к 1999 году).

При этом необходимо отметить, что в расчётах $c_{ijk}^{ТОиР}$ отдельно не учитываются затраты на капитальный ремонт двигателей, поскольку формула (47) носит усреднённый статистический характер.

Затраты на **страхование** $c_{ijk}^{страх}$ задаются как установленный законодательством максимально возможный размер 1% от стоимости реализуемых услуг и также могут быть включены в $K_{НАКЛ}$.

Все *прочие расходы* (вышеупомянутые агентские отчисления, оплата труда наземного персонала, производственные и общехозяйственные расходы и пр.) учитываются как дополнительные 5% от общей стоимости типовой операции [29], т.е. $K_{НАКЛ} \sim 1,05$.

Итоговая формула для расчёта стоимости рейса имеет вид:

$$c_{ijk}^{РЕЙС} = K_{НАКЛ} (c_{ik}^{НАЗ} + c_{ik}^{ГСМ} + c_{ijk}^{НАВ} + c_{ijk}^{ВЛАД} + c_{ijk}^{ЗП} + c_{ijk}^{НЗП} + c_{ijk}^{ТОиР}) . \quad (48)$$

Оценка точности и адекватности введённой методики расчёта стоимости типовой операции представляет непростую проблему по двум причинам. Во-первых, экономические показатели любой деятельности имеют нестабильный характер в силу колебаний цен (топливо, производственные затраты, конъюнктура рынка лизинговых услуг и т.д.). Во-вторых, финансовые результаты деятельности авиакомпаний носят закрытый характер, так как представляют коммерческую ценность.

Для сопоставления рассчитанных затрат с фактическими использовались следующие исходные данные (рисунок 25):

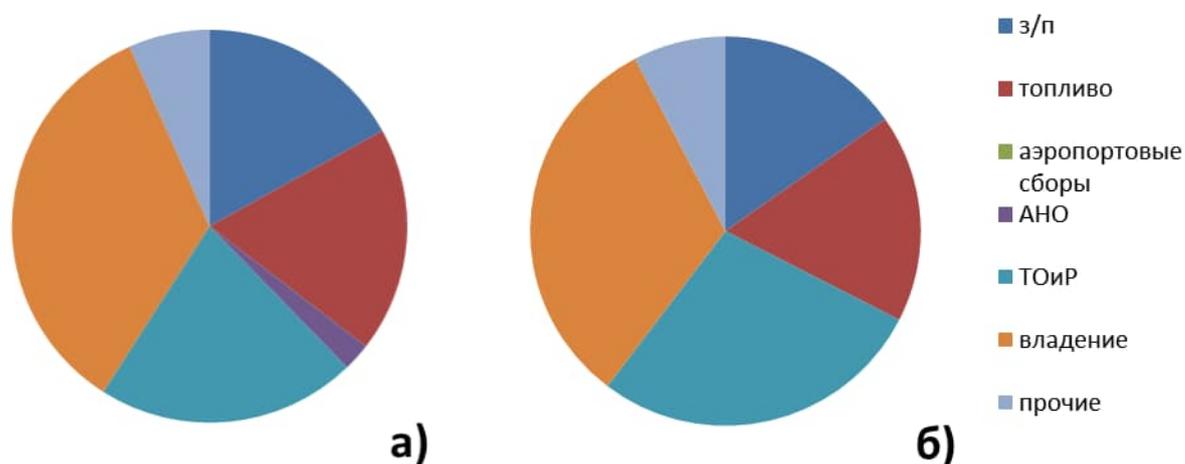


Рисунок 25 – Структуры стоимости лётного часа без учёта аэропортовых сборов:

а) среднестатистическая для рейса МВЛ ($L = 250-300$ км, 2012 г.) [29]

б) самолёта L-410UVP-E (предоставлено «УЗГА», 2020 г.)

Приведённая статистика МВЛ отражает закономерность, указанную при анализе рисунков 3-4: для эксплуатируемых ВС МВЛ, в силу их значительного возраста, амортизация стоимости в среднем практически не производится.

Моделируемые стоимости рейсов представлены на рисунке 26:

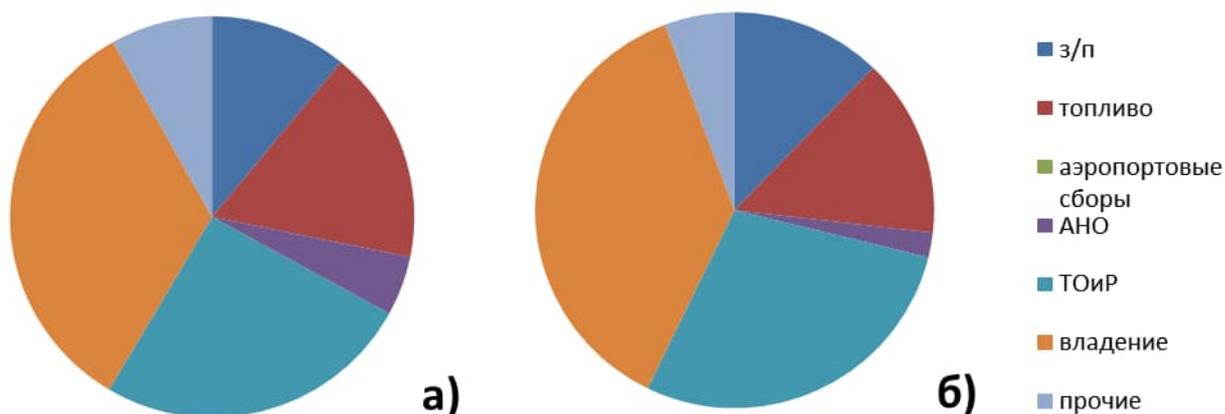


Рисунок 26 – Структуры стоимости лётного часа без учёта аэропортовых сборов, в ценах 2015 г.:

а) авиалиния «Салехард – Надым» ($L = 301$ км)

б) авиалиния «Сыктывкар – Троицко-Печорск» ($L = 302$ км)

Как можно видеть из сравнения рисунков 25б и 26, без учёта аэропортовых сборов, структуры лётного часа имеют сопоставимый вид. Аналогичное соотношение также получается для рисунка 25а при добавлении в структуру лётного часа затрат на владение ВС на уровне ~33%. При этом погрешность расчёта составляющих не превышает 5%.

Полученный результат следует признать приемлемым: стоимость рейса имеет значительную чувствительность к параметрам блокового времени и топлива, а потому прогнозирование стоимости рейса не может быть выполнено с большей точностью в т.ч. с учётом допусков при выполнении инженерно-штурманских расчётов.

2.4.3 Модель расчёта объёмов местных воздушных перевозок

Для построения модели в качестве исходных данных были собраны следующие сведения:

1) Административно-территориальное деление Российской Федерации.

Всего была собрана информация о 85-х субъектах РФ (Долгано-Ненецкий, Ненецкий, Ханты-Мансийский, Ямало-Ненецкий автономные округа рассматривались как отдельные регионы), 2359 муниципальных образованиях

(муниципальных районах, городских округах, закрытых административно-территориальных образованиях), 20984 городских и сельских поселениях в соответствии с иерархией, представленной в таблице 4 [10, 16]:

Таблица 4 – Перечень собранной информации об административно-территориальных единицах РФ

<i>Тип административно-территориальной единицы</i>	<i>Собранные сведения</i>
Регион (субъект РФ или автономный округ)	Название
Муниципальное образование	Название, принадлежность (регион)
Поселение	Название, принадлежность (административный район), региональный статус (является ли столицей региона), муниципальный статус (является ли столицей муниципального образования), географические координаты административного центра поселения

Информация о населённых пунктах не собиралась в силу следующих причин:

- общее количество населённых пунктов в Российской Федерации превышает 200 тыс. штук, общедоступный централизованный государственный перечень населённых пунктов не существует, а ручной сбор такого количества информации представляет весьма трудоёмким;

- в большинстве поселений на труднодоступных территориях в состав поселения входит либо один населённый пункт, либо, если населённых пунктов несколько, основная часть населения проживает в том населённом пункте, который является административным центром поселения.

Отсюда при дальнейшем анализе вводилось допущение, что компактное расселение людей соответствует географическим центрам поселений.

2) Население Российской Федерации.

Численность и распределение городского и сельского населения регионов, районов и поселений брались из официальных источников [6, 7].

3) Сведения о движении наземных транспортных средств на труднодоступных территориях.

В состав сведений входят протяжённость автомобильных дорог, связывающих поселения, и средние скорости движения автотранспортных средств в административных районах [16].

4) Сведения об авиационной инфраструктуре.

Собрана информация о 4771 действующих и 3101 недействующих аэродромах и посадочных площадках [1, 9], включая их географические координаты (центр ВПП), длину ВПП, покрытие ВПП и др.

5) Расписание регулярных воздушных перевозок.

Расписание предоставлено Центром расписания и тарифов «ТКП».

6) Статистика авиационных перевозок.

Использовалась отчетность ФАВТ «Росавиация» по форме №15 ГА «Сведения об объёме перевозок через аэропорты Российской Федерации» [5].

Оценка годовой авиационной подвижности населения труднодоступных территорий выполнялась следующим образом. Из перечня действующих аэропортов делалась выборка тех из них, которые привлекались только для осуществления местных воздушных перевозок (т.е. рейсы в/из рассматриваемого аэропорта осуществлялись только в те аэропорты, которые находятся на территории того же региона, что и рассматриваемый аэропорт). Количество аэропортов в данной выборке составило 96 штук, среди них дополнительно выделялась подвыборка из 60 изолированных аэропортов, для которых наземная транспортная связь отсутствует или составляет более 2000 км (далее условно случай «отсутствие наземной связи»).

Далее для каждого из выбранных 96 аэропортов рассчитывалась численность населения, обслуживаемого с помощью каждого отдельного аэропорта (условно «приписанное население»). Оценочно, эти численности были получены по принципу «приписывания» поселений к ближайшему аэропорту МВЛ при условии, что время наземной поездки до него не превышает 2-3 часов.

Считалось, что, в противном случае, при несоблюдении этого времени смысл местной поездки как таковой теряется, так как на её осуществление в одну сторону тратится большая часть рабочего дня (условно «наличие наземной связи»).

Следующим шагом из выборки и подвыборки исключались отдельные аэропорты, для которых фиксируется пассажиропоток, на порядок превосходящий численность «приписанного населения». Эти аэропорты, как, например, аэропорт Игарка, используются преимущественно для перевозки вахтовых смен, при этом пассажиры, не учитываемые в статистике коммерческих перевозок, попадают в статистику, предоставляемую аэропортами о количестве обслуживаемых пассажиров, таблица 5:

Таблица 5 – Объёмы перевозки через аэропорт Игарка

<i>Количество человек, проживавших в г. Игарка в 2015 г.</i>	<i>5117 чел.</i>
Отдалённость от Красноярска (ортодромическая дальность)	1301 км
Объём пассажирских перевозок через аэропорт в 2014 г.	208062 чел.
То же, в 2015 г.	192090 чел.
То же, в 2016 г.	214325 чел.
То же, в 2017 г.	278039 чел.

Рассчитанные для выборки и подвыборки статистические значения годовой авиационной подвижности представлены на рисунках 27-28 в предположении, что за период 2014-17 гг. численность населения на труднодоступных территориях изменилась незначительно, поэтому выявляемые закономерности носят систематический характер:

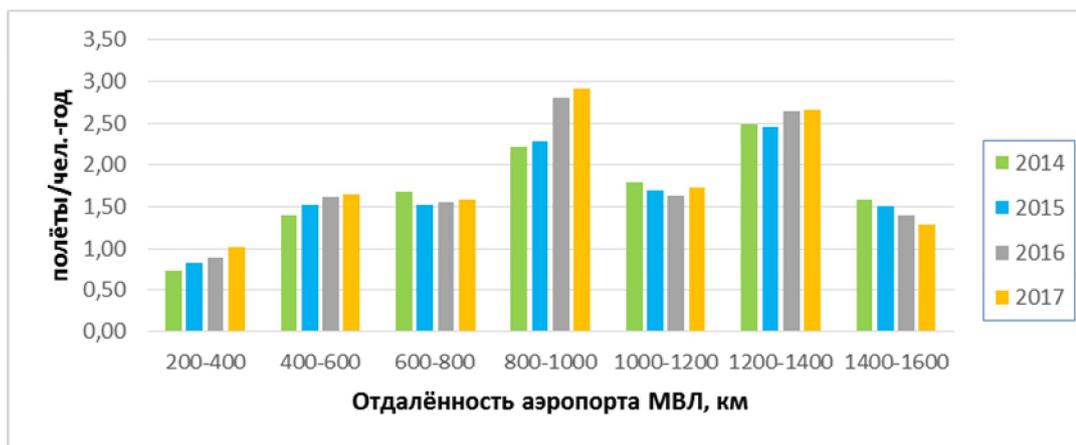


Рисунок 27 – Годовая авиационная подвижность населения труднодоступных территорий при «наличии наземной связи»

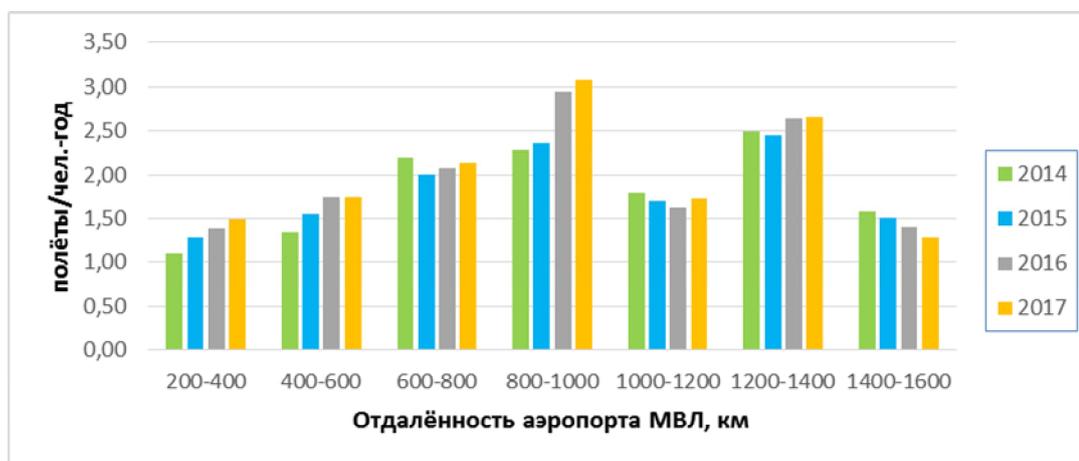


Рисунок 28 – Годовая авиационная подвижность населения труднодоступных территорий при «отсутствии наземной связи»

Как можно видеть из рисунков 27-28, исключение из рассмотрения аэропортов с наличием альтернативной наземной транспортной связи затрагивает только аэропорты, отдалённость которых от столицы региона не превышает 800 км. Следовательно, часть пассажиров, совершающих местные поездки на дальности не более 600-800 км, пользуется неавиационными видами транспорта. Пиковые значения, соответствующие дальностям 800-1000 км и 1200-1400 км, можно отнести к погрешности (указанный выше случай перевозки вахтовых рабочих, наземные перевозки нерегулярного характера и т.д.). Отсюда годовая авиационная подвижность населения на труднодоступных территориях, при отсутствии регулярной наземной связи, составляет ~1,5 полётов в год.

Полученные выводы качественно совпадают с результатами ряда других подобных статистических исследований [77, 78].

Причиной расхождений между приведёнными значениями годовой подвижности населения труднодоступных территорий и, например, средней годовой подвижностью на уровне 0,3-0,5 полётов/(чел.-год), указываемой в ряде некоторых исследований [27, 74], является попадание в анализ части населения, пользующегося наземным транспортом.

Тогда на основе анализа рисунков 27-28 для расчёта авиационной подвижности γ населения труднодоступных территорий в зависимости от отдалённости от регионального центра L может быть введена следующая формула:

$$\gamma = \begin{cases} \frac{L}{400}, & 200 \text{ км} \leq L \leq 600 \text{ км} \\ 1,5, & L > 600 \text{ км} \end{cases} \quad (49)$$

Здесь $\gamma = \gamma(L)$ – это количество полётов на одного человека в год как осреднённое за год значение, приемлемым образом соотносящееся с исходными данными [49]. Графическая интерпретация (49) имеет вид (рисунок 29):

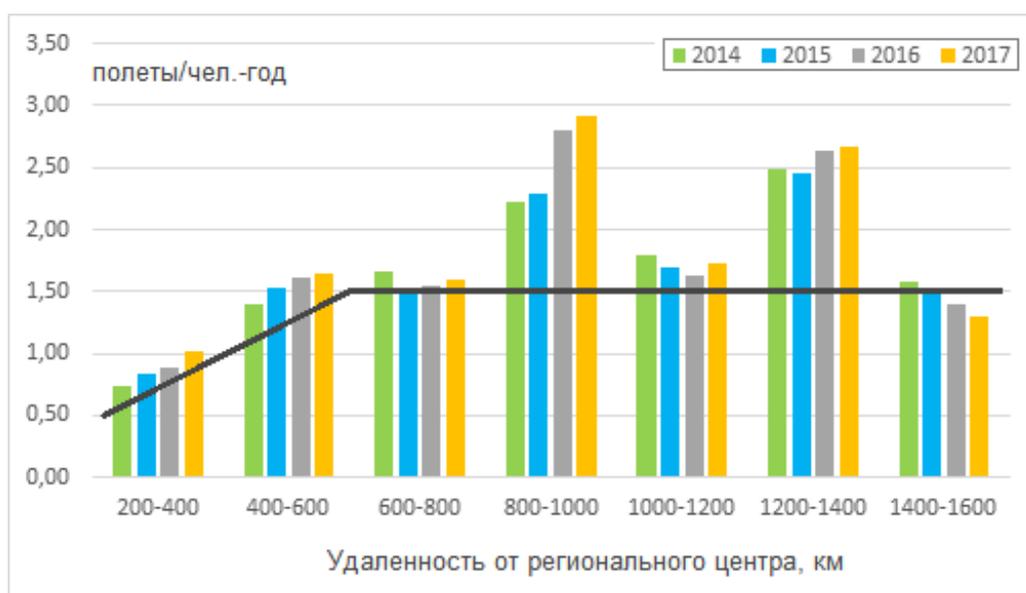


Рисунок 29 – Математическая модель задания годовой подвижности населения:

$$\gamma = \gamma(L) \text{ в соответствии с формулой (49)}$$

Тогда годовое количество пассажиров a_i^Σ в i -ом поселении есть:

$$a_i^\Sigma = \gamma(L_i) \times p_i, \quad \forall i, \quad (50)$$

где L_i – отдалённость поселения от столицы региона;

p_i – количество жителей в i -ом пункте.

Поскольку, как отмечалось выше, задание стандарта $T_{РЕГ}$ фактически означает выбор моделируемого периода перевозок, значения годового пассажиропотока должны быть пересчитаны в моделируемые пассажиропотоки следующим образом:

$$a_i = \left[T_{РЕГ} \times k_{сез} \times \frac{a_i^\Sigma}{365} \right] + 1, \quad \forall i, \quad (51)$$

где $k_{сез}$ – коэффициент сезонности спроса на авиаперевозки.

Добавление единицы к целой части числа в формуле (51) необходимо, поскольку без этого шага в ряде случаев значение a_i может быть нулевым. Введение коэффициента сезонности спроса обусловлено тем, что расчёт парка ВС должен производиться для периода максимального спроса [80].

Согласно статистическим закономерностям, слабо изменяющимся на протяжении десятилетий [52, 68, 80, 93], объёмы перевозок в летние месяцы, в том числе для МВЛ, примерно в 2 раза больше, чем в зимние, отсюда значение $k_{сез}$ в пересчёте целесообразно брать равным 1,33.

Прочие факторы, влияющие на авиационную подвижность, как например:

- конкурентоспособность авиационного транспорта по сравнению с наземным/водным для дальностей 200-800 км;

- зависимость подвижности от вводимых тарифов;

в силу сложности эконометрических проблем, в настоящей работе не рассматриваются.

2.4.4 Прочие модели

Расчёт затрат на строительство и функционирование необходимой аэродромной инфраструктуры производится при следующих предположениях:

- в столичном аэропорте имеется оснащение для эксплуатации ВС любого типа;

- действующим аэропорту МВЛ или посадочной площадке может потребоваться реконструкция, если их характеристики не позволяют принимать соответствующее ВС;

- недействующим аэропорту МВЛ или посадочной площадке может потребоваться восстановление до уровня аэропорта МВЛ минимальной III категории с возможностью принимать соответствующее ВС;

- может потребоваться строительство нового аэропорта МВЛ III категории или новой посадочной площадки;

- любые действующие вертолётные площадки могут принимать вертолёт любого типа;

- может потребоваться строительство новых вертолётных площадок или восстановление старых;

- аэропорт МВЛ на труднодоступных территориях имеет оснащение для базирования любых вертолётов.

Моделирование аэропорта МВЛ как аэропорта III-ей категории связано с тем, что данная категория соответствует годовому пассажиропотоку до 25 тыс. человек. В силу слабой заселённости труднодоступных территорий (рисунок 1), потребность в новых или восстанавливаемых аэропортах I / II-ой категорий отсутствует. Причем результаты предварительного моделирования показали: в тех случаях, когда пассажиропоток может заметно превысить 25 тыс. человек в год, такие аэропорты зачастую уже существуют, и новое строительство не требуется. Следовательно, различием категорий при моделировании аэропортов МВЛ в первом приближении можно пренебречь.

Затраты на любой объект авиационной инфраструктуры q_{ik} , задаваемые в (7), моделировались как сумма текущих затрат на функционирование объекта и амортизационных выплат, равномерно распределённых на период эксплуатации объекта вплоть до капитального ремонта:

$$c_{ik}^{ПП-верт} = \zeta_{ik} \frac{C^{ПП-верт}}{T_{PEC}^{ПП-верт}} + c_t^{ПП-верт}, \quad \forall i, k \in \text{вертолёты}, \quad (52)$$

$$c_{ik}^{АЭРО} = \zeta_{ik} \frac{C_{ik}^{АЭРО}}{T_{PEC}^{АЭРО}} + c_t^{АЭРО}, \quad \forall i, k \in \text{самолёты}, \quad (53)$$

где $C^{ПП-верт}$, $C_{ik}^{АЭРО}$ – стоимости строительства вертолётной площадки и аэропорта МВЛ соответственно;

$T_{PEC}^{ПП-верт}$, $T_{PEC}^{АЭРО}$ – периоды эксплуатации до капитального ремонта вертолётной площадки и аэропорта МВЛ соответственно;

$c_t^{ПП-верт}$, $c_t^{АЭРО}$ – затраты (в единицу времени) на функционирование вертолётной площадки и аэропорта МВЛ соответственно;

ζ_{ik} – бинарная управляющая переменная, принимающая значение «единица», если соответствующий объект инфраструктуры существует в настоящее время, и «ноль», если не существует.

Наличие индексов i, k в $C_{ik}^{АЭРО}$ означает, что если характеристики аэродрома (или посадочной площадки) не позволяют обслуживать ВС k -го типа – производятся необходимые работы по модернизации объекта. При этом, в первом приближении, затраты на эксплуатацию $c_t^{АЭРО}$ не изменяются.

Поскольку содержательной частью настоящей работы является сравнение парков ВС, вводимый подход к моделированию затрат на инфраструктуру, подразумевающий оперирование осреднёнными величинами, следует считать условием сравнения парков ВС. Безусловно, такой подход следует признать отчасти упрощённым, не учитывающим особенности строительства и эксплуатации объектов авиационной инфраструктуры в зависимости от географических и природно-климатических условий региона. И в ряде случаев это может иметь существенное значение для принятия правильных управленческих решений.

С другой стороны, большинство населённых пунктов, в которых для обслуживания МВЛ может потребоваться строительство указанных объектов, находятся на значительном удалении от столицы региона, и для них затраты на строительство и эксплуатацию будут заведомо высокими даже в осреднённом виде. Кроме того, при формировании парка ВС косвенно учитывается, что ВС должны эксплуатироваться в сложных природно-климатических условиях. Это по совокупности позволяет говорить об адекватности получаемых результатов моделирования.

В качестве местоположения новых аэропортов рассматривались географические координаты населённых пунктов в предположении, что новый аэропорт будет непосредственно примыкать к населённому пункту, и расстоянием между ними можно пренебречь.

Затраты на строительство авиационной инфраструктуры были получены на основе сметных расчётов, включающих статьи затрат при строительстве/восстановлении/реконструкции аэропорта МВЛ [8] и стоимости работ [19] с пересчётом в цены моделируемого 2015 года с помощью понижающего коэффициента. С учётом возможного варьирования для ВС k -го типа потребной длины ВПП l_k^{BC} , для новой и восстанавливаемой недействующей инфраструктуры затраты на строительство оценочно составляют [млн. руб.]:

$$C^{ПП-верт} = 50, \quad \zeta_{ik} = 1, \quad \forall i, k \in \text{вертолёты}, \quad (54)$$

$$C_{ik}^{АЭРО} = f_k^{АП} + 0,25 \times l_k^{BC}, \quad \zeta_{ikr} = 1, \quad \forall i, k \in BC, \quad (55)$$

где $f_k^{АП}$ – стоимость строительства объектов служебно-технической территории (СТТ) аэропорта и прочих сооружений, не связанных непосредственно с лётным полем аэродрома, которая, тем не менее, может зависеть от особенностей применения k -го типа ВС (например, при внедрении нового пилотажно-навигационного оборудования). Затраты на строительство вертолётной площадки, полагается, одинаковы независимо от типа применяемого вертолёта.

Формула (55) получена для аэропорта III категории, примерный план которого представлен в Приложении Б [8].

При необходимости реконструкции существующей инфраструктуры, также с учётом варьирования потребной длины ВПП, затраты составляют [млн. рублей]:

$$C_{ik}^{AЭРО} = 0,25 \times (l_k^{BC} - l_i^{AЭРО}), \quad \zeta_{ik} = 0, \quad \forall i, k \in \text{самолёты}. \quad (56)$$

Поскольку в рамках настоящей работы проводились расчёты для ВС без учёта изменений СТТ и прочих сооружений, соответствующие затраты задавались константой [млн. рублей]:

$$f_k^{АП} = 600, \quad k \in \text{самолёты}. \quad (57)$$

Указанное значение $f_k^{АП}$ является минимальной оценкой стоимости в предположениях:

- для аэропортов МВЛ III категории рекомендуется блокировка зданий [8], поэтому считается, что возводится единое служебно-пассажи́рское здание;

- не учитываются стоимости строительства подъездной автодороги и котельной, так как считается, что эти объекты находятся в ведении местных властей;

- строительство водосточно-дренажной системы в аэропортах МВЛ не предусматривается, так как маршрутная сеть МВЛ охватывает преимущественно регионы с вечной мерзлотой, где «водоотвод решается, как правило, путём организации поверхностного стока талых и ливневых вод, ...глубинный дренаж в зонах вечной мерзлоты не применяется» [8].

Для расчёта ресурсов $T_{PEC}^{ПП-верт}$ и $T_{PEC}^{AЭРО}$ в формулах (52)-(53) в первом приближении вводилось предположение, что, независимо от условий эксплуатации, определяющим фактором является срок службы покрытия ВПП и рулёжных дорожек до капитального ремонта, поэтому характерный период времени эксплуатации составляет [20]:

$$T_{PEC}^{ПП-верт} = T_{PEC}^{AЭРО} = 20 \text{ лет}. \quad (58)$$

Вопросы эксплуатации авиационной инфраструктуры в рамках настоящей работы также подробно не рассматриваются. Поскольку считается, что все местные воздушные перевозки осуществляются через аэропорты III-ей категории, то при проведении расчётов используется усреднённое значение годовой стоимости эксплуатации одного аэропорта МВЛ, равное 50 млн. руб./год в ценах 2015 года в соответствии с данными о размере субсидий на содержание федеральных казённых аэропортовых предприятий [90]:

$$c_t^{АЭРО} = 50 \text{ млн.руб./год} . \quad (59)$$

Для вертолётных посадочных площадок текущие затраты оценочно задаются как:

$$c_t^{ПП-верт} = 1 \text{ млн.руб./год} . \quad (60)$$

Поскольку затрагиваемая тема настоящей работы связана с авиацией, моделирование наземных/водных перевозок выполняется упрощённо. В силу наличия в математической задаче (10) ограничения (18) на время поездки, имеет смысл рассматривать только автомобильный транспорт как наиболее быстрый способ поездки в сравнении с остальными видами транспорта. К тому же на труднодоступных территориях железнодорожный и водный виды пассажирского транспорта развиты весьма слабо, а значит, ими можно пренебречь. Таким образом, в качестве вида транспорта, альтернативного авиационному, рассматривается только пригородное автомобильное (автобусное) сообщение. Соответствующая транспортная сеть моделируется связным графом автомобильных дорог на основе информации, собранной из открытых интернет-источников [16].

Скорость движения пригородных автобусов, необходимая для расчёта времени поездки, зависит от многих факторов: от траектории и состояния покрытия дорог до законодательных ограничений и погодных условий движения. В настоящей работе в качестве скорости автоперевозок между i -м и j -м пунктами использовалась средняя скорость V_{ijk}^{ABTO} , рассчитываемая на основе собранных статистических данных как:

$$V_{ijk}^{ABTO} = \begin{cases} V_{\Omega 1}^{ABTO}, & i \in \Omega 1, j \in \Omega 1 \\ \frac{V_{\Omega 1}^{ABTO} + V_{\Omega 2}^{ABTO}}{2} & i \in \Omega 1, j \in \Omega 2 \end{cases}, \quad \forall k \in \text{автомобиль}, \quad (61)$$

где $\Omega 1, \Omega 2$ – соответственно, множества поселений, принадлежащих условно 1-му и 2-му муниципальным образованиям;

$V_{\Omega 1}^{ABTO}$, $V_{\Omega 2}^{ABTO}$ – средние скорости движения автотранспорта в 1-м и 2-м муниципальных образованиях.

Время наземной поездки при расстоянии между пунктами L_{ij}^{ABTO} составляет

$$t_{ij}^{ABTO} = \frac{L_{ij}^{ABTO}}{V_{ijk}^{ABTO}}, \quad \forall k \in \text{автомобиль}. \quad (62)$$

Стоимость перевозки в расчёте на пассажиро-километр задавалась одинаковой для всех регионов:

$$c_{ijk} = L_{ij}^{ABTO} \times x_{ijk} \times \bar{c}_{авто}, \quad \forall k \in \text{автомобиль}, \quad (63)$$

где $\bar{c}_{авто}$ – средний тариф за перевозку одного пассажиро-километра.

Выводы по главе 2.

Сложность решения задач формирования парка транспортных средств (в т.ч. парка ВС) обусловлена большой размерностью транспортных систем, частью которых является искомый парк. Наиболее комплексным подходом в данном случае является рассмотрение динамики развития парка ВС с учётом наземных перевозок в рамках соответствующих задач математического программирования. В то же время, в целях создания методики расчёта парка ВС для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий страны, предложен подход, основой которого является решение сбалансированной транспортной задачи в статической постановке. Дано обоснование, почему рассмотрение статической внутрирегиональной транспортной системы позволяет получить адекватное решение для случая ВС МВЛ. При этом даже с учётом введённых допущений и упрощений, отмечается невозможность нахождения оптимального

решения и необходимость выработки алгоритма поиска рационального решения сформулированной задачи.

Дана формализация критериев транспортной доступности труднодоступных территорий страны. В качестве основных выбраны частота рейсов МВЛ и техническое суммарное время местной поездки, а в качестве оптимизируемого критерия вводится, как свёртка критериев, т.н. эффективность обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий как отношения результатов деятельности (объёмов авиаперевозок) к затраченным ресурсам, обусловившим этот результат. Для расчёта элементов внутрирегиональной транспортной системы, выбраны и адаптированы модели расчета объёмов пассажирских перевозок, времени и стоимости перелёта ВС, затрат на содержание инфраструктуры и др.

ГЛАВА 3 АЛГОРИТМ МЕТОДИКИ ВЫБОРА ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ СТРАНЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Основную часть методики выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны составляет блок, связанный с решением задачи (10) оптимизации внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок.

Решение задачи (10), в силу нелинейности критерия (11), является достаточно сложной процедурой: задачи о транспортных системах характеризуются негладкой, многоэкстремальной целевой функцией [72]. И универсальных, тем более аналитических методов решения подобных нелинейных оптимизационных задач не существует, в т.ч. с применением современных математических методов [35, 36, 72].

Также в рассматриваемом случае местных перевозок решение не может быть найдено методом полного перебора. В данном случае сложность (время) решения задачи растёт экспоненциально количеству пунктов отправления. Если учесть, что в состав Республики Саха (Якутия) входит более 400 поселений (как пунктов отправления), можно сделать однозначный вывод о недостаточности вычислительных мощностей имеющейся в распоряжении вычислительной техники для проведения подобных расчетов.

Следовательно, решение задачи (10) может быть найдено лишь приближённо при некоторых дополнительных допущениях, с учётом которых и будет выработан соответствующий алгоритм.

3.1 Предварительная оценка эффективности обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны с применением современных воздушных судов

В целях упрощения сформированной математической задачи (10), было выполнено предварительное моделирование местных воздушных перевозок и расчёт уровня обеспечения транспортной доступности W в зависимости от вводимого ограничения $T_{МАРШ}$ и выбора парка ВС [54].

В соответствии с особенностями спроса на местные воздушные перевозки (рисунки 9, 11), рассматривалась маршрутная сеть, в которой между столичным аэропортом и региональными аэропортами МВЛ организуются беспосадочные рейсы с применением только самолётов. Считалось, что на каждый труднодоступный административный район должна приходиться одна авиалиния от административного центра этого района до столицы региона. Время на совершение наземного этапа поездки, т.е. от аэропортов до населённых пунктов, не учитывалось.

Рассматривались два варианта парка ВС:

- 3-типовой на основе самолётов L-410UVP, «Рысачок» и М-101 «Гжель»;
- 4-типовой на основе тех же ВС и с добавлением самолёта РС-12.

Результаты расчёта W в зависимости от $T_{МАРШ}$ и выбора парка ВС представлены на рисунке 30:

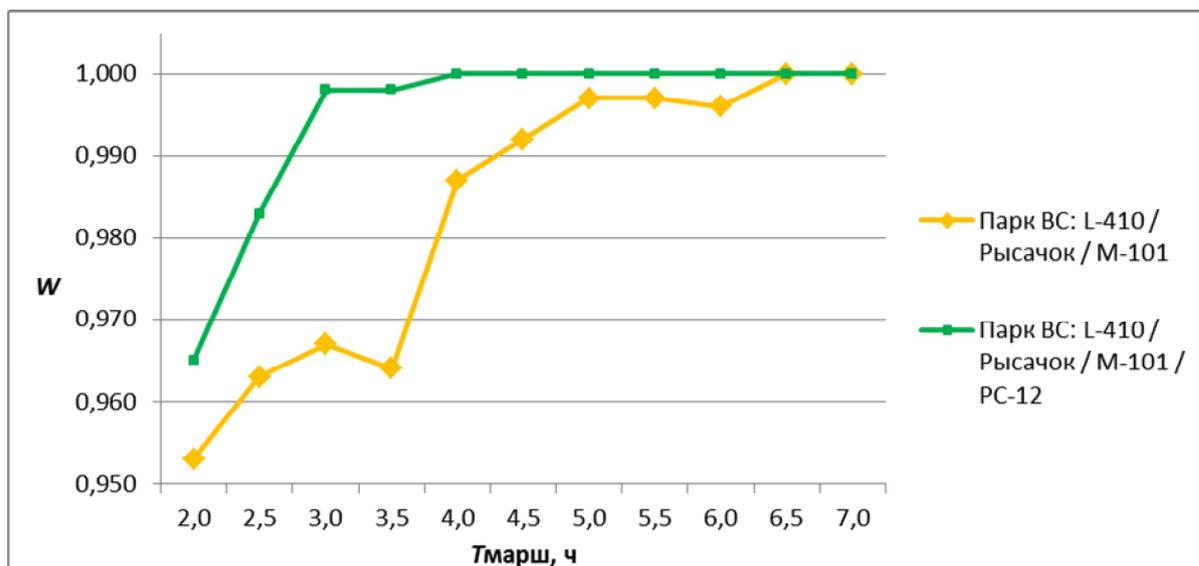


Рисунок 30 – Уровень обеспечения транспортной доступности в зависимости от ограничения на суммарное время местной поездки и выбора парка ВС

Как следует из рисунка 30, если парк ВС формируется на основе самолётов, применявшихся или планировавшихся к применению на МВЛ (другими словами, при существующем уровне технического совершенства самолётов), местные воздушные перевозки могут эффективно выполняться и с учётом жёсткого ограничения на суммарное время поездки. Кроме того, применение скоростного РС-12 (крейсерская скорость – 480 км/ч [15]) приводит к повышению уровня обеспечения транспортной доступности вплоть до единицы при ограничении на время местной поездки $T_{МАРШ} \leq 3$ ч.

Следовательно, при наличии в парке современных ВС, введённый критерий эффективности обеспечения транспортной доступности будет зависеть только от объёмов потраченных ресурсов, т.е. от суммарной стоимости перевозок. Это позволяет упростить решение задачи (10): максимум критерия E будет соответствовать минимуму затрат на местные перевозки, что будет учитываться при выработке дальнейших этапов искомого алгоритма.

3.2 Выделение локальных авиатранспортных подсистем

Допущение, связанное с моделированием неавиационного транспорта только как автомобильного, позволяет сделать следующий шаг, также значительно упрощающий алгоритм поиска решения задачи (10).

В существующих условиях тариф за перевозку одного пассажиро-километра $\bar{C}_{авто}$ оценивается в $1 \div 2$ руб./пкм [34, 41]. В то же время, как уже указывалось выше, уровень затрат на местные воздушные перевозки составляет $17 \div 42$ руб./пкм [89]. Отсюда, в силу разрыва стоимостей на порядок величин, следует, что автомобильный транспорт будет предпочтительным во всех случаях, когда выполняется требование (18) к суммарному времени местной поездки $T_{МАРШ}$.

Тогда территория региона может быть разделена на две части:

- ближнюю к столице региона (окружающую её), где возможна организация наземного пригородного сообщения с выполнением ограничения $T_{МАРШ}$;
- дальнюю, где для соблюдения $T_{МАРШ}$ необходимо наличие аэродромов, через которые посредством воздушного транспорта будет осуществляться перевозка пассажиров (рисунок 31).

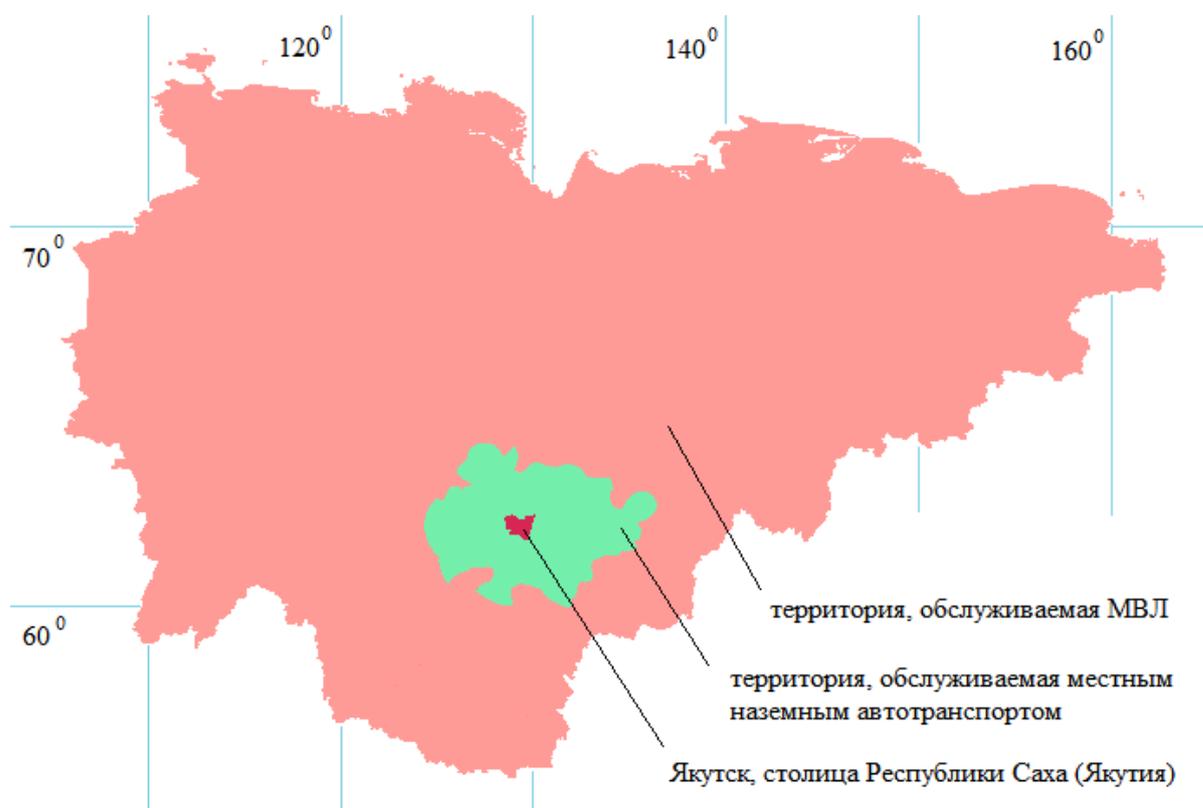


Рисунок 31 – Моделирование разбиения территории Республики Саха (Якутия) на части, обслуживаемые различными транспортными подсистемами местных перевозок при заданном ограничении $T_{МАРШ}$

Ближняя территория разбиения не представляет интереса с точки зрения расчёта парка ВС МВЛ, так как при заданных $T_{МАРШ}$, L_{ij}^{ABTO} и V_{ijk}^{ABTO} граница разбиения внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок на две подсистемы будет фиксированной. Отсюда искомое решение будет означать выбор парка ВС для обеспечения транспортной доступности тех территорий (как труднодоступных), которые на примере рисунка 31 закрашены красным цветом.

В силу убывания плотности населения (рисунок 1), существенная часть поселений попадает на ближнюю территорию, охватываемую наземными местными перевозками (на рисунке 31 закрашена зеленым). Тем не менее, количество поселений на территории, обслуживаемой МВЛ, составляет 230-300 штук в зависимости от задаваемого значения $T_{МАРШ}$. В схематической форме искомая маршрутная сеть транспортной системы, охватывающей труднодоступные территории, будет иметь вид (рисунок 32):

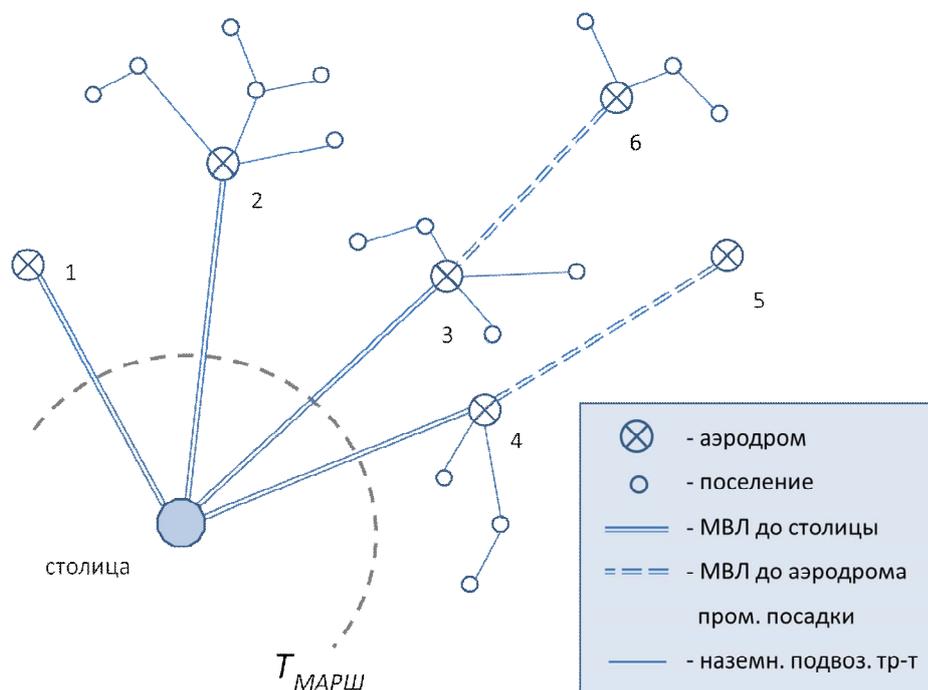


Рисунок 32 – Структура искомой транспортной системы, охватывающей труднодоступные территории региона

В искомом решении рисунка 32 один аэропорт МВЛ может обслуживать как одно поселение (аэродром 1), так и группу поселений (аэродром 2) с

задействованием наземного транспорта, называемого далее подвозящим, если он предназначен для перевозки пассажиров между поселениями и аэропортом МВЛ. При этом перевозки из некоторых районов могут осуществляться с промежуточными посадками на аэродромах 3-4 и, по аналогии с аэродромами 1-2, с соответствием одному поселению (аэродром 5) или нескольким поселениям (аэродром 6). В дальнейшем, аэродромы 1-4 будут условно называться аэродромами «первой зоны», а аэродромы 5-6 – «второй зоны».

Выделим ключевой логический шаг, позволяющий найти начальное приближение для искомого решения рисунка 32, несмотря на большую размерность задачи. Для этого рассмотрим пару пунктов отправления А и В, между которыми имеется автотранспортная связь (рисунок 33):

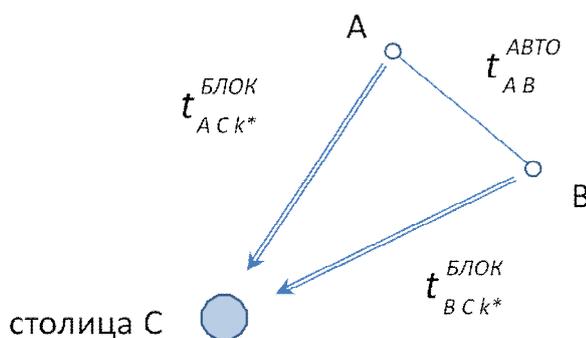


Рисунок 33 – Схема возможных транспортных связей для пунктов отправления, охватываемых АТС МВЛ

Предположим, что один из этих пунктов или оба одновременно могут быть выбраны как пункт отправления «первой зоны» для осуществления прямой перевозки пассажиров посредством наиболее скоростного ВС типа k^* . Тогда, если выполняется условие

$$\min(t_{ACk^*}^{БЛОК}, t_{BCk^*}^{БЛОК}) + t_{AB}^{АВТО} \geq T_{МАРШ}, \quad (64)$$

то это означает, что независимо от выбора А или В в качестве аэродрома, автотранспортная связь «А-В» не может быть частью решения. Следовательно, соответствующее ребро может быть исключено из графа наземных транспортных связей.

Для любого же пункта отправления, принадлежащего «второй зоне», условие (64) заведомо выполняется, так как перелёт из него в аэропорт столицы региона C будет выполняться не по ортодромии, а значит, время перелёта будет больше.

Как результат, после исключения из рассмотрения наземных связей, соответствующих условию (64), граф (суперграф) наземных транспортных связей на территории региона распадается на множество связанных подграфов (рисунок 34):

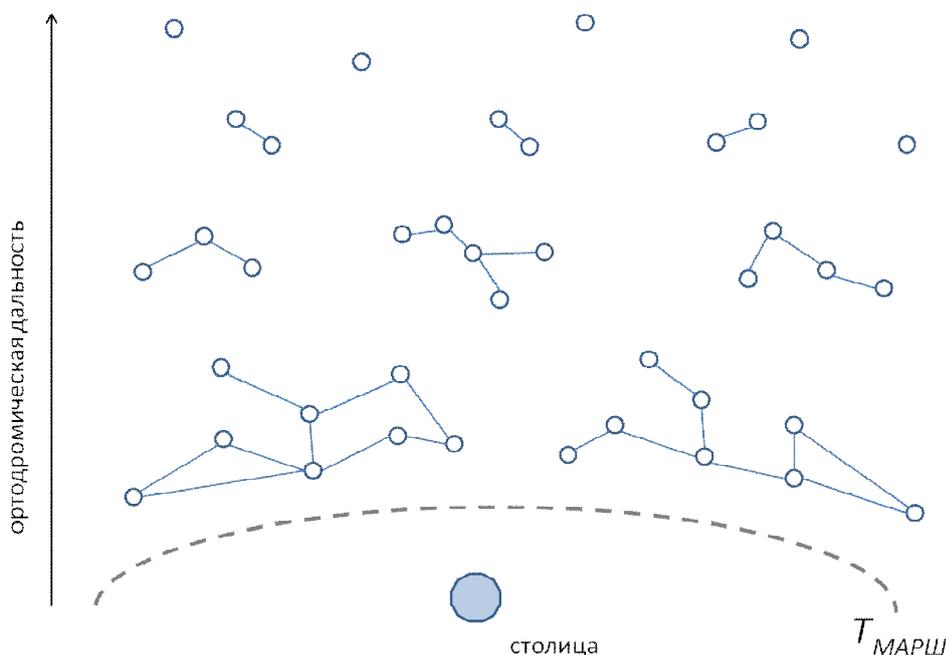


Рисунок 34 – Разбиение графа наземных транспортных связей на множество подграфов

В дальнейшем совокупность наземных транспортных связей, авиалиний и аэропортов, соответствующую каждому из полученных подграфов, будем называть транспортной подсистемой или просто подсистемой.

Характерными особенностями данного разбиения, при росте отдалённости от столицы региона (как ортодромической дальности), в терминах теории графов [58] являются:

- уменьшение порядка подграфа (количества вершин, соответствующих пунктам отправления) вплоть до появления тривиальных графов, т.е. обособленных пунктов отправления;

- уменьшение максимального веса рёбер подграфов (максимальных расстояний автодорог между связанными пунктами отправления в подграфе);

- уменьшение численности населения и, как следствие, количества пассажиров, соответствующих одному связному подграфу как транспортной подсистеме.

Следует отметить, что теоретически возможно возникновение ситуаций (при равномерном распределении пунктов отправления и большом количестве связей, при высокой крейсерской скорости ВС и условно большом значении $T_{МАРШ}$), когда полученный по итогам разбиения «ближайший к столице» подграф будет сохранять достаточно большой порядок. Размерность подзадачи, сформулированной для такого подграфа, может стать препятствием при поиске решения методом полного перебора за разумное конечное время. Подобная ситуация характерна, например, для Иркутской области, и возможность её возникновения должна учитываться при разработке алгоритма решения задачи (10).

Как выход, в данной ситуации возможно экспертное разбиение графа с учётом карты местности, где расположена транспортная сеть [81]: например, исключая автодороги с мостами через большие реки или пересекающие границы муниципальных образований с заведомо большим расстоянием между соседними поселениями. Подобное разбиение будет сугубо субъективным, неоптимальным. Однако разработанные на данный момент методы, в том числе строгие математические, «не гарантируют оптимального разбиения транспортной сети на районы» [81]. Следовательно, с учётом погрешности моделирования и при условии, что количество экспертно исключаемых связей мало (затрагивает отдельные подграфы), данный шаг может считаться приемлемым.

По факту проводившихся в рамках настоящей работы расчётов для случая Республики Саха (Якутия) указанная ситуация не возникала. Применение

процедуры удаления наземных транспортных связей по правилу (64) даже при $T_{МАРШ} = 12$ ч приводило к разбиению графа наземных транспортных связей на подграфы, каждый из которых включал небольшое количество вершин, что позволяло выполнить локальную оптимизацию для полученных обособленных транспортных подсистем в т.ч. методом полного перебора. Однако, с учётом вышеприведённого примера Иркутской области, для того чтобы искомый алгоритм мог быть применён для любого региона, в настоящей работе предлагается другой метод оптимизации подсистем (см. следующий раздел).

Вместе с тем следует отметить, что решение каждой из указанных задач оптимизации транспортных подсистем не приводит в сумме к нахождению оптимального решения задачи (10), т.е. для транспортной системы в целом. Причиной является возможность перелётов из «второй зоны» в «первую зону», что, безусловно, влияет на искомый набор авиалиний и аэропортов (рисунок 32). Отсюда в настоящей работе в качестве дальнейших шагов алгоритма поиска решения предлагаются следующие.

В общем случае, задача разделения подсистем на зоны является комбинаторной и не имеет строгого решения, поскольку, например, для такого крупного региона, как республика Саха (Якутия), количество подсистем составляет более 100. В первом приближении, взаиморасположение зон в искомом решении может быть выявлено посредством логического анализа предметной стороны настоящего исследования.

Во-первых, при некотором заданном расположении аэродромов и заданном количестве пассажиров минимум затрат на перевозку достигается при минимуме суммарного количества рейсов. Уменьшение же количества рейсов происходит при увеличении заполняемости салонов ВС.

Во-вторых, выполнение перевозок между аэропортами «первой» и «второй» зон имеет смысл, если при их отсутствии беспосадочные рейсы из аэропортов «первой зоны» в столичный аэропорт производятся с неполной заполняемостью салона. В этом случае перелёт между аэропортами «первой» и «второй зоны», как дополнительный этап рейса, позволяет повысить заполняемость салона исходного

беспосадочного рейса из аэропорта «первой зоны» в столичный аэропорт и не совершать отдельный беспосадочный рейс между столичным аэропортом и аэропортом «второй зоны», что в сумме приводит к снижению затрат.

В-третьих, при фиксированной дальности рейса, стоимость рейса ВС уменьшается при уменьшении заполняемости салона.

В-четвёртых, с ростом отдалённости от столичного аэропорта плотность населения (рисунок 1) падает быстрее, чем растёт авиационная подвижность населения (рисунок 29). Следовательно, с ростом отдалённости аэропорта количество пассажиров, перевозимых через него (как количество пассажиров на охватываемой площади), оценочно будет уменьшаться.

Из указанных факторов следует, что наиболее загруженные рейсы (как наиболее затратные) должны быть наиболее короткими, а значит, «первая зона» соответствует наиболее близким к столице и наиболее крупным по количеству отправляемых пассажиров подсистемам рисунка 34. Эти подсистемы «первой зоны» обеспечивают основной вклад (более 50%) в заполняемость салонов при выполнении рейсов с промежуточной посадкой. Соответственно, во «вторую зону» попадут небольшие, но более отдалённые подсистемы, обеспечивающие меньший вклад в заполняемость салонов (менее 50%).

Если бы это было не так, то наиболее загруженные рейсы выполнялись бы из более отдалённых подсистем, а значит, с большими затратами. При этом и промежуточные этапы рейсов между зонами стали бы более затратными, так как они выполнялись бы в «обратную» сторону, то есть, допустим (см. рисунок 32), из аэропорта 3 в аэропорт 6 и далее в столицу, а не как показано – из 6 в 3 и далее в столицу. В сумме это привело бы к росту пассажиропотока на линии между аэропортами 3 и 6 и соответствующему росту затрат. В результате суммарные затраты на перевозку пассажиров увеличились бы.

Приведённые качественные выводы о закономерности формирования рейсов МВЛ с промежуточными посадками совпадают с результатами анализа рисунка 12: аэродромы промежуточных посадок в среднем находятся ближе к

столичному аэропорту, чем отдалённые аэропорты без прямого беспосадочного авиасообщения со столицей.

Отсюда искомое решение (рисунок 32) будет соответствовать некоторому разбиению транспортных подсистем на две группы, соответствующие «первой зоне» как ближней и «второй зоне» как дальней. При этом в подсистемах «второй» зоны, по аналогии с правилом (64), в искомое решение не попадут наземные связи «А-В», подчиняющие условию:

$$\min(t_{ADk*}^{БЛОК}, t_{BDk*}^{БЛОК}) + t_{Dk*}^{ПРОМ} + t_{Dck*}^{БЛОК} + t_{AB}^{АВТО} \geq T_{МАРШ}, \quad (65)$$

где D – аэродром промежуточной посадки в «первой зоне», соответствующий минимально возможному времени перелёта из А и В в С с обязательной промежуточной посадкой;

$t_{Dk*}^{ПРОМ}$ – время задержки рейса, вызванное промежуточной посадкой и связанное с посадкой/высадкой пассажиров, возможной дозаправкой и т.д.

Другими словами, применение правила (65) приводит к разбиению подсистем, попавших во «вторую зону», на ещё большее количество подсистем по сравнению с их разбиением, как если бы они принадлежали «первой зоне».

Таким образом, в обобщённом виде дальнейшие шаги алгоритма поиска сети МВЛ могут быть следующими:

- задаётся исходное разбиение, в котором все транспортные подсистемы включаются в «первую зону», для каждой из них рассчитываются оптимальные структура сети МВЛ и затраты, а затем и суммарные затраты по всем подсистемам;

- наиболее отдалённая транспортная подсистема «первой зоны» (отдалённость подсистемы может задаваться как среднее расстояние между входящими в неё пунктами отправления и столицей) переводится во «вторую зону», для неё производится уменьшение количества связей по правилу (65), далее для всех полученных подсистем «второй зоны» производится поиск маршрутной сети с выбором аэродромов промежуточной посадки;

- процедура, указанная в предыдущем пункте, повторяется до тех пор, пока в «первой зоне» не останется одна подсистема, и если при некотором очередном выполнении процедуры достигается снижение затрат – найденная структура запоминается как лучшее решение.

3.3 Поиск рациональной структуры локальных авиатранспортных подсистем

Покажем, что в каждой из полученных подсистем искомое решение не обязательно будет соответствовать минимальному количеству входящих в эту подсистему используемых аэропортов.

Пусть в любой из подсистем рисунка 34 имеется некоторое множество аэропортов отправления в количестве N_A . Общее количество пассажиров в этой подсистеме – постоянно, и для их перевозки при заданном N_A требуется n^+ штук рейсов с 100%-ой заполняемостью салона и n^- штук рейсов – с неполной заполняемостью. Тогда можно утверждать, что добавление в подсистему дополнительного аэропорта (с увеличением затрат на аэропорты) целесообразно только при одновременном уменьшении количества рейсов (при уменьшении затрат на выполнение рейсов) на величину k^- , $n^- \geq k^- \geq 1$. Последнее возможно при объединении нескольких рейсов с неполной заполняемостью салона в один рейс с заполняемостью салона, близкой к 100%. Пусть, для простоты рассуждений, отдалённости рассматриваемых аэропортов от столичного аэропорта попадают в некоторый диапазон дальностей, в котором коммерческая нагрузка самолёта (рисунок 8) изменяется слабо. Иначе говоря, количество рейсов не зависит от географического местоположения подсистемы, и могут быть введены средние стоимости рейсов $C_{РЕЙС}^+$ и $C_{РЕЙС}^-$ – при 100%-ой и неполной заполняемости салона, соответственно. Тогда добавление нового аэропорта выгодно при выполнении условия:

$$N_A C_{АЭРО}^t + n^+ C_{РЕЙС}^+ + n^- C_{РЕЙС}^- \geq (N_A + 1) C_{АЭРО}^t + (n^+ + 1) C_{РЕЙС}^+ + (n^- - k^-) C_{РЕЙС}^- , \quad (66)$$

где $C_{АЭРО}^t$ – затраты на один аэропорт (за период времени, в который совершаются рейсы). Отсюда

$$k^- \geq \frac{C_{АЭРО}^t + C_{РЕЙС}^+}{C_{РЕЙС}^-} . \quad (67)$$

Тогда, поскольку $C_{РЕЙС}^+ \geq C_{РЕЙС}^-$, то

$$k^- \geq \frac{C_{АЭРО}^t}{C_{РЕЙС}^-} + 1 . \quad (68)$$

При регулярности перевозок порядка одного рейса в сутки (что является, как отмечалось выше, условием для перспективной АТС МВЛ) и с учётом (59), $C_{АЭРО}^t \approx 137$ тыс. рублей. Для существующих самолётов МВЛ пассажироместимостью 9-19 мест, при уровне затрат 190÷460 руб./т-км [89], стоимости рейсов при достаточно большом N_A составляют 50÷120 тыс. рублей. Тогда при таких значениях величин неравенство (68) соответствует

$$k^- \geq 3 . \quad (69)$$

Другими словами, полученное условие (69) означает необходимость применения следующего алгоритма поиска структуры рассматриваемой подсистемы. Пусть найдено минимальное количество аэропортов, через которые все пассажиры подсистемы перевозятся рейсами МВЛ. Тогда если существуют как минимум три рейса, пассажиры которых могут быть объединены в один рейс с учётом заполняемости салона для одного из типов ВС – целесообразен дальнейший поиск структуры подсистемы с добавлением в систему при каждом шаге итерации ещё одного аэропорта до того момента, пока условие (69) не перестанет выполняться.

Данное правило является не универсальным для задач, в которых функция затрат аналогична (12), а частным, и следует из сравнения (66) фактических затрат на содержание авиационной инфраструктуры и стоимости выполнения рейсов.

Искомое решение имеет вид, аналогичный аэродромам 1-4 рисунка 32, с той лишь разницей, что все аэропорты входят в состав одной подсистемы «первой зоны».

В последующем для простоты будем обозначать термином «охват» долю населённых пунктов региона (в процентах), для которых при организации местных перевозок выполняется условие для $T_{МАРШ}$.

В настоящей работе предлагается решение задачи оптимизации подсистемы «первой зоны» в следующей последовательности.

1) Поиск в подсистеме минимального количества аэропортов $N_{A \min}$, при котором достигается 100%-ый охват принадлежащих подсистеме N_1 штук пунктов отправления с использованием наиболее скоростного ВС:

$$W_0^{(1)} = \arg \min_{W^{(1)}} N_{A \min} , \quad (70)$$

$$N_{A \min} = \sum_{n=1}^{N_1} w_n^{(1)} , \quad (71)$$

$$W^{(1)} = \{w_n^{(1)}\}, \quad n = 1, \dots, N_1 , \quad (72)$$

$$w_n^{(1)} = \begin{cases} \{0, 1\}, & \forall n = 1, \dots, N_1, n \notin \text{дейст. аэропорты} \\ 1, & \forall n = 1, \dots, N_1, n \in \text{дейст. аэропорты} \end{cases} , \quad (73)$$

$$t_{nC^*k^*}^{\text{БЛОК}} + t_{in}^{\text{АВТО}} \leq T_{МАРШ}, \quad \forall n = 1, \dots, N_1, \forall i = 1, \dots, N_1 . \quad (74)$$

$$\sum_{n=1}^{N_1} w_n^{(1)} \left(t_{nC^*k^*}^{\text{БЛОК}} + t_{in}^{\text{АВТО}} \right) > 0, \quad \forall i = 1, \dots, N_1 . \quad (75)$$

Задача относится к классу задач о покрытии множества [31]. Искомый набор булевских управляющих переменных $w_n^{(1)}$ в (72) задаёт расположение аэропортов – им соответствуют ненулевые переменные (73). Для случая действующих аэропортов переменная $w_n^{(1)}$ будет всегда равна единице, превращаясь тем самым в константу, но, во избежание усложнения записи задачи, здесь и далее для удобства будет включаться в набор переменных. Условие (74) задаёт необходимость соблюдения ограничения на время местной поездки, а

условие (75) – необходимость охвата всех пунктов отправления. Индекс C^* в данном случае соответствует столичному аэропорту.

Поиск решения производится итерационно методом покоординатного градиентного спуска в пространстве размерности N_I сеточной функции $N_{A \min}$, зависящей от вектора $W_1^{(l)}$ ненулевых управляющих переменных $w_n^{(l)}$.

Итерации производятся следующим образом. Сначала производится проверка возможности 100% охвата подсистемы n_A действующими аэропортами, принадлежащими этой подсистеме ($N_{A \min} = n_A$): с точки зрения минимизации затрат, возможность организации воздушных перевозок с применением только существующих аэропортов является более выгодным решением, чем необходимость строительства дополнительных аэропортов.

Если на предыдущем шаге не достигается 100% охват подсистемы, то в вектор $W_1^{(l)}$ добавляется дополнительная переменная $w_n^{(l)}$ ($N_{A \min} = n_A + 1$, один новый аэропорт в подсистеме), и для неё находится такое положение аэропорта, при котором охватывается максимальное количество пунктов отправления. Если не удастся охватить все пункты отправления – размерность вектора $W_1^{(l)}$ снова увеличивается на единицу ($N_{A \min} = n_A + 2$, два новых аэропорта), и снова выполняется поиск расположения новых аэропортов, и так далее до тех пор, пока не будет достигнут 100%-ый охват пунктов отправления. По достижении этого охвата поиск прекращается, а размерность вектора $W_1^{(l)}$ и будет искомым $N_{A \min}$.

Другими словами, поиск $N_{A \min}$ проводится через последовательное решение задач о частичном покрытии до тех пор, пока не будет достигнуто полное покрытие. Данный шаг приемлем, если количество пунктов отправления больше 20, а количество искомым аэропортов больше 10 [31], что в общем случае (на примере Иркутской области) соблюдается.

2) Поиск оптимального расположения $N_{A \min}$ штук аэропортов, при котором достигается минимум затрат на перевозку пассажиров прямыми рейсами самолётов.

$$V_0^{(1)} = \arg \min_{V^{(1)}} \left(\sum_{n=1}^{N_1} \left(w_n^{(1)} \sum_{k \in BC} v_{nk}^{(1)} c_{nC^*k} (x_n) + \sum_{i=1}^{N_1} g_i(w_n^{(1)}) c_{ink_A} \right) + \sum_{n=1}^{N_1} w_n^{(1)} \sum_{k \in BC} v_{nk}^{(1)} c_{nk}^{AЭРО} \right), \quad (76)$$

$$V^{(1)} = \{w_n^{(1)}, v_{nk}^{(1)}\}, \quad \forall n = 1, \dots, N_1, k \in \text{самолёты}, \quad (77)$$

$$w_n^{(1)} = \begin{cases} \{0, 1\}, & \forall n = 1, \dots, N_1, n \notin \text{дейст. аэропорты} \\ 1, & \forall n = 1, \dots, N_1, n \in \text{дейст. аэропорты} \end{cases}, \quad (78)$$

$$\sum_{n=1}^{N_1} w_n^{(1)} = N_{A \min}, \quad (79)$$

$$v_{nk}^{(1)} = \{0, 1\}, \quad \forall n = 1, \dots, N_1, k \in \text{самолёты}, \quad (80)$$

$$\sum_k v_{nk}^{(1)} = 1, \quad \forall n = 1, \dots, N_1, k \in \text{самолёты}, \quad (81)$$

$$x_n = \sum_{i=1}^{N_1} g_i(w_n^{(1)}) a_i, \quad \forall n = 1, \dots, N_1, \quad (82)$$

$$g_i(w_n^{(1)}) = \begin{cases} 1, & i = \arg \min_{w_n^{(1)}=1} (L_{in}^{ABTO}) \\ 0, & i \neq \arg \min_{w_n^{(1)}=1} (L_{in}^{ABTO}) \end{cases}, \quad \forall i = 1, \dots, N_1, \quad (83)$$

$$t_{nC^*k}^{БЛОК} + t_{in}^{ABTO} \leq T_{МАРШ}, \quad \forall n = 1, \dots, N_1, \forall i = 1, \dots, N_1. \quad (84)$$

Суммарные затраты в подсистеме в (76) складываются из затрат на перелёты, на перевозки подвозящим автотранспортом и на функционирование аэропортов.

Искомый набор булевских управляющих переменных в (77) задаёт расположение $N_{A \min}$ штук аэропортов, как ненулевые переменные $w_n^{(1)}$ (формулы (78)-(79)), и типы ВС, с использованием которых совершаются рейсы в аэропорты МВЛ, как ненулевые переменные $v_{nk}^{(1)}$ в (80), причем один n -ый аэропорт может обслуживаться только одним типом k -го ВС (81).

Выражение (82) означает суммирование пассажиропотоков в аэропортах для расчёта стоимости рейсов. Функция g_i задаёт для каждого i -го пункта отправления ближайший аэропорт, через который осуществляются авиаперевозки, в (83). Данное условие вводится эмпирически для облегчения поиска решения: обслуживание пассажиров через ближайший аэропорт формально кажется очевидным, так как это приводит к уменьшению затрат на наземную перевозку пассажиров. Кроме того, предполагается, что поведение пассажиров рационально, поскольку они стремятся совершать поездки наиболее выгодным с их точки зрения маршрутом, т.е. через ближайшие аэропорты [31]. С другой стороны, введение (83) не гарантирует нахождения оптимума затрат, поскольку возможны ситуации, при которых поездка пассажиров из некоторого i -го пункта не через ближайший аэропорт приводит к уменьшению общих затрат в системе.

Условие (84) задаёт необходимость соблюдения ограничения на время местной поездки.

Поиск решения производится итерационно методом покоординатного градиентного спуска в пространстве размерности $N_I \times (k_{BC} + 1)$ (где k_{BC} – количество рассматриваемых самолётов) сеточной функции в выражении (76), зависящей от вектора $V^{(l)}$ ненулевых управляющих переменных $w_n^{(l)}$ (N_I штук) и $v_{nk}^{(l)}$ ($N_I \times k_{BC}$ штук).

3) Проверка, с учётом заполняемости салона ВС, условия (69), и в случае его выполнения – повторение процедуры предыдущего пункта, каждый с увеличением $N_{A \min}$ на единицу до тех пор, пока условие (69) не перестанет выполняться. А именно: для каждого рассматриваемого ВС k -го типа рассчитывается количество перевозимых (в столицу) за один рейс пассажиров $\xi_{nk}^{(1)}$ по всем аэропортам, где найдены ненулевые $w_n^{(l)}$ и $v_{nk}^{(l)}$ в $V_0^{(l)}$ с учётом (9):

$$\xi_{nk}^{(1)} = \left\lfloor \frac{x_n}{z_k(L_{nC}^*)} \right\rfloor, \quad (85)$$

Если существуют как минимум три таких аэропорта n_1, n_2, n_3 , для которых выполняется условие:

$$\xi_{n_1 k}^{(1)} + \xi_{n_2 k}^{(1)} + \xi_{n_3 k}^{(1)} \leq z_k(L_{n_1 C^*}) \cong z_k(L_{n_2 C^*}) \cong z_k(L_{n_3 C^*}), \quad k \in \text{самолёты}, \quad (86)$$

то процедура п. 2) должна быть повторена с увеличением $N_{A \min}$ на единицу. При этом, если на некотором шаге по выполнении процедуры п. 2) происходит снижение затрат – соответствующее решение запоминается как наилучшее для подсистемы.

Структура алгоритма 1)-3) представлена на рисунке 35:

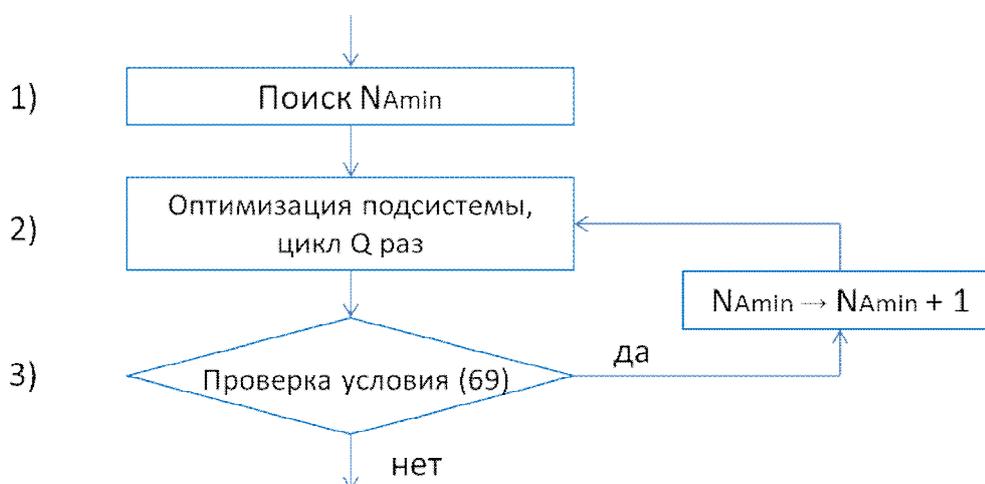


Рисунок 35 – Алгоритм поиска структуры подсистемы «первой зоны»

При этом следует отметить следующее. Поскольку целевые функции в транспортных задачах математического программирования имеют сложный многоэкстремальный вид, выбор начального приближения при реализации градиентного спуска имеет существенное значение. Отсюда, с целью снижения вероятности попадания в локальный экстремум, а также нивелирования погрешности компьютерных вычислений, процедура этапа 2) должна быть выполнена $Q = Q_1$ раз, $Q_1 > 1$, для различных начальных расстановок $N_{A \min}$ штук аэропортов.

Для оценки достаточного количества итераций Q_1 был реализован поиск решения задачи (76)-(84) методом градиентного спуска для крупной подсистемы «первой зоны» как тестовой выборки, состоящей из ~220 пунктов отправления.

Задавалось 100 случайных начальных вариантов расстановки аэропортов ($13 \leq N_{A \min} \leq 15$), и для каждого варианта градиентный спуск реализовывался 100 раз. Для этой тестовой выборки сходимость процесса поиска решения задачи (76)-(84), например, при количестве типов самолётов в парке ВС не более трёх, показана на рисунке 36:

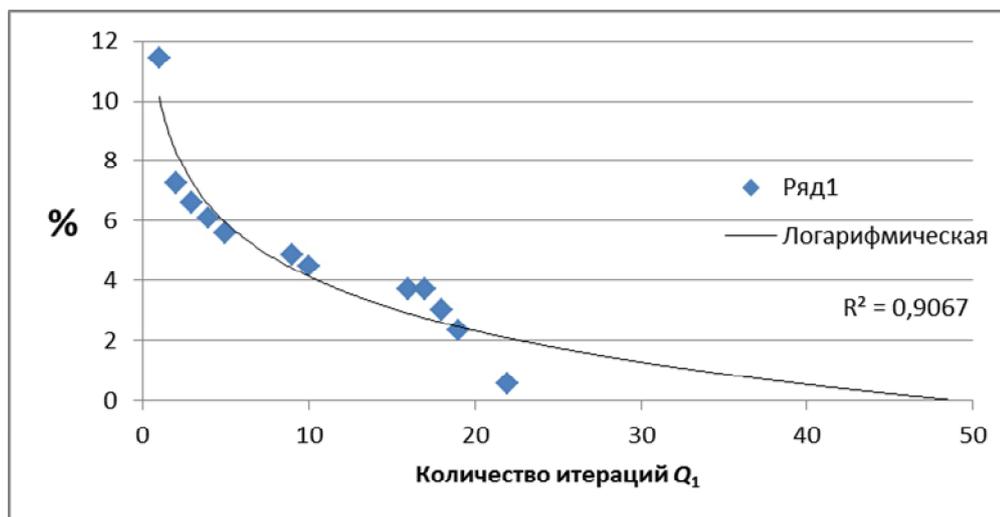


Рисунок 36 – Улучшение решения для тестовой подсистемы «первой зоны» в зависимости от количества итераций

Результаты, представленные на рисунке 36, трактуются следующим образом: если наилучшее решение найдено, например, после 10 итераций, то, какое бы количество итераций ни было выполнено после этого, вновь найденное наилучшее решение будет лучше уже имеющегося не более чем на 4%.

Таким образом, результаты оптимизации тестовой выборки позволяют, при количестве типов самолётов в парке не более трёх, ограничить $Q_1 < 50$ и сформулировать следующую оценку достоверности решения. По завершении выполнения алгоритма рисунка 35, с учётом выполнения процедуры этапа 2) в цикле 50 раз, затраты для рассматриваемой локальной подсистемы «первой зоны» будут соответствовать минимуму (выражение в скобках (82)) с точностью до 1%.

В произвольном случае, при k -типовом парке самолётов, темпы сходимости решения ухудшаются. Тогда, в целях сохранения точности, количество итераций Q_1 должно быть увеличено. Данное обстоятельство также является

одной из причин, обуславливающих ограничение количества типов самолётов при выполнении практических расчётов (см. раздел 4.2).

3.4 Оптимизация маршрутной сети местных авиалиний с учётом возможной промежуточной посадки

Как отмечалось в п. 3.2, для подсистем «второй зоны» поиск оптимальной структуры должен производиться одновременно с поиском аэродромов промежуточной посадки. Однако, благодаря убыванию плотности населения (рисунок 1) и введению условия (65), структура подсистем «второй зоны» в большинстве случаев оказывается одинаковой: для обслуживания подсистемы достаточно задействования одного аэропорта – или уже существующего, или нового в пункте отправления, наиболее ближайшем к столичному аэропорту. При этом на такое разбиение подсистем почти не влияет разбиение подсистем по принципу условия (65) для ВС с наибольшей скоростью полёта: при отдалённости от столицы более чем на 400 км почти все подсистемы «второй зоны» состоят не более чем из 2÷3 близкорасположенных пунктов отправления.

Как следствие, оптимизация маршрутной сети сводится только к поиску аэродромов промежуточной посадки для рейсов, вылетающих из аэропортов «второй зоны». Соответствующая задача целочисленного программирования может быть сформулирована следующим образом:

$$V_0^{(2)} = \arg \min_{V^{(2)}} \left(\sum_{n=0}^{N_2} \sum_{m=1}^{M_2} \sum_{k \in \text{сам.}} w_{mn}^{(2)} v_{mk}^{(2)} c_{mnk}(a_m) \right), \quad (87)$$

$$V^{(2)} = \{w_{mn}^{(2)}, v_{mk}^{(2)}\}, \quad \forall n = 0, \dots, N_2, \forall m = 1, \dots, M_2, k \in \text{самолёты}, \quad (88)$$

$$w_{mn}^{(2)} = \{0, 1\}, \quad \forall n = 0, \dots, N_2, \forall m = 1, \dots, M_2, \quad (89)$$

$$\sum_{n=0}^{N_2} w_{mn}^{(2)} = 1, \quad \forall m = 1, \dots, M_2, \quad (90)$$

$$v_{mk}^{(2)} = \{0, 1\}, \quad \forall m = 1, \dots, M_2, \forall k \in \text{самолёты}, \quad (91)$$

$$\sum_k v_{mk}^{(2)} = 1, \quad \forall m = 1, \dots, M_2, k \in \text{самолёты}, \quad (92)$$

$$v_{mk}^{(2)} = w_{mn}^{(2)} \times v_{nk}^{(1)} \Big|_{V_0^{(1)}}, \quad \forall m = 1, \dots, M_2, \forall n = 1, \dots, N_2, k \in \text{самолёты}, \quad (93)$$

$$z_k(L_{nC^*}) - \xi_{nk}^{(1)} \geq z_k(L_{mn}), \quad \forall n = 1, \dots, N_2, \forall m = 1, \dots, M_2, k \in \text{самолёты}, \quad (94)$$

$$\left[\frac{x_n}{z_k(L_{nC^*})} \right] \geq \sum_{m=1}^{M_2} \left[\frac{a_m}{z_k(L_{mn})} \right], \quad \forall n = 1, \dots, N_2, k \in \text{самолёты}, \quad (95)$$

$$t_{mnk}^{\text{БЛОК}} + t_{nk}^{\text{ПРОМ}} + t_{nC^*k}^{\text{БЛОК}} \leq T_{\text{МАРШ}}, \quad \forall m = 1, \dots, M_2, \forall n = 1, \dots, N_2, k \in \text{самолёты}. \quad (96)$$

Требуется найти конфигурацию транспортной сети (87), при которой достигаются минимальные затраты на перевозку пассажиров из m аэропортов «второй зоны», $1 \leq m \leq M_2$, в n аэропортов «первой зоны», $1 \leq n \leq N_2$, или в столичный аэропорт (соответствует $n = 0$). Конфигурация сети задаётся набором булевских управляющих переменных $V^{(2)}$ в (88). Из них переменные $w_{mn}^{(2)}$ в (89) задают наличие авиалиний между M_2 аэропортами отправления и (N_2+1) аэропортами прибытия, причем каждый аэропорт отправления должен быть связан с аэропортами прибытия одной авиалинией (90). Переменные же $v_{mk}^{(2)}$ в (91) определяют единственный тип k -го ВС для осуществления авиаперевозок (92).

В случае если перевозка осуществляется с промежуточной посадкой, то в (93) ненулевой выбор $v_{mk}^{(2)}$ задаётся только в том случае, если существует ненулевая транспортная связь $w_{mn}^{(2)}$, а соответствующий аэропорт «первой зоны» (т.е. кроме столичного) обслуживается тем же самым типом ВС $v_{nk}^{(1)} \Big|_{V_0^{(1)}} = 1$ (из решения предыдущего этапа п. 3.3). Кроме того, возможность авиаперевозки с промежуточной посадки определяют и наличие достаточного количества свободных мест в салоне (94), и достаточного количества рейсов (95), вылетающих из аэропорта промежуточной посадки. Условие соблюдения ограничения на время местной перевозки (96) при этом сохраняется.

Необходимость добавления в множество аэропортов прибытия столичного аэропорта ($n = 0$) связана с тем, что без этого шага в ряде случаев решение не

будет существовать, т.к. не будет выполняться (90). Это происходит, когда возможности по догрузке рейсов в аэропорты «первой зоны» сильно ограничены, например, при малом количестве рейсов в эти аэропорты (левая часть неравенства (95)).

Поиск решения производится итерационно методом покоординатного градиентного спуска в пространстве размерности $M_2 \times N_2 \times k_{BC}$ (k_{BC} – количество рассматриваемых самолётов) сеточной функции в выражении (87), зависящей от вектора $V^{(2)}$ ненулевых управляющих переменных $w_{mn}^{(2)}$ и $v_{mk}^{(2)}$.

Как и в предыдущем пункте 3.3, при реализации градиентного спуска, с целью снижения вероятности попадания в локальный экстремум в зависимости от выбора начального приближения, процедура должна быть повторена Q_2 раз, $Q_2 > 1$.

Для оценки достаточного количества итераций Q_2 был проведён поиск решения задачи (87)-(96) методом градиентного спуска для тестовой выборки из 20 аэропортов «первой зоны» и 20 аэропортов «второй зоны». При 100 случайных начальных вариантах выбора аэропортов промежуточной посадки и типа обслуживающего ВС, для каждого варианта градиентный спуск реализовывался 100 раз. Сходимость процесса поиска решения задачи (87)-(96), при количестве типов самолётов в парке ВС не более трёх, показана на рисунке 37:

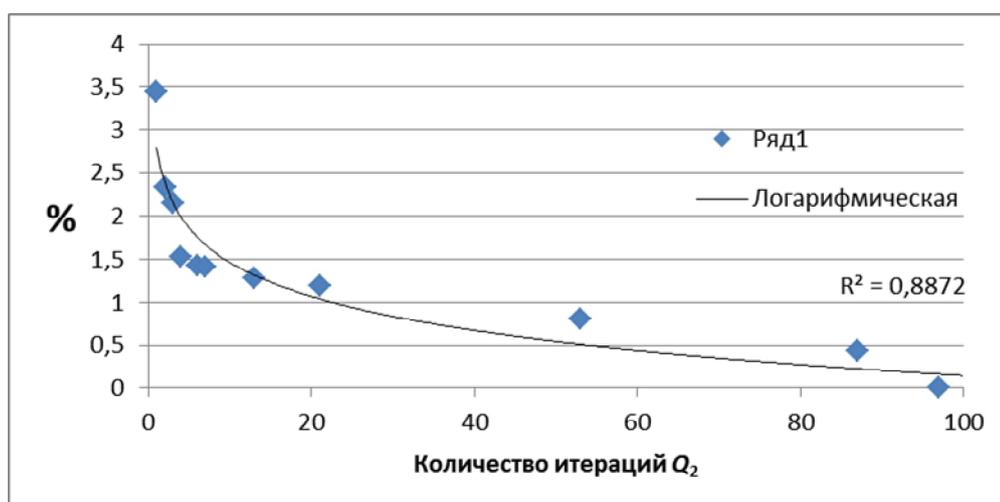


Рисунок 37 – Улучшение решения для тестовой выборки подсистем «первой» и «второй зоны» в зависимости от количества итераций

Результаты, представленные на рисунке 37, означают: если наилучшее решение найдено, например, после 90 итераций, то, какое бы количество итераций ни было выполнено после этого, вновь найденное наилучшее решение будет лучше уже имеющегося не более чем на 0,5%.

Таким образом, результаты тестовой оптимизации позволяют ограничить $Q_2 < 50$ и сформулировать следующую оценку достоверности решения: по выполнении градиентного спуска в цикле 50 раз, затраты для подсистем «второй зоны» будут соответствовать минимуму (выражение в скобках (87)) с точностью до 1%.

Как и в случае оптимизации подсистем «первой зоны», в произвольном случае при k -типовом парке самолётов, темпы сходимости решения значительно ухудшаются, а количество итераций Q_2 при сохранении точности значительно вырастает.

3.5 Оптимизация локальных авиатранспортных подсистем с учётом применения винтокрылых летательных аппаратов

Как показано в анализе п. 1.2 (рисунок 9), в настоящее время особенности применения вертолётов при организации МВЛ существенно отличаются от самолётов: за редким исключением, вертолёты используются на внутрирегиональных рейсах с несколькими промежуточными посадками, тем самым играя роль подвозящего транспорта. В силу этого, ограничение (15) на количество промежуточных посадок для вертолётов не задавалось.

Эти особенности применения вертолётов на МВЛ обосновываются сравнением ТЭХ различных типов ВС на примере вертолёта «Ансат» [3] и самолётов L-410UVP [14] и ЛМС-901 [67]. Для данных ВС в текущих ценах стоимость лётного часа вертолёта в 1,3÷2,5 раза превосходит стоимости лётного часа самолётов. Исходя из этого, с учётом затрат на наземную инфраструктуру, для авиалиний между столицей и пунктами отправления «первой зоны» делается вывод: хотя расходы на содержание вертолётной площадки значительно меньше, чем на аэропорт МВЛ, экономия возможна только при применении вертолётов на

авиалиниях дальностью менее 200 км на территориях, где невозможно регулярное наземное сообщение. Подобным образом организованы перевозки, например, в Шурышкарском районе Ямало-Ненецкого автономного округа, однако в целом по стране количество подобных ситуаций пренебрежимо мало (рисунок 9 – менее 100 беспосадочных рейсов в год).

Отсюда, для выработки оценки целесообразности применения вертолётов как подвозящего транспорта, была рассмотрена технико-экономическая модель сравнения двух способов организации местных перевозок: без применения вертолётов и с их применением (рисунок 38).

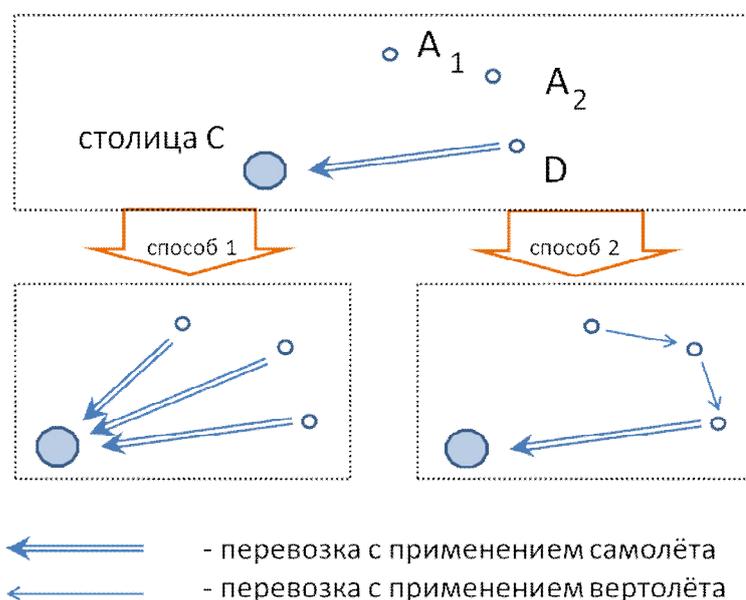


Рисунок 38 – Сравнение способов организации местных перевозок

Для каждого из способов рисунка 38 рассчитывались, соответственно, затраты f_1 и f_2 , включавшие стоимость рейсов и стоимость содержания авиационной инфраструктуры. Способ 2 становится предпочтительным при выполнении условия $f_2 - f_1 > 0$. В окончательном виде, после выполнения всех преобразований, при заданном k -ом самолёте и i -ом аэропорте (пункт сбора D на рисунке 38, далее обозначаемый термином «хаб»), это соответствует следующему оценочному условию для количества $n_{\text{ВЕРТ}}$ пунктов отправления A_1, \dots, A_n как вертолётных площадок [51]:

$$n_{\text{ВЕРТ}} > \frac{\left(T_{\text{МАРШ}} - \frac{L_{ir}}{V_k^{\text{КРЕЙС}}} \right) \left(1 + \frac{V_{\Omega 1}^{\text{АВТО}}}{V_{\text{ВЕРТ}}^{\text{КРЕЙС}}} \right) \times C_{\text{ВЕРТ}}^{\text{л.ч.}}}{\frac{C_{ik}^{\text{АЭРО}}}{T_{\text{РЕС}}} + c_t^{\text{АЭРО}} - \frac{C^{\text{ПП-верт}}}{T_{\text{РЕС}}} - c_t^{\text{ПП-верт}} + 2 \frac{L_i}{V_k^{\text{КРЕЙС}}} c_k^{\text{л.ч.}}}, \quad (97)$$

где $C_{\text{ВЕРТ}}^{\text{л.ч.}}$, $c_k^{\text{л.ч.}}$ – стоимости лётного часа оцениваемого вертолёта и k -го самолёта, соответственно;

$T_{\text{РЕС}}$ – период эксплуатации;

$V_{\Omega 1}^{\text{АВТО}}$ – средняя скорость автомобильного транспорта в районе, где располагается хаб D (см. формулу(61)).

Графики поверхностей, соответствующих уравнению $f_2 - f_1 = 0$, для самолётов L-410 и «Рысачок» и вертолёта «Ансат» построены в координатах {отдалённость хаба от столицы L_i ; период эксплуатации; количество обслуживаемых вертолётном пунктов отправления $n_{\text{ВЕРТ}}$ } и представлены на рисунке 39:

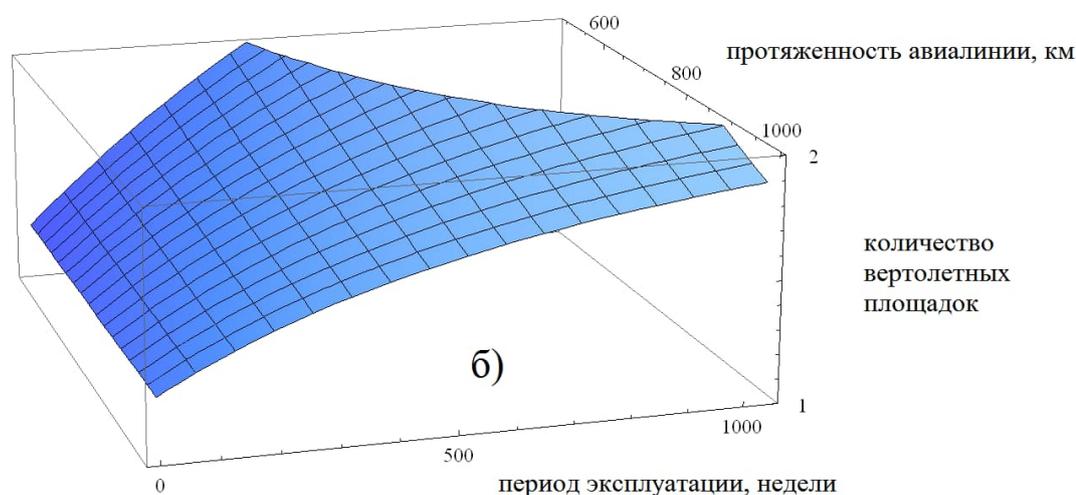
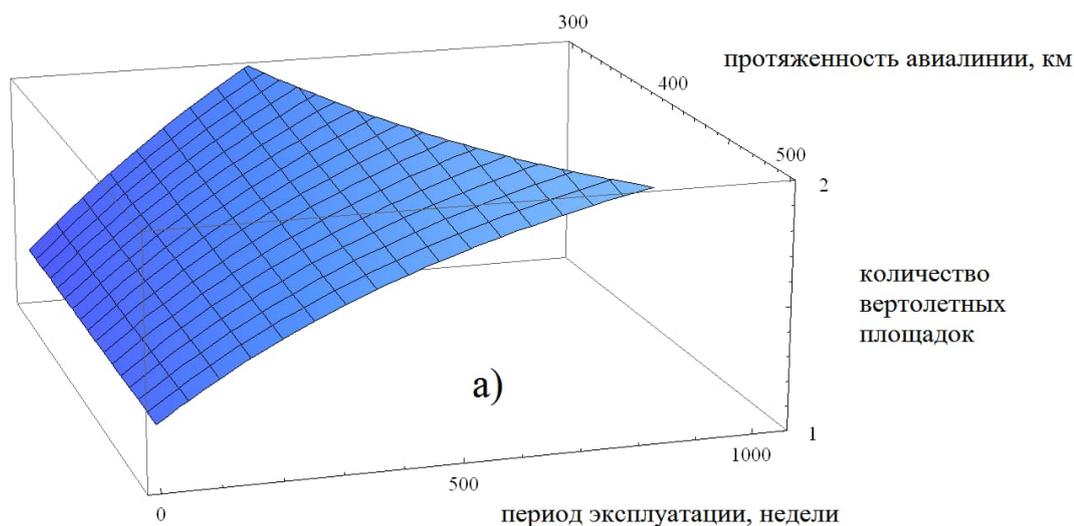


Рисунок 39 – Количество вертолётных площадок на маршруте подвозящего вертолётного транспорта, показанное для наглядности с условным ограничением «не более двух пунктов отправления»:

а) отдалённость хаба от столицы 300-500 км, самолёт L-410;

б) отдалённость хаба от столицы 500-1000 км, самолёт «Рысачок»

Предпочтительному выбору второго способа организации перевозок соответствуют точки пространства, расположенные выше поверхностей рисунка 39. В приведённых случаях, при выполнении условия (58) (20 лет эксплуатации, т.е. более 1000 недель) независимо от отдалённости хаба, поверхность располагается выше уровня «две вертолётные площадки». Это означает, что второй способ будет эффективен только в том случае, если вертолёт

«Ансат» за один рейс будет забирать пассажиров не менее чем из трёх пунктов отправления:

$$n_{BEPT} \geq 3 . \quad (98)$$

Таким образом, применение вертолётной системы местных перевозок может быть учтено следующим образом: после оптимизации подсистем «первой зоны», производится поиск возможностей укрупнения этих подсистем посредством организации подвозящего вертолётного транспорта.

Следует отметить, что подобное укрупнение подсистем до проведения их оптимизации не имеет смысла, так как ещё не выявлены все аэропорты-хабы D , из которых будет совершаться облёт вертолётном пунктов отправления. С другой стороны, наиболее корректный шаг в данном случае – совместная оптимизация подсистем с учётом вертолётного транспорта, – во-первых, значительно усложняет решение задачи, а во-вторых, не приводит к нахождению сколь-либо значимого улучшения решения. Это связано с особенностями характеристик существующих вертолётных поездов, пояснение может быть дано на примере того же вертолёта «Ансат» (рисунок 40):

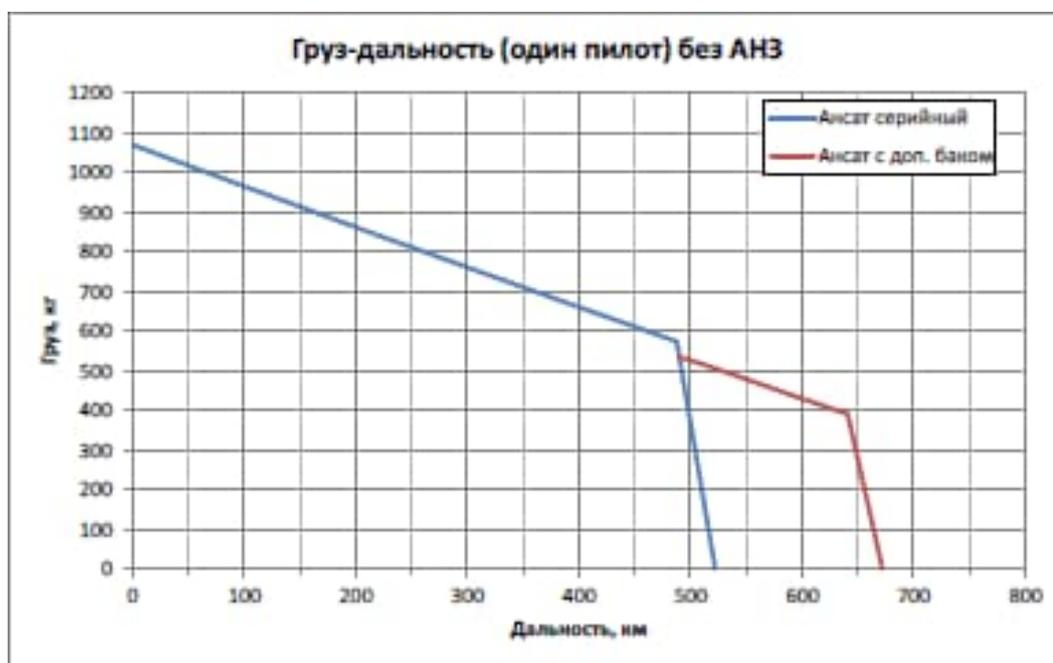


Рисунок 40 – Зависимость максимальной коммерческой нагрузки вертолёта «Ансат» от дальности [2]

Пассажировместимость салона вертолѐта «Ансат», выполненного в пассажирском варианте, составляет 7 человек [2]. Как следует из зависимостей на рисунке 40, при условиях полѐта «один пилот, без АНЗ, отсутствие промежуточных посадок» дальность полѐта вертолѐта с максимальным количеством пассажиров не превысит 350 км.

Тогда, при обслуживании ближних подсистем с большим количеством пассажиров, условие (67) не будет соблюдаться, так как вертолѐт «Ансат» будет полностью заполняться при $1 \div 2$ промежуточных посадках. Если же рассматривается вертолѐт большей пассажировместимости (например, Ми-8), то, в силу большей стоимости лѐтного часа, увеличивается необходимое количество промежуточных посадок в (98), что также не позволит соблюсти условие $T_{МАРШ}$.

В то же время, при обслуживании более отдалѐнных подсистем, при соблюдении условия (18) касательно $T_{МАРШ}$ бѳльшую часть времени местной поездки будет составлять время перелѐта самолѐта от хаба до столицы. Как следствие, на облѐт вертолѐтом трѳх посадочных площадок останется мало времени, а поскольку обслуживаемые подсистемы значительно разнесены по территории (следствие малой плотности населения) – вертолѐт не будет успевать совершить облѐт. По этой же причине, нецелесообразен и облѐт вертолѐтом пунктов отправления из аэропортов «второй зоны», даже если эта зона незначительно удалена от столичного аэропорта.

Как результат, процедура укрупнения подсистем означает поиск возможностей охвата малых подсистем (подсистем с небольшим пассажиропотоком $\sim 1 \div 2$ чел./день, для обслуживания которых достаточно одного аэродрома) минимальным количеством замкнутых маршрутов подвозящего вертолѐтного транспорта. Хабами при этом (начало и конец маршрута) могут быть:

- любые аэропорты «первой зоны»;
- пункты отправления, где уже имеется существующий аэропорт;
- непосредственно пункты отправления малых подсистем.

Описываемая задача относится к классу т.н. задач маршрутизации транспорта (Vehicle Routing Problem, VRP), а именно, к подклассу задач маршрутизации транспорта с несколькими депо (Multi-Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP) [64] и с введением дополнительных условий, рисунок 41:

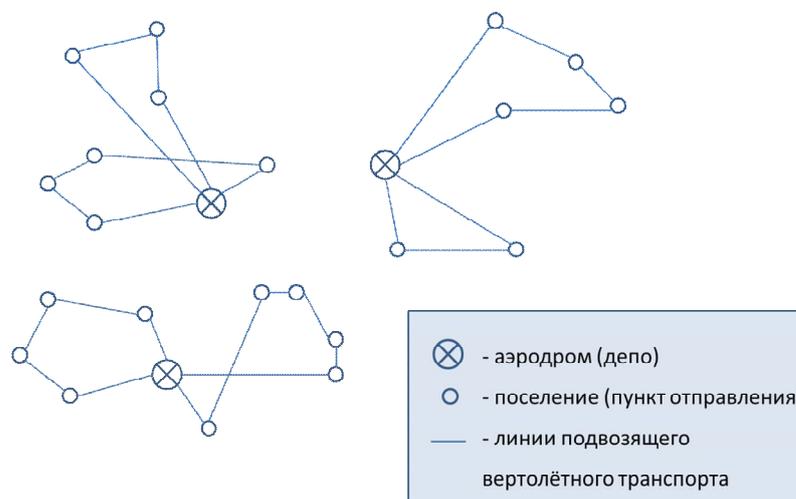


Рисунок 41 – Схематическое решение задачи маршрутизации транспорта с несколькими депо применительно к оптимизации подвозящего вертолётного транспорта

Классическая задача VRP касается поиска набора оптимальных маршрутов для парка транспортных средств, стартующих и возвращающихся в один и тот же пункт (депо), с требованием посетить весь набор местоположений (пунктов отправления). Задача MDVRP, как обобщение VRP, подразумевает наличие нескольких депо.

Следует обратить внимание: для того, чтобы в настоящей работе в рамках сбалансированной транспортной модели корректно выделить задачу MDVRP, модель должна быть соответствующим образом модифицирована. Это связано с тем, что пассажиропотоки моделируются как односторонние (рисунок 17, формулы (4)-(6) и т.д.), в то время как подвозящий вертолётный транспорт выполняет полёты по замкнутому маршруту. Иначе говоря, полёт на первом участке маршрута – от столицы до первого пункта отправления – вертолёт выполняет с пустым салоном. Однако, во избежание усложнения формулировки условий в разделе 2.3, данное обстоятельство не учитывается.

Исходя из обобщенной задачи MDVRP [97], задача оптимизации затрат на подвозящий вертолётный транспорт может быть сформулирована следующим образом:

$$Y_0 = \arg \min_Y \left(\sum_{i \in U} \sum_{j \in U} c_{ij k_B} y_{ij} + \sum_{i \in U} C_{i k_B} q_i \right), \quad (99)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \in U, \quad (100)$$

$$q_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in U, \quad (101)$$

$$\sum_{j \in U} y_{ij} = 1, \quad \forall i \in U_C, \quad (102)$$

$$\sum_{i \in U} y_{ij} = 1, \quad \forall j \in U_C, \quad (103)$$

$$\sum_{j \in U} y_{ij} - \sum_{j \in U} y_{ji} = 0, \quad \forall i \in U, \quad (104)$$

$$\sum_{i \in U_D} \sum_{j \in U} y_{ij} \leq 1, \quad (105)$$

$$\sum_{j \in U_C} a_j \sum_{i \in U} y_{ij} \leq z_{\max \text{ верто}}, \quad (106)$$

$$\sum_{j \in U_C} t_{ij} y_{ij} \leq T_i, \quad \forall i \in U_D, \quad (107)$$

$$\sum_{j \in U_C} \sum_{i \in U} y_{ij} \geq n_{\text{БЕРТ}}, \quad (108)$$

где $U = U_D \cup U_C$ – множество, состоящее из подмножества депо U_D (хабов) и подмножества пунктов отправления U_C , соответственно;

Y – вектор, состоящий из бинарных управляющих переменных y_{ij} , задающих в решении искомые транспортные связи со стоимостью перевозки $c_{ij k_B}$ (в общем случае нелинейной; индекс k_B означает применение вертолёта в качестве транспортного средства), и q_i , задающих хабы со стоимостью содержания $C_{i k_B}$;

t_{ij} – время полёта вертолёта из пункта i в пункт j ;

T_i – время, ограничивающее суммарное время облёта вертолётном пунктов отправления (зависит от аэродрома i , так как задаётся как разница между

нормативным временем $T_{МАРШ}$ и временем на совершение перелёта из хаба в столичный аэропорт, в т.ч. с учётом времени на посадку).

Хотя фактически множества хабов и пунктов отправления могут совпадать, множества U_D и U_C различны (даже если выполняется $U_D = U_C$). Корректность формулировки задачи сохраняется благодаря тому, что каждому элементу множества U_D соответствует элемент множества U_C с нулевым расстоянием между ними (или нулевой стоимостью перевозки), что, безусловно, упрощает запись задачи, но увеличивает её размерность.

Приведённые условия (100)-(108) означают:

(100)-(101) – бинарность управляющих переменных;

(102)-(103) – каждый пункт отправления входит только в один кольцевой маршрут с двумя транспортными связями, одной входящей и одной выходящей;

(104) – условие возврата всех вылетающих вертолётов в хабы;

(105) – каждый вертолёт вылетает из хаба только один раз или не вылетает вовсе;

(106) – пассажиры a_j , забираемые из j -го пункта, не могут в сумме по маршруту превышать пассажироместимость вертолёта $z_{\max \text{ верто}}$;

(107) – ограничение на суммарное время маршрута вертолёта, являющееся в настоящей работе дополнением к обобщенной постановке MDVRP;

(108) – дополнение к условию (107) касательно минимально необходимого количества пунктов на маршруте.

Сложность решения задач MDVRP связана с необходимостью распределить пункты отправления по разным депо. И поскольку задача VRP является обобщением известной задачи о коммивояжере TSP (Travelling Salesman Problem) и относится к NP-трудным [98], то и задача (99)-(108) относится к NP-трудным задачам. По этой причине количество рассматриваемых в задаче типов вертолётов в парке было ограничено одним: расширение парка ВС для нескольких типов вертолётов приводит к дальнейшему обобщению (и усложнению поиска решения) задачи.

Для оценки затрат на оптимальную структуру вертолётного подвозящего транспорта предлагается к использованию следующий метаэвристический алгоритм:

1) Формирование множества U_{Σ} пунктов отправления из всех аэропортов «первой зоны», существующих аэропортов, пунктов отправления малых подсистем.

2) Формирование на основе U_{Σ} множества $U_{\Sigma CL}$, элементы которого – это замкнутые маршруты (циклы), для которых выполняются условия (107) и (108) при назначении одного из пунктов маршрута хабом.

3) Объединение элементов $U_{\Sigma CL}$ в связные графы, позволяющее таким образом кластеризовать исходное множество U_{Σ} . При этом множество вершин (хабов и пунктов отправления) каждого из связных графов в нижеследующем описании алгоритма рассматривается как множество U задачи (99)-(108), а U_{CL} – как соответствующее этому графу подмножество циклов множества $U_{\Sigma CL}$: $U_{CL} = \{Cl_e\}$, $e = 1, \dots, E$.

4) Разбиение каждого множества U на подмножества $U_C = \{u_c\}$, $c = 1, \dots, C$, и $U_D = \{u_d\}$, $d = 1, \dots, D$, причем в множество U_D включаются только аэропорты «первой зоны» и существующие аэропорты.

5) Отыскание минимального количества хабов $H_{0\min} = H_{\min} |_{W^{(B)} = W_0^{(B)}}$ в множестве U_D , при котором достигается 100%-ый охват множества U_C циклами из множества U_{CL} , посредством решения задачи о покрытии [31] в следующей формулировке:

$$W_0^{(B)} = \arg \min_{W^{(B)}} H_{\min} , \quad (109)$$

$$H_{\min} = \sum_{d=1}^D w_d^{(B)} , \quad (110)$$

$$W^{(B)} = \{w_d^{(B)}\}, \quad d = 1, \dots, D , \quad (111)$$

$$w_d^{(B)} = \{0,1\}, \quad \forall d = 1, \dots, D , \quad (112)$$

$$\sum_{d=1}^D w_d^{(B)} \sum_{\substack{e=1 \\ e \neq d}}^E \varphi_e(d) = E - D, \quad (113)$$

$$\varphi_e(d) = \begin{cases} 1, & u_d \in Cl_e \\ E, & u_d \notin Cl_e \end{cases}. \quad (114)$$

Искомый набор управляющих переменных $w_d^{(B)}$ в (111) задаёт расположение хабов – ненулевые переменные (112) соответствуют хамам. Условия (113)-(114) задают необходимость одноразового включения в маршруты всех пунктов отправления.

Поиск решения производится итерационно методом покоординатного градиентного спуска в пространстве U_D сеточной функции H_{\min} , зависящей от вектора $W_1^{(B)}$ ненулевых управляющих переменных $w_d^{(B)}$.

Итерации производятся следующим образом: вектор $W_1^{(B)}$ задаётся состоящим из одной переменной $w_d^{(B)}$ ($H_{\min} = 1$, один хаб), и для неё находится такое значение d (положение хаба), при котором циклы, включающие этот хаб, охватывают максимальное количество пунктов отправления. Если не удастся охватить все пункты отправления – размерность вектора увеличивается на единицу ($H_{\min} = 2$, два хаба), и снова выполняется поиск их расположения, и так далее до тех пор, пока не будет достигнут 100%-ый охват рассматриваемых пунктов. По достижении этого охвата поиск прекращается, а размерность вектора $W_1^{(B)}$ и будет искомым $H_{0\min}$.

Если же при выполнении D -й по счёту итерации 100%-ый охват пунктов назначения не достигнут ($H_{\min} = D$) – процедура пп. 4)-5) повторяется с дополнительным добавлением в множество U_D аэродромов малых подсистем. Указанный порядок шагов алгоритма позволяет исключить строительство новых аэропортов, что, в силу соотношения затрат на аэропорты и затрат на вертолётный транспорт, позволяет уменьшить затраты на транспортную систему местных перевозок.

б) Поиск оптимального расположения $H_{0\min}$ штук хабов, при котором сохраняется 100%-ый охват множества U_C непересекающимися (не имеющими

общих пунктов отправления) циклами из множества U_{CL} при минимуме суммы расстояний L_{de} между хабами и остальными пунктами отправления этих циклов, в задаче дискретного программирования:

$$V_0^{(B)} = \arg \min_{V^{(B)}} \sum_{d=1}^D w_d^{(B)} \sum_{e=1}^E v_{de}^{(B)} L_{de} , \quad (115)$$

$$V^{(B)} = \{w_d^{(B)}, v_{de}^{(B)}\}, \quad d = 1, \dots, D, e = 1, \dots, E , \quad (116)$$

$$w_d^{(B)} = \{0, 1\}, \quad \forall d = 1, \dots, D , \quad (117)$$

$$\sum_{d=1}^D w_d^{(B)} = H_{0\min} , \quad (118)$$

$$v_{de}^{(B)} = \{0, 1\}, \quad \forall d = 1, \dots, D, \forall e = 1, \dots, E , \quad (119)$$

$$\sum_{d=1}^D v_{de}^{(B)} = 1, \quad \forall e = 1, \dots, E , \quad (120)$$

$$\sum_{d=1}^D w_d^{(B)} \sum_{\substack{e=1 \\ e \neq d}}^E \varphi_e(d) = E - D , \quad (121)$$

$$\varphi_e(d) = \begin{cases} 1, & u_d \in Cl_e \\ E, & u_d \notin Cl_e \end{cases} . \quad (122)$$

По аналогии с п. 5), набор управляющих переменных (116)-(117) в количестве (118) задаёт расположение хабов. При этом каждый из пунктов отправления посредством управляющих переменных $v_{de}^{(B)}$ в (119) «приписываются» к одному хабу (120) с сохранением одноразового включения (121)-(122) в циклы искомого решения.

Поиск решения производится методом покоординатного градиентного спуска в пространстве U_D минимизируемой сеточной функции (115), зависящей от вектора $W_1^{(B)}$ ненулевых управляющих переменных $w_d^{(B)}$.

Фактически, на этапе б) производится упрощение путём замены подзадачи MDVRP на следующую целочисленную задачу (рисунок 42):



Рисунок 42 – Замена подзадачи маршрутизации транспорта

а) – искомые исходные маршруты; б) – альтернативные маршруты

При расчёте затрат на перевозки подвозящим вертолётным транспортом, стоимость непосредственно воздушных перевозок рассчитывается для суммарной длины маршрута, равной половине длин однозвенных маршрутов рисунка 42б:

$$\sum_{d \in V_0} w_d^{(B)} \sum_{e \in V_0} L_{\Sigma e} \approx \frac{1}{2} \sum_{d \in V_0} w_d^{(B)} \sum_{e \in V_0} v_{de}^{(B)} L_{de} . \quad (123)$$

Допустимость такой замены без потери достоверности решения исходной задачи (10) обуславливается следующим:

- при расчёте парка ВС приоритетом является сравнительная оценка эффективности применения ВС, а не поиск оптимальной сети МВЛ, отсюда этап б) алгоритма можно условно трактовать как одинаковые моделируемые условия применения ВС для всех расчётных сценариев;

- этап б) достаточно достоверно отражает свойства вертолётного подвозящего транспорта: например, с ростом скорости вертолётов растёт количество охватываемых подсистем и протяжённость циклических маршрутов, а значит, и средняя отдалённость пунктов отправления от хабов, и т.д.;

- все циклические маршруты вертолётного транспорта сопоставимы по своей протяжённости, так как, в силу условий (97)-(98), состоят из небольшого

количества пунктов, разнесённых между собой на относительно небольшое расстояние;

- вклад подвозящего вертолётного транспорта в общий объём местных авиаперевозок невелик, что ведёт к незначительной погрешности вследствие использования формулы (123).

Структура алгоритма 1)-6) представлена на рисунке 43:

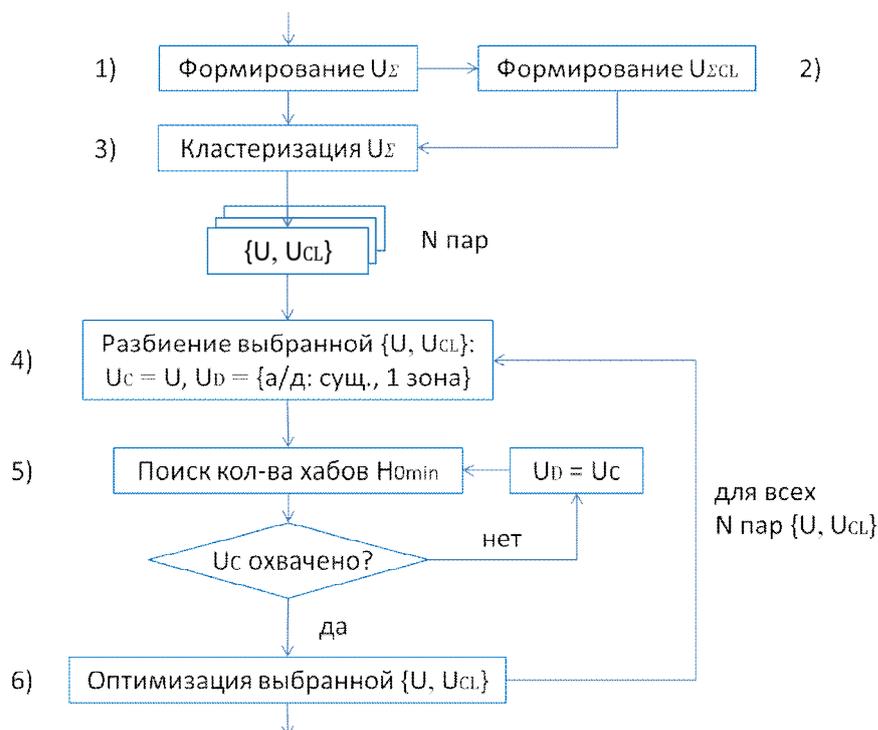


Рисунок 43 – Алгоритм поиска оптимальной структуры подвозящего вертолётного транспорта

После нахождения структуры всех кластеров $\{U, U_{CL}\}$, суммарные затраты на подвозящий вертолётный транспорт в транспортной системе местных перевозок рассчитываются как:

$$C^{(B)} = \sum_{V_0^{(B)}, V_0^{(B)} \subset U_\Sigma} \left(\frac{1}{2} \sum_{d \in V_0^{(B)}} c_{dek_B} w_d^{(B)} \sum_{e \in V_0^{(B)}} v_{de}^{(B)} L_{de} + \sum_{d \in V_0^{(B)}} C_{dk_B} w_d^{(B)} \right), \quad (124)$$

при этом пассажиропоток, собираемый подвозящим вертолётным транспортом, суммируется в хабах, а соответствующие пункты отправления (обслуживаемые через хабы, но сами не являющиеся таковыми) исключаются из графов рисунка 34.

3.6 Алгоритм расстановки парка воздушных судов по авиалиниям для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны

После нахождения наилучшего решения задачи (10), сначала рассчитывается промежуточный парк ВС по следующему алгоритму (рисунок 44):

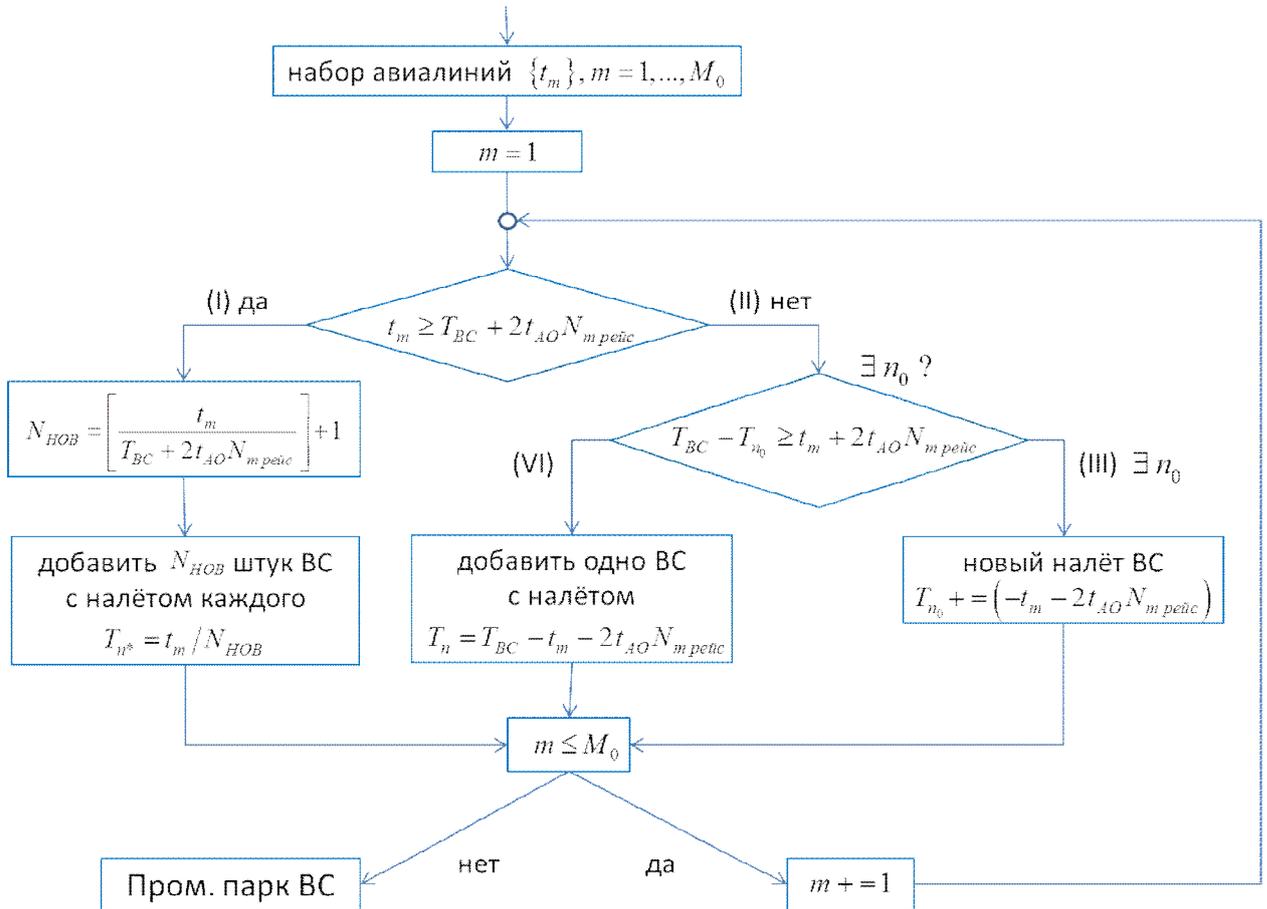


Рисунок 44 – Алгоритм расчёта промежуточного парка ВС k -го типа

Для некоторого рассматриваемого ВС k -го типа формируется непустое подмножество авиалиний, обслуживаемых этим типом ВС и соответствующих найденному решению X_0 задачи (10). Количество авиалиний этого подмножества находится в пределах $m = 1, \dots, M_0$.

Далее производится перебор всех авиалиний подмножества. Для некоторой рассматриваемой авиалинии m проводится сравнение (за моделируемый период времени) суммарного потребного налёта на линии t_m при количестве рейсов N_m и возможного налёта T_{BC} для рассматриваемого типа ВС с учётом времени (35) на наземные операции, для простоты обозначаемое как t_{AO} . Здесь в качестве T_{BC} ,

согласно выделенным особенностям организации МВЛ (раздел 1.2), берётся суммарное рабочее время (например, для моделируемого периода «месяц» – как «8 часов × 20 рабочих дней»).

Если потребный налёт превышает возможный налёт (ветвь (I) алгоритма) – в промежуточный парк ВС добавляется $N_{нов}$ экземпляров ВС с фактическим налётом T_{n*} для каждого экземпляра ВС.

Если же потребный налёт не превышает возможный налёт (ветвь (II) алгоритма) – рассматриваются две возможных ситуации. Если существует некоторый экземпляр ВС в промежуточном парке ВС, $n = n_0$, у которого разница между возможным налётом T_{BC} и фактическим налётом T_{n0} больше потребного налёта (ветвь (III) алгоритма) – это ВС назначается для обслуживания рассматриваемой авиалинии m с пересчётом его фактического налёта T_{n0} . Другими словами, ветвь (III) алгоритма учитывает возможность, когда ВС успеваает в день совершать два и более рейсов. В противном случае, в ветви (VI) алгоритма в промежуточный парк ВС добавляется ещё один экземпляр ВС с соответствующим фактическим налётом T_n .

Итоговое искомое количество ВС $N_k^{(II)}$ k -го типа в парке ВС рассчитывается на основе промежуточного парка ВС с учётом сезонной готовности парка и необходимости резервирования парка в соответствии с рекомендациями [80]:

$$N_k^{(II)} = \left[\frac{1,1 \times N_k^{(P)}}{\varphi_k^{(с.и.)}} \right] + 1, \quad (125)$$

где $N_k^{(P)}$ – количество самолётов k -го типа, полученное на основе алгоритма рисунка 44;

1,1 – коэффициент резерва парка;

$\varphi_k^{(с.и.)}$ – коэффициент сезонной исправности самолётов k -го типа.

Выводы по главе 3.

Рассматривается многоэтапный алгоритм декомпозированного поиска приближённого решения сформированной математической задачи выбора парка

ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны с учётом введённых ограничений. В рамках предварительных исследований было показано, что уровень технического совершенства современных ВС позволяет обеспечить транспортную доступность труднодоступных территорий даже с учётом достаточно жёстких ограничений на суммарное время местной поездки. В силу этого, решение задачи может быть упрощено до необходимости минимизации только затраченных ресурсов. Дальнейшие этапы алгоритма включают несколько разовых этапов, в которых определяются и исключаются из рассмотрения доли пассажиров, перевозимых наземным транспортом или при безальтернативном выборе применяемого ВС, и этапов, выполняемых итерационно с целью нахождения рациональной структуры маршрутной сети и сети аэропортов. Ключевым этапом алгоритма является разбиение внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок на подсистемы без потери точности решения. Выполнение итераций обусловлено как нелинейностью задачи, так и необходимостью учёта возможности выполнения самолётами промежуточных посадок и учёта особенностей применения вертолётов. После определения рациональной структуры маршрутной сети (с определением типа применяемого ВС для каждой из них) и сети аэропортов, выполняется окончательный расчёт потребного парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий с помощью алгоритма расстановки ВС по авиалиниям.

ГЛАВА 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ВЫБОРА ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ ТРУДНОДОСТУПНЫХ ТЕРРИТОРИЙ СТРАНЫ

Разработанная методика и реализованный на её основе ПК были применены для оценки эффективности обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий Республики Саха (Якутия) парком существующих и перспективных ВС МВЛ следующего поколения. Для их апробации был сформирован ряд сценариев и проведены соответствующие расчёты.

4.1 Структура программного комплекса с учётом алгоритма выбора парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны

Разработанная методика расчёта парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий была реализована в ПК, в котором укрупнённая структура алгоритма решения задачи (10) имеет вид (рисунок 45):

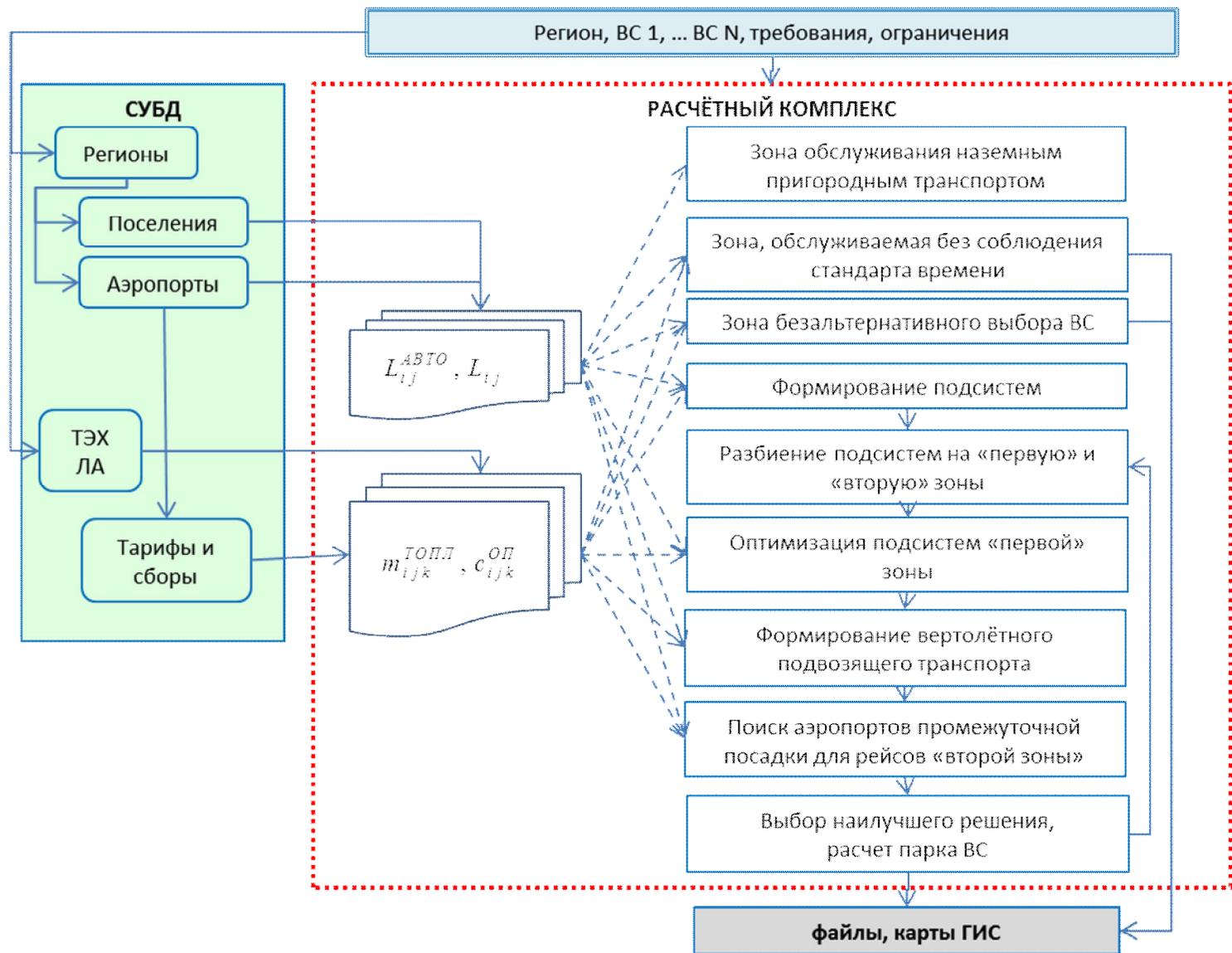


Рисунок 45 – Программный комплекс, реализующий решение задачи выбора парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны

При заданном сценарии (п. 2.2, рисунок 18) производится загрузка из базы данных необходимой информации о поселениях и действующих аэропортах региона, включая необходимые тарифы и сборы, и ТЭХ ВС.

Далее, поскольку в процессе решения задачи для некоторых величин приходится многократно выполнять расчёт одних и тех же значений, в целях сокращения времени работы ПК формируются:

- матрица кратчайших наземных расстояний L_{ij}^{ABTO} между всеми парами пунктов отправления i и j в регионе (рассчитываются на основе алгоритма Дейкстры);

- матрица ортодромических расстояний L_{ij} между всеми парами пунктов отправления i и j в регионе;

- для каждого ВС – матрица масс топлива $m_{ijk}^{ТОПЛ}$, необходимых для перелёта между пунктами i и j , как если бы они оба были аэропортами, в зависимости от перевозимого количества пассажиров $x_{насс}$:

$$m_{ijk}^{ТОПЛ} = m_{ijk}^{НАБОР} + m_{ijk}^{КРЕЙС} + m_{ijk}^{СНИЖ} ; \quad (126)$$

- для каждого ВС – матрица стоимостей перелёта $c_{ijk}^{ОП}(i, j, w_{ijk}, q_{ik}, q_{jk})$ между пунктами i и j , как если бы они оба были аэропортами, также в зависимости от перевозимого количества пассажиров w_{ijk} .

Из выбранного множества пунктов отправления исключаются те, для обслуживания которых целесообразно применение наземного пригородного транспорта. Остальные пункты отправления разделяются на несколько подмножеств (зон):

- т.н. «зона, обслуживаемая без соблюдения ограничения времени», для пунктов отправления в которой невозможно соблюдение ограничения $T_{МАРШ}$ (18);

- т.н. «зона безальтернативного выбора ВС», в которой исключаются из рассмотрения пункты отправления с пассажиропотоком, позволяющим организацию коммерческих несубсидируемых перевозок (условно ВС классов 1

и 2), и пункты отправления, обслуживаемые только одним наиболее скоростным типом ВС;

- зона, для обслуживания которой необходима оптимизация АТС.

Выделение «зоны безальтернативного выбора ВС» необязательно, но позволяет уменьшить размерность задачи поиска аэродромов промежуточной посадки (87)-(96) для крупных регионов, а также повысить достоверность результатов расчётов парка ВС, если на территории рассматриваемого региона существуют пункты отправления с количеством пассажиров a_i^* :

$$a_i^* \geq n^* , \quad (127)$$

где n^* – пороговое значение, соответствующее ~70% заполняемости салона ВС класса 2 (таблица 1). Формирование множества всех a_i^* производится с учётом (18) и (19). К подобным пунктам отправления, на примере Республики Саха (Якутия), относится город Нерюнгри с одноименным аэропортом.

Основное же количество пунктов отправления попадает в последнюю из вышеуказанных зон. Зона разбивается на подсистемы по принципу (64) и далее, путем итерационного разбиения подсистем на «первую» и «вторую» зоны, рассчитываются компоненты в следующем порядке:

- структура подсистем «первой зоны» (задачи целочисленного программирования п. 3.3);
- объединение подсистем «первой зоны» путем введения подвозящего вертолётного транспорта (задача MDVRP п. 3.5);
- задание аэропортов промежуточной посадки для рейсов из подсистем «второй зоны» (задачи целочисленного программирования п. 3.4).

Наилучшее для всех итераций решение запоминается и в сумме с затратами для «зоны, обслуживаемой без соблюдения ограничения времени» и «зоны безальтернативного выбора ВС» означает для заданного сценария искомые структуру маршрутной сети с назначением типа ВС для каждой авиалинии. Итоговый парк ВС окончательно рассчитывается согласно алгоритму п. 3.6.

Результаты расчётов (показатели внутрирегиональной транспортной системы местных перевозок) записываются в xls-файл, структура маршрутной сети дополнительно отображается в файлах геоинформационной системы (ГИС).

ПК реализован на языке программирования PHP в среде Qt5 с применением библиотеки PHPQt5. Время расчёта парка ВС, в зависимости от сценария, составляет 1,5-3,5 часа.

4.2 Формирование типоразмерного ряда парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны

Допущением при проведении практических расчётов является ограничение на количество одновременно рассматриваемых типов ВС в парке. При большом количестве рассматриваемых типов ВС, наряду с существенным ростом времени вычислений, по результатам вычислений парк ВС будет включать несколько типов ВС в количестве один-два экземпляра на тип с долей 2-3% от общей численности парка (что было подтверждено в ходе расчётов). Однако подобная ситуация требует обособленного моделирования затрат на эксплуатацию единичных ВС с заведомо бóльшими удельными затратами. Для исключения подобных итоговых результатов парк ВС целесообразно ограничивался четырьмя ВС: три типа – самолёты, один тип – вертолёт. Данный шаг считается корректным в т.ч. с учётом анализа существующего парка ВС (таблица 1), включающего только три базовых типа ВС с долей в парке более 10% для каждого.

В силу этих причин, в качестве базового сценария был выбран следующий парк ВС:

- 44-местный самолёт ТВРС-44 «Ладога»;
- 19-местный самолёт L-410UVP-E;
- 9-местный самолёт ЛМС-901 «Байкал»;
- вертолёт «Ансат».

Выбор данных самолётов обусловлен тем, что в настоящее время ТВРС-44 и ЛМС-901 находятся в стадии разработки, и в ближайшие несколько лет планируется их запуск в серийное производство, а L-410UVP-E, несмотря на

прекращение серийного производства, находится в эксплуатации. Для практических расчётов бралась официальная информация о ТЭХ самолётов. Предпочтительный выбор «Ансата» для пассажирских перевозок следует из технико-экономического сравнения его с Ми-8 при условии повышения частоты рейсов до значения не реже «1 раз в 3 суток» [51]. Наличие же Ми-8 в существующем парке авиакомпаний связано с необходимостью выполнения грузоперевозок и авиационных работ, а не только пассажирских перевозок.

В качестве альтернатив, рассматривалось применение следующих ВС:

- модернизированного самолёта L-410NG [13];
- самолёта «Рысачок» [12];
- семейства перспективных многоцелевых самолётов ЛМС-9, ЛМС-13 и ЛМС-19, разработанных ЦАГИ [92].

Также, для оценки технологии обдувки крыла, предназначенной для улучшения взлётно-посадочных характеристик, рассматривается самолёт КВП на базе L-410, оснащённый установленной на крыле распределённой электросиловой установкой (РЭСУ) обдувки крыла с электропитанием от дополнительных аккумуляторных батарей (условно «L-410 КВП», рисунок 46) [32, 45, 55].

ТЭХ указанных ВС, в том числе оценка некоторых из них, приведены ниже (таблица 6, рисунки 46-47):

Таблица 6 – ТЭХ оцениваемых ВС

	ед. изм.	k-е ВС								
		ТВРС-44	L-410UVP-E	Рысачок	L-410NG	ЛМС-901	ЛМС-9	ЛМС-13	ЛМС-19	L-410 КВП
m_{\max}	кг	17000	6600	5000	7000	4800	4572	6000	7654	6600
$m_{\text{ПУСТ } k}$	кг	12000	4050	2770	4400*	2040	2872*	3629*	4442*	4210
$m_{\text{ТОПЛ } k}$	кг	3000	990	1520	2254**	1280	1400	1500	1600	990
$Z_{\max k}$	чел.	44	19	9	19	9	9	13	19	19
$n_{\text{ЭК } k}$	чел.	2	2	2	2	1	1	2	2	2
$V_k^{\text{КРЕИС}}$	км/ч	460	350	380	400	300	400	400	400	350
$h_k^{\text{КРЕИС}}$	м	7200	4500	3000	6100	3000	7600	7600	7600	4500
$K_k^{\text{КРЕИС}}$		15	14	17	14	10	16,3	16,3	16,3	14
$n_{\text{дв } k}$	шт.	2	2	2	2	1	2	2	2	2
ТВД		ТВ7-117	M601F	M601F	H85-200	H80-100	ТВ-500	ВК-800	ВК-1000	M601F
$N_{\max k}$	л.с.	2400	750	750	850	800	630	800	1000	750
$C_{E k}$	кг/л.с.×ч.	0,242	0,29	0,29	0,27	0,27	0,24	0,24	0,24	0,29
$l_k^{\text{ВС}}$	м	1300	1000	770	1000	600	550	650	800	700
$T_{\text{РЕС } k}$	тыс. л.ч.	25000	20	15	30	25	25	25	25	20
$C_{\text{ВС } k}$	млн. руб.***	900	450	165	490	120	184	295	475	262
$\varphi_k^{(c.u.)} \text{****}$		0,85	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

* – масса пустого снаряжённого самолёта

** – с концевыми баками

*** – при курсе ~75 руб./USD для рубежа 2019 г.

**** – берётся как для современных ВС сопоставимых классов с учётом возможного перспективного улучшения [42, 80, 94]: например, если для самолёта L-410 нормативная исправность составляет 0,7 [42], то для перспективных 19-местных L-410NG, ЛМС-19 и т.д. предполагается возможность её повышения до 0,75, и т.д.

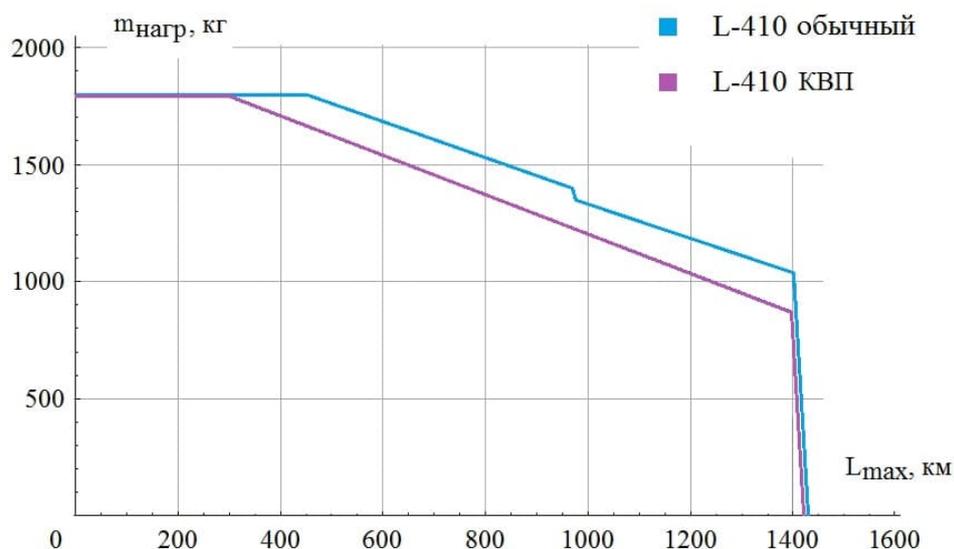


Рисунок 46 – Изменение зависимости коммерческой нагрузки от дальности полёта для самолёта L-410 при его модернизации в самолёт КВП с обдувкой крыла [55]

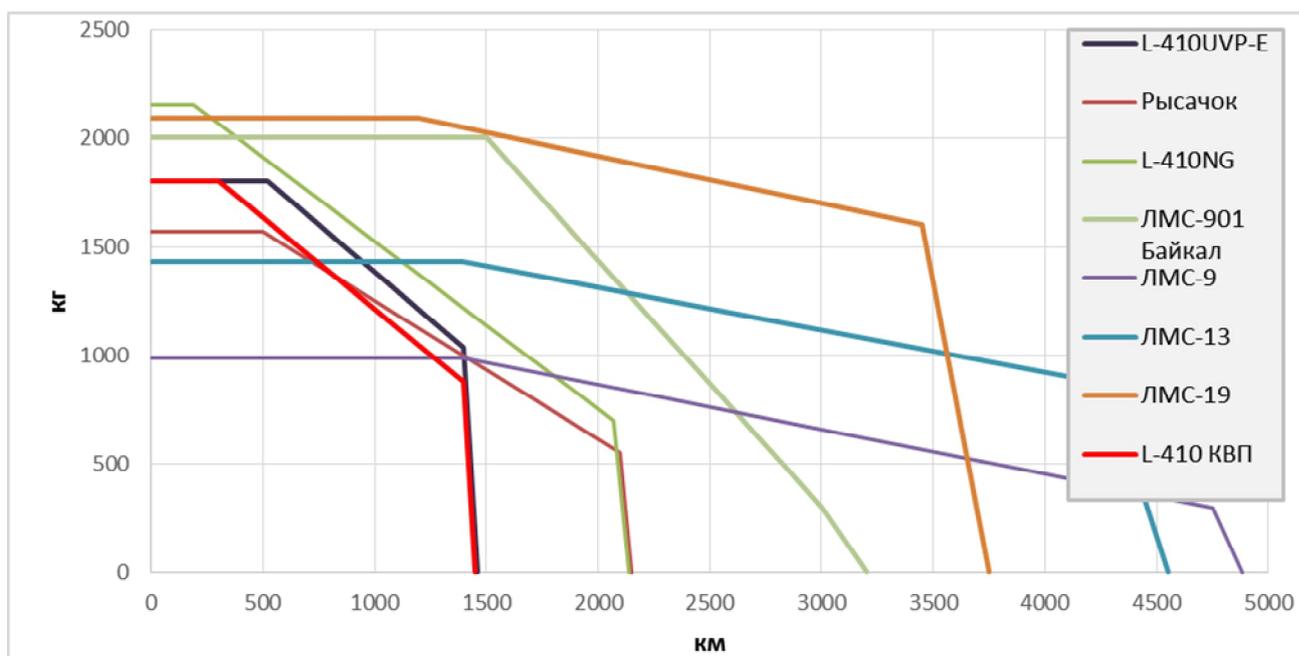


Рисунок 47 – Зависимость коммерческой нагрузки от дальности полёта для оцениваемых ВС малой авиации

Модифицированные сценарии, при неизменном применении ТВРС-44 и «Ансата», включают применение пары самолётов:

- 1) L-410NG – ЛМС-901;
- 2) L-410UVP-E – «Рысачок»;

- 3) L-410UVP-E – ЛМС-9;
- 4) L-410UVP-E – ЛМС-13;
- 5) ЛМС-13 – ЛМС-901;
- 6) ЛМС-19 – ЛМС-901;
- 7) ЛМС-19 – ЛМС-9;
- 8) ЛМС-13 – ЛМС-9;
- 9) L-410 КВП – ЛМС-901.

При изложении результатов расчётов эти самолёты указываются как «ВС 1 – ВС 2», соответственно.

4.3 Результаты расчётов парка воздушных судов для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий страны

Выбор парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий зависит от выбора значений двух независимых варьируемых переменных $T_{РЕГ}$ и $T_{МАРШ}$: например, количество перевозимых за год пассажиров изменяется в пределах 350-450 тыс. человек.

В этом случае, закономерности изменения парка, на примере базового сценария, могут быть проиллюстрированы следующим образом (рисунки 48-50):

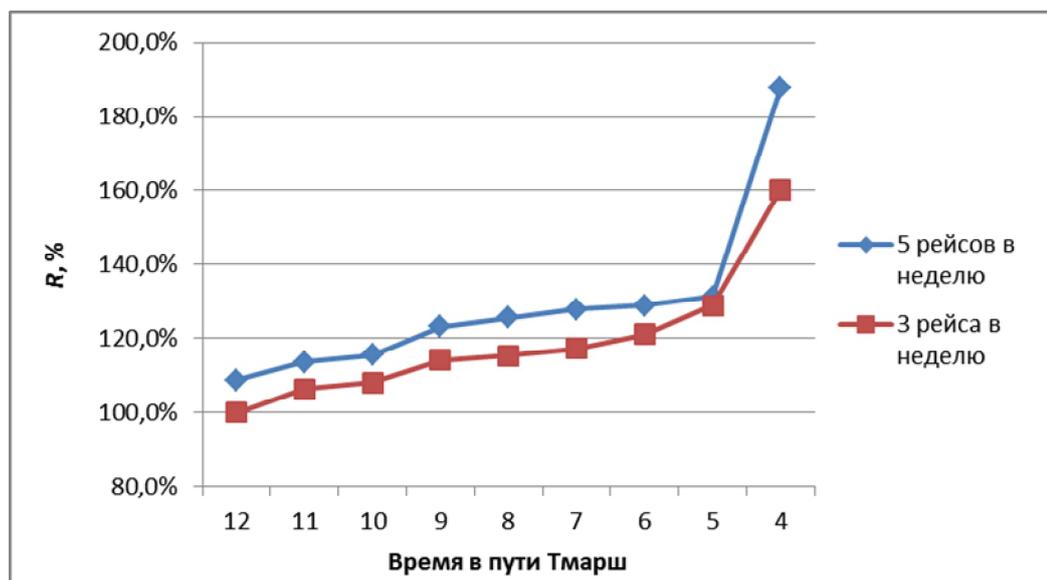


Рисунок 48 – Суммарные затраты на местные перевозки для базового сценария в зависимости от суммарного времени в пути

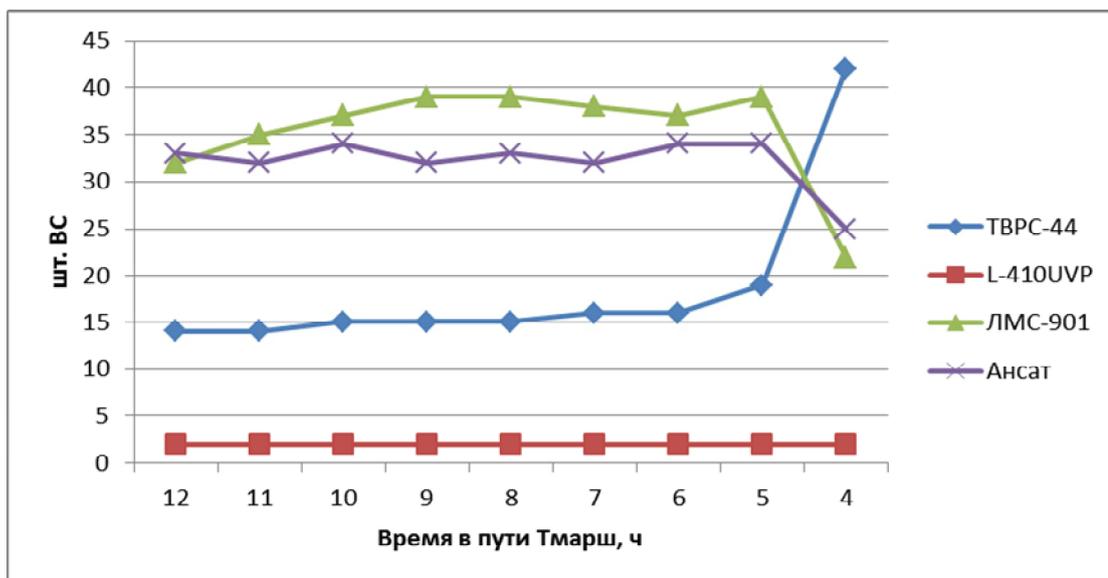


Рисунок 49 – Парк ВС базового сценария в зависимости от суммарного времени в пути при ограничении частоты рейсов «3 рейса в неделю»



Рисунок 50 – Парк ВС базового сценария в зависимости от суммарного времени в пути при ограничении частоты рейсов «5 рейсов в неделю»

За уровень затрат 100% (ось ординат рисунка 48) приняты затраты, соответствующие суммарному времени в пути $T_{МАРШ}$, равному 12 часов (~9,2 млрд. руб./год). Ужесточение ограничения на суммарное время в пути в пределах 5-10 часов приводит к изменению суммарных затрат в пределах 10-20% и слабо влияет на парк самолётов (рисунки 49-50). При задании же ограничения $T_{МАРШ} = 4$ часа происходит скачкообразный рост суммарных затрат на 30-60% и двукратное увеличение в парке количества самолётов ТВРС-44.

Последнее обусловлено тем, что для выполнения ограничения «4 часа» для ряда труднодоступных населённых пунктов формально необходима организация прямых авиалиний, связывающих столичный аэропорт с этими населёнными пунктами (включая строительство в них новых аэропортов МВЛ), а не обслуживание через ближайший аэропорт-хаб. Перевозки в данном случае выполняются с применением только ТВРС-44 как наиболее скоростного ВС, хотя заполняемость кресел ТВРС-44 при этом будет падать до $\approx 0,2-0,4$ (синяя линия рисунков 51-52).

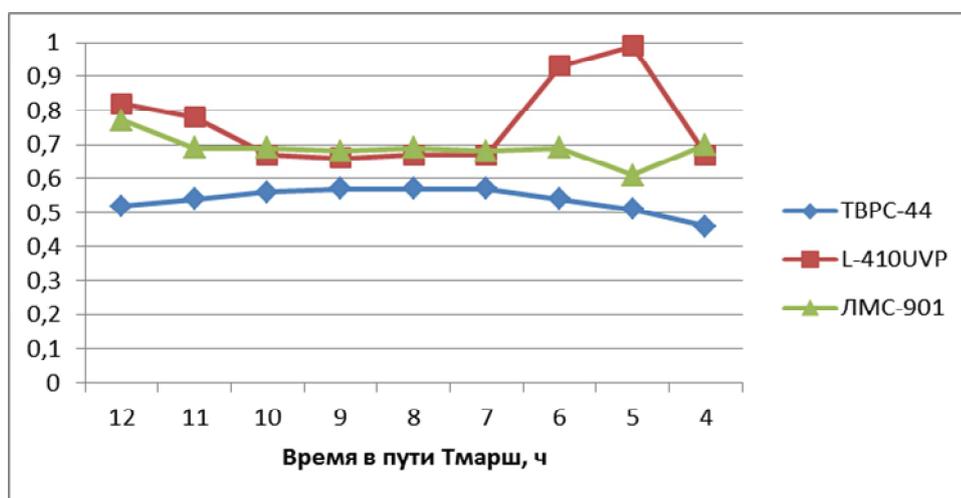


Рисунок 51 – Заполняемость салона самолётов в парке ВС базового сценария в зависимости от суммарного времени в пути при ограничении частоты рейсов «3 рейса в неделю»

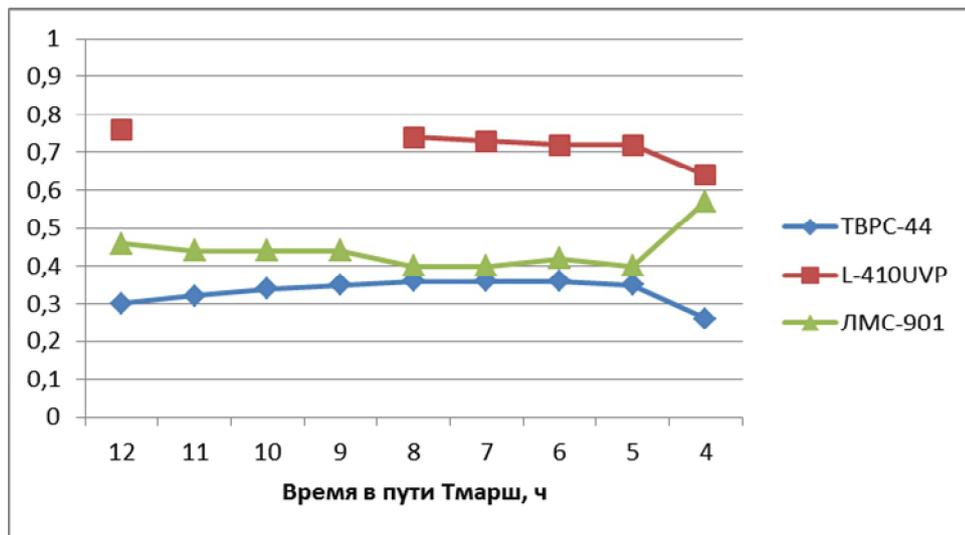


Рисунок 52– Заполняемость салона самолётов в парке ВС базового сценария в зависимости от суммарного времени в пути при ограничении частоты рейсов «5 рейсов в неделю»

Существенные колебания заполняемости салона, соответствующие самолёту L-410UVP-E (красные линии рисунка 51), с учётом пренебрежимо малой доли этого ВС в парке следует считать погрешностью методики. Малое количество ВС данного типа совпадает с существующим парком ВС (таблица 1) и является характерной особенностью рассматриваемого региона.

Указанная неостребованность в парке 19-местных самолётов связана с особенностями расселения жителей и спроса на местные перевозки. В качестве примера может быть приведён Абыйский район с аэропортом Белая Гора в одноимённом административном центре района. В период 2015-2017 гг. (согласно доступной статистике Росавиации), данный аэропорт в среднем обслуживал ~11 тыс. пассажиров в год при общем количестве жителей района ~4100 человек. С учётом двойного подсчёта прибывающих и убывающих пассажиров это соответствует подвижности ~1,3 полётов на человека в год, а средний ежедневный пассажиропоток составляет ~15 человек.

Результаты исследований показывают [53], что если ограничение на время местной поездки $T_{МАРШ}$ будет вводиться как единый общегосударственный стандарт, то его рациональным значением следует считать «4 часа». При ужесточении требования до «3 часов» необходимость организации МВЛ

фиксируется даже в Московской области. Ослабление же требования до «5 часов» следует считать нерациональным, так как целью развития перспективной ТС местных перевозок является именно повышение качества предоставляемых транспортных услуг. Для ограничения «4 часа» расчёт показателей представлен на рисунках 53-55:

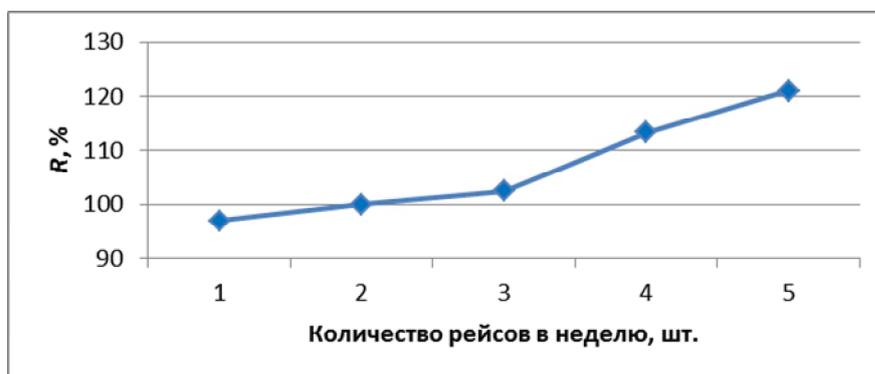


Рисунок 53 – Суммарные затраты на местные перевозки для базового сценария в зависимости от количества рейсов в неделю при ограничении времени местной поездки «4 часа»

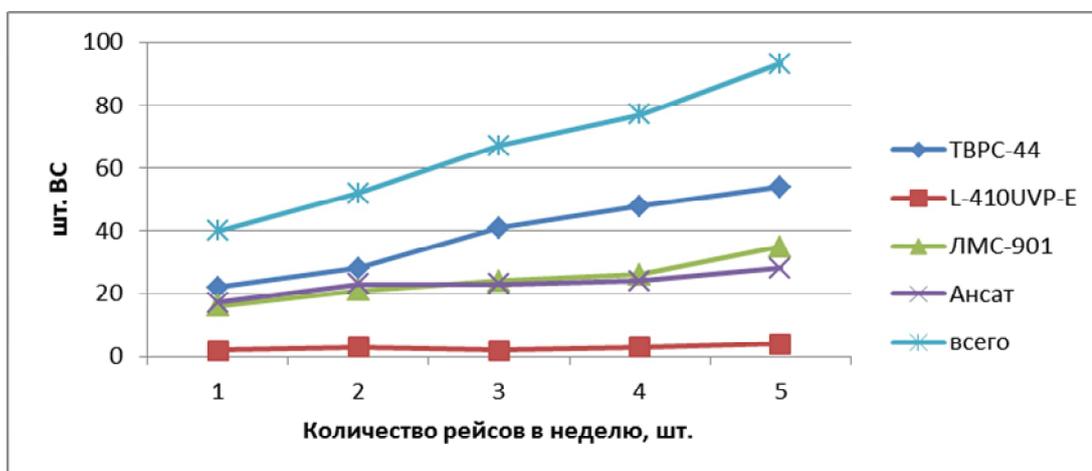


Рисунок 54 – Парк ВС базового сценария в зависимости от количества рейсов в неделю при ограничении времени местной поездки «4 часа»

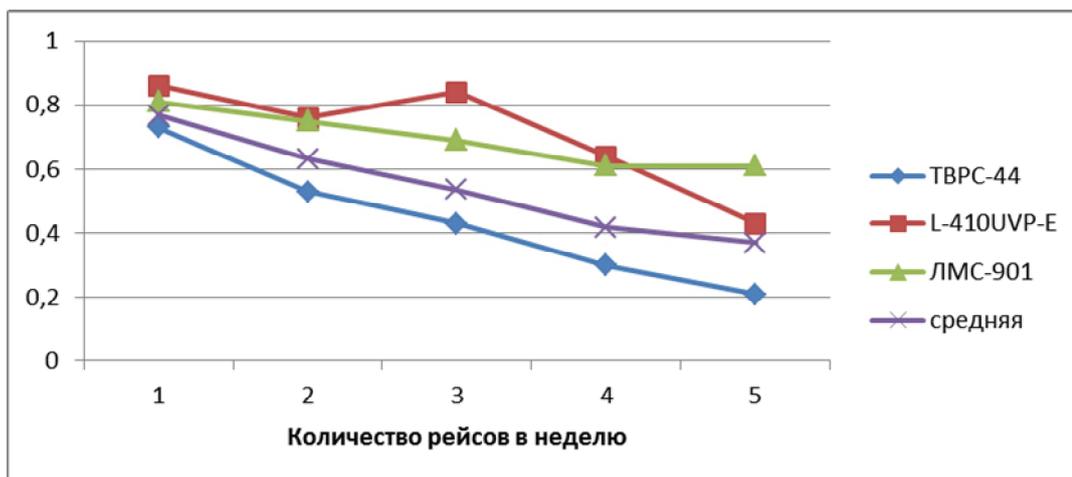


Рисунок 55 – Заполняемость салона самолётов в парке ВС базового сценария в зависимости от количества рейсов в неделю при ограничении времени местной поездки «4 часа»

За уровень затрат 100% (ось ординат рисунка 53) приняты затраты, соответствующие частоте рейсов «2 рейса в неделю» как среднему согласно существующей статистике (раздел 1.2). Полученная маршрутная сеть не включает аэродромы промежуточной посадки, что совпадает с результатами статистического анализа раздела 1.2. При этом рассчитанный парк самолётов классов 3 и 4 (рисунок 54) с точностью до 1-2 ВС совпадает с существующим парком авиакомпаний «Полярные авиалинии» и «Якутия» (таблица 1), включая особенность, связанную с количеством 19-местных самолётов.

Увеличение частоты рейсов до «5 рейсов в неделю» приводит к росту суммарных затрат до 20%. Парк ВС равномерно увеличивается, что связано с падением уровня заполняемости салона при увеличении частоты рейсов и одновременно фиксированном объёме пассажирских перевозок (формула (19)). При задании $T_{МАРШ} = 4$ часа наиболее востребованным ВС становится самолёт пассажироместимостью более 19 человек (количество ТВРС-44 на рисунке 54). Приведённая структура парка ВС рисунка 54 обусловлена тем, что для выполнения ограничения «4 часа» для ряда труднодоступных населённых пунктов формально необходима организация беспосадочных авиалиний, связывающих столичный аэропорт с этими населёнными пунктами (включая строительство в них новых аэропортов МВЛ), а не перевозки через ближайший

аэропорт-хаб. И в данном случае для перевозок применяется только ТВРС-44 как наиболее скоростное ВС, хотя заполняемость кресел ТВРС-44 при этом будет падать (как, впрочем, и для остальных типов ВС) вплоть до 0,2 (рисунок 55).

Полученный результат, безусловно, является формальным и неприемлемым для практической реализации, например, вследствие сложности строительства новых аэропортов в условиях вечной мерзлоты и при ограниченности бюджета. Учитывая рост затрат и численности парка ТВРС-44 с одновременным падением заполняемости кресел при варьировании $T_{РЕГ}$ и $T_{МАРШ}$, из совместного анализа рисунков 48, 51, 53, 55 можно сделать следующий вывод: для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий Республики Саха (Якутия) целесообразно применение самолётов пассажироместимостью 20-40 мест (в целях повышения заполняемости салона до приемлемых значений), но с повышенной крейсерской скоростью, что позволило бы по-прежнему использовать наиболее отдалённые аэропорты как хабы. Расчёты на основе (18) с учётом фактических расстояний между населёнными пунктами показывают, что крейсерская скорость ВС должна превышать 600 км/ч. Дальнейшее уточнение требований к подобному скоростному самолёту требует проведения дополнительных обликковых исследований, выходящих за рамки настоящей работы.

Что касается применения вертолётов, то, независимо от выбора самолётов, их доля в парке ВС составит ~20-25%, что совпадает с фактическим парком ВС (сравнение рисунков 49-50, 54 и таблицы 1) лишь качественно. Разница в количестве вертолётов связана с рассмотрением именно «Ансата», а не Ми-8. С другой стороны, полученные результаты расчётов можно считать адекватными вследствие совпадения территорий, где должен применяться внутрирайонный вертолётный транспорт, с результатами других исследователей (Приложение В).

Таким образом, анализ результатов расчётов для базового сценария по совокупности выводов можно считать подтверждением адекватности разработанной методики.

Исходя из этого, результаты сравнения и выбора парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий Республики Саха (Якутия), при задании наиболее комфортных с точки зрения пассажиров условий перевозок как «частота рейсов – 5 рейсов в неделю» и «суммарное время местной поездки – не более 4 часов» отображены на рисунках 56-58 (здесь и далее в скобках подписей под столбцами указан номер сценария или «базовый», результаты расчёта показателей представлены в сводной таблице Приложения Г). Также результаты расчётов представлены в работе [57].

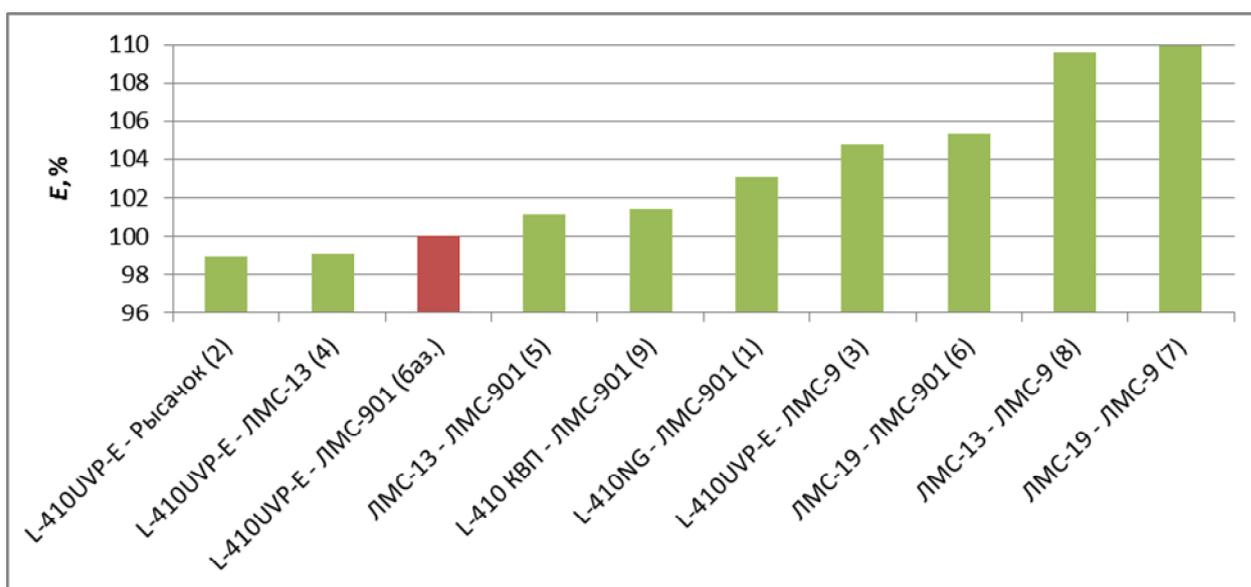


Рисунок 56 – Сравнение эффективности парка ВС для различных сценариев при условиях «частота рейсов – 5 рейсов в неделю» и «суммарное время местной поездки – не более 4 ч»

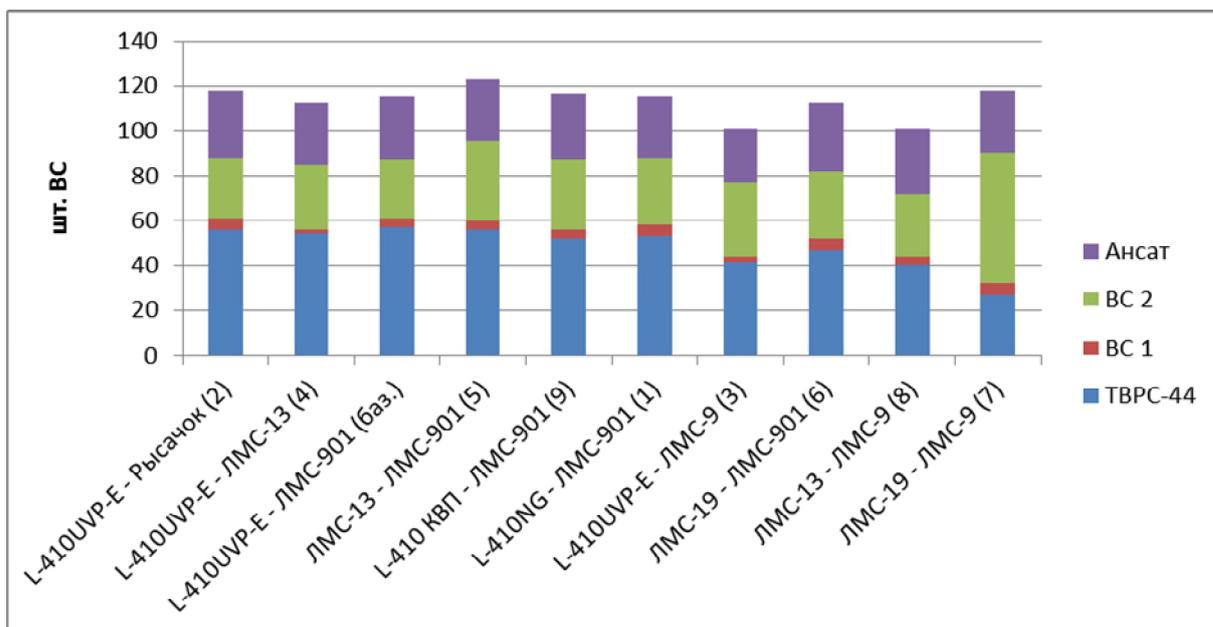


Рисунок 57 – Структура парка ВС для различных сценариев при условиях «частота рейсов – 5 рейсов в неделю» и «суммарное время местной поездки – не более 4 ч»

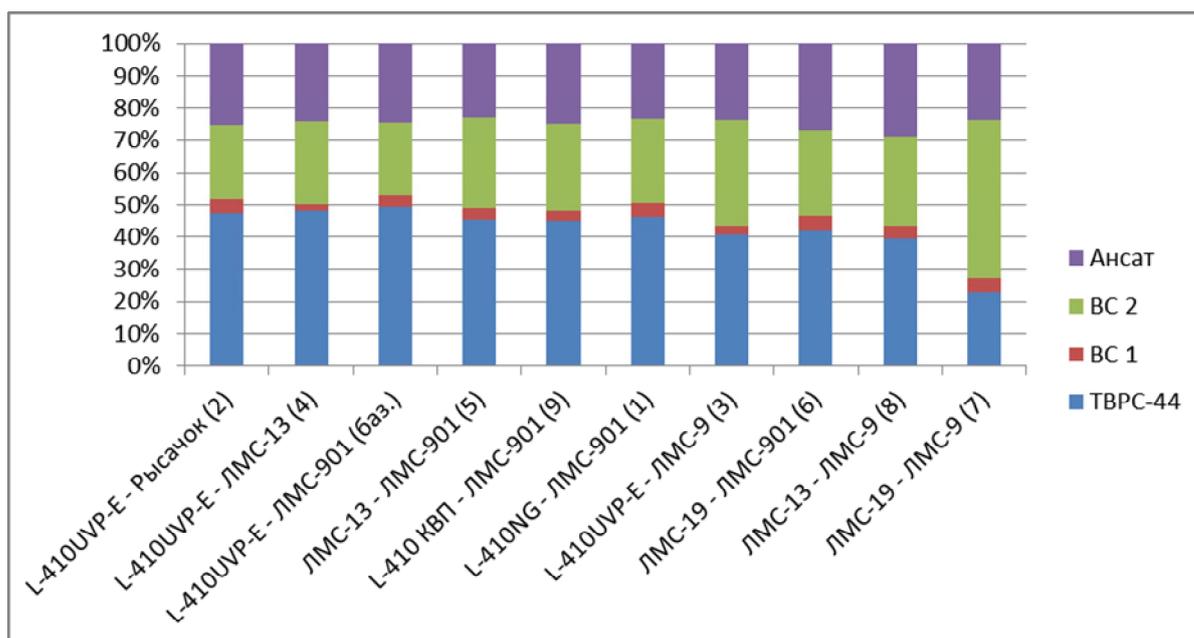


Рисунок 58 – Доли ВС в структуре парка ВС для различных сценариев при условиях «частота рейсов – 5 рейсов в неделю» и «суммарное время местной поездки – не более 4 ч»

Анализ приведённых показателей сценариев показывает, что:

- 1) Применение 19-местного самолёта L-410NG, как авиационной техники нового поколения по сравнению с самолётом L-410UVP-E, на базе которого он

разработан (сценарий «1» по отношению к базовому сценарию, рисунок 56), не приводит к существенному увеличению эффективности обеспечения транспортной доступности (рост ~3%). Это связано с малой долей 19-местных самолётов в парке (см. комментарии к рисункам 50-52). Непосредственно же рост обусловлен тремя факторами: повышением топливной экономичности двигателя, увеличением крейсерской скорости, увеличением назначенного ресурса ВС.

2) Замена в парке самолёта ЛМС-901 «Байкал» на самолёт «Рысачок» (сценарий «2» по отношению к базовому сценарию, рисунок 56) практически не приводит к изменению эффективности обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий. Данное обстоятельство следует считать косвенным подтверждением, что уровень технического совершенства самолётов ЛМС-901 и «Рысачок» одинаков и соответствует одному уровню для авиационной техники, предназначенной для выполнения местных воздушных перевозок.

3) Замена в парке ВС самолётов ЛМС-901 (сценарии «3» и «4» по отношению к базовому сценарию, рисунок 56) и L-410UVP-E (сценарии «5» и «6» по отношению к базовому сценарию, рисунок 56) на примерно соответствующие им по пассажироместимости самолёты семейства ЛМС разработки «ЦАГИ» приводит к разбросу значений эффективности обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий: от снижения на 1% до повышения на 5%. При этом наибольшее повышение эффективности достигается при одновременной замене самолётов ЛМС-901 и L-410UVP-E на самолёты семейства ЛМС (сценарии «7» и «8» по отношению к базовому сценарию, рисунок 56) – рост вплоть до 10%. Это делает семейство самолётов ЛМС привлекательным для применения на МВЛ.

Следует подчеркнуть, что, в отсутствие необходимой информации, при проведении вводилось предположение: назначенный ресурс самолётов ЛМС соответствует 20-летнему сроку службы ВС МВЛ при среднегодовом налёте ~1200 л.ч., что меньше, чем у рассматриваемого самолёта L-410NG. Однако, в силу величины достигнутого увеличения эффективности E , можно сделать вывод о преобладающем влиянии на затраты факторов крейсерской скорости и

топливной эффективности ВС. Приведённые выводы совпадают с результатами моделирования АТС МВЛ альтернативным способом [44].

4) Сопоставление сценариев «3»-«8» с базовым сценарием (рисунки 57-58) показывает, что для Республики Саха (Якутия) сочетание в парке ВС самолётов классической компоновки как «44-местный самолёт – 9-местный самолёт» является наиболее рациональным, поскольку доля 19-местных самолётов мала и практически не изменяется от сценария к сценарию, в том числе при их замене на 13-местные самолёты. Для обобщения данного вывода необходимо рассмотрение в парке ВС, как указывалось выше, самолёта пассажироместимостью более 20 и менее 40 кресел, что представляется затруднительным в силу отсутствия подобных самолётов на рынке России, а обликотные исследования выходят за рамки настоящей работы.

5) Применение в парке самолёта L-410 КВП, оснащённого РЭСУ в целях сокращения потребной длины ВПП и, следовательно, затрат на аэропортовую инфраструктуру, приводит к повышению эффективности обеспечения транспортной доступности не более чем на 1%. Помимо малой доли 19-местных самолётов в парке, причиной этого также является уменьшение транспортных возможностей самолёта (рисунок 46), и при многолетней эксплуатации подобного ВС суммарный отрицательный эффект будет сопоставим с положительным, полученным вследствие экономии затрат на создание и функционирование соответствующей аэропортовой инфраструктуры. Данный вывод совпадает с результатами, полученными ранее на основе упрощённого моделирования без учёта изменений маршрутной сети МВЛ [55].

Следует уточнить, что полученная оценка эффективности применения обдувки крыла распространяется только для 19-местные самолёты классической компоновки. В целях обобщения результата, необходимо также изучение самолётов КВП малой пассажироместимости (9 и менее пассажиров), а также рассмотрение летательных аппаратов нетрадиционной компоновки.

б) Доля вертолётов в парке ВС во всех сценариях стабильна и составляет 23-29% (рисунки 57-58) со среднегодовым налётом 320-400 лётных часов. Причиной

этому являются особенности расселения людей на труднодоступных территориях Республики Саха (Якутия), где малочисленное население проживает в разрозненных населённых пунктах, для обслуживания которых в текущих условиях целесообразно применять базирующиеся в хабах вертолётные независимо от выбора самолётов в парке.

Выводы по главе 4.

На основе разработанной методики расчёта парка ВС для обеспечения транспортной доступности труднодоступных территорий, создан ПК, с помощью которого проанализированы некоторые возможные варианты формирования парка ВС, в т.ч. для ряда перспективных ВС МВЛ.

Расчёты проводились на примере потребного парка ВС для Республики Саха (Якутия), по результатам которых выявлены:

- необходимость кратного увеличения численности парка ВС и затрат на перевозки при задании формализованных ограничений, соответствующих высокому уровню качества транспортного обслуживания пассажиров МВЛ;

- целесообразность формирования парка ВС на основе трёх типов ВС, а именно двух самолётов (44-местного и 9-местного) и одного вертолётного, и нецелесообразность включения в парк 19-местного самолёта;

- необходимость, в целях повышения транспортной доступности, включения в парк ВС скоростного самолёта пассажироместимостью более 20 и менее 40 кресел.

Общий вывод по результатам анализа расчётов (Приложение Г): отмечается схожесть рассчитанных значений показателей независимо от рассматриваемого сценария (за рядом некоторых исключений), что является следствием наличия множества локальных экстремумов оптимизируемой функции, слабо отличающихся от глобального экстремума. Как отмечалось выше, данная ситуация характерна для транспортных задач большой размерности. И поскольку показатели сценариев (а значит, и оценка эффективности E) сопоставимы между собой, это позволяет сделать вывод о достоверности полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена разработке методике выбора парка ВС, предназначенных для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий.

На основе проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведённые исследования показывают, что в настоящее время организация МВЛ не соответствует современным требованиям к местным перевозкам в части времени поездки, частоты рейсов, необходимости совершения пересадок, в т.ч. в Республике Саха (Якутия). В силу безальтернативности авиационного транспорта для многих районов труднодоступных территорий, перспективная транспортная система местных перевозок должна обеспечивать возможность совершения ежедневных местных поездок, поэтому, при существующей годовой подвижности населения, потребный парк ВС для Республики Саха (Якутия) должен включать не менее 100-120 ВС.

2. Разработана, с применением современных математических методов, методика, а на его основе – программный комплекс, позволяющий рассчитать парк ВС для повышения транспортной доступности труднодоступных территорий. Разработанный инструментарий строится на многоэтапном алгоритме приближённого решения целочисленной транспортной задачи большой размерности при формализации ограничений на время местной поездки и частоту рейсов и при выборе рациональных значений для данных ограничений, исходя из возможностей современной вычислительной техники. Ключевым шагом алгоритма является декомпозиция задачи большой размерности на подзадачи без потери точности решения вследствие введения ограничений на время местной поездки (а попутно условием, позволяющим выработать алгоритм решения).

3. Проведены расчёты с целью оценки эффективности применения для МВЛ самолёта L-410NG; самолёта ЛМС-901 «Байкал»; синтез-облик семейства самолётов ЛМС разработки ФГУП «ЦАГИ»; самолёта КВП на базе L-410 с электросиловой системой обдувки крыла. Расчёты показали, что для повышения транспортной доступности в перспективной транспортной системе местных

перевозок Республики Саха (Якутия) целесообразно применение новых самолётов семейства ЛМС с улучшенными ТЭХ. Формирование парка самолётов МВЛ целесообразно выполнять по принципу «44-местный самолёт / 9-местный самолёт» с возможностью добавления в парк самолётов с крейсерской скоростью не менее 600 км/ч и пассажироместимостью более 20 и менее 40 кресел; в последнем случае уточнение требований к подобному самолёту требует проведения дополнительных обликочных исследований, выходящих за рамки настоящей работы. Применение РЭСУ обдувки крыла на 19-местных самолётах классической компоновки, с целью уменьшения потребной длины ВПП, не приводит к заметному улучшению транспортной доступности. При этом, независимо от выбора типов самолётов, доля вертолётов в парке ВС должна составлять ~20-25%, что связано с особенностями проживания людей на труднодоступных территориях. Полученные выводы позволяют более рационально планировать разработку перспективных ВС и МВЛ в целом.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- АНЗ – аэронавигационный запас
АНО – аэронавигационное обслуживание
АТС – авиатранспортная система
ВПП – взлётно-посадочная полоса
ВС – воздушное судно
ГИС – геоинформационная система
ГСМ – горюче-смазочные материалы
КВП – короткий взлёт и посадка
ЛТХ – лётно-технические характеристики
МВЛ – местные воздушные линии
ПК – программный комплекс
РФ – Российская Федерация
РЭСУ – распределённая электросиловая установка
СТТ – служебно-техническая территория
ТОиР – техническое обслуживание и ремонт
ТЭХ – технико-экономические характеристики
MDVRP – multi-depot vehicle routing problem
TSP – travelling salesman problem
VRP – vehicle routing problem

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аэропорты и аэродромы. Сайт Федерального агентства воздушного транспорта [Электронный ресурс]. URL: http://www.favt.ru/favt_new/?q=dejatelnost/ajeroporty_i_ajerodromy/ (дата обращения: 01.10.2016-10.10.2016).
2. Вертолёт АНСАТ. Перспективы развития и модернизации. Доклад главного конструктора ОКБ ПАО «КВЗ» Гарипова А.О. Информационный проспект АО «Вертолёты России», Москва, 2019. 34 с.
3. Вертолёт Ансат. Структура себестоимости лётного часа. Информационный проспект АО «Вертолёты России», Москва, 2015. 29 с.
4. Методические рекомендации по определению себестоимости внутренних и международных рейсов для российских авиакомпаний. – М.: ГУП «Консультативно-методический центр экономики и права системы сертификации на воздушном транспорте Российской Федерации», 1999. – 84 с.
5. Объёмы перевозок через аэропорты России. Сайт Федерального агентства воздушного транспорта [Электронный ресурс]. URL: <http://favt.gov.ru/dejatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy-osnovnie-proizvodstvennie-pokazateli-aeroportov-obyom-perevoz/> (дата обращения: 11.05.2020-26.05.2020).
6. Результаты всероссийской переписи населения 2014 года, сайт Федеральной службы государственной статистики (открытые данные) [Электронный ресурс]. URL: <http://gks.ru/opendata/dataset/7708234640-ca-08-001> (дата обращения: 01.09.2016-31.01.2017).
7. «Российский статистический ежегодник 2015»: статистический сборник. – М: Росстат, 2015. – 728 с.
8. Руководство по проектированию аэропортов местных воздушных линий. – М.: Министерство гражданской авиации, Государственный проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Аэропроект», 1985.

9. Сайт Межрегиональной общественной организации пилотов и граждан-владельцев воздушных судов [Электронный ресурс]. URL: <http://maps.aopa.ru/> (дата обращения: 01.10.2016-10.10.2016).
10. Сайт Федеральной службы государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: http://www.gks.ru/bgd/regl/b10_13/isswww.exe/Stg/d1/02-01.htm (дата обращения: 01.09.2016-30.09.2016).
11. Самолёт Ан-24. Техническое описание. Эталон ГС ГА. Книга 1. – М.: ЗАО «АНТЦ «Технолог», 2001. – 75 с.
12. Самолёт «Рысачок». Техническое предложение НКФ «Техноавиа» (Москва) на конкурс, объявленный Ульяновским ВАУГА по теме: «Разработка и изготовление выпускного многодвигательного самолёта с целью последующей поставки не менее 30 воздушных судов в образовательные учреждения гражданской авиации Российской Федерации», Москва, 2007. 217 с.
13. Самолёт L-410NG. Информационный проспект компании Aircraft Industries, a.s., Na Zahonech 1177, 686 04 Куновице, Чешская республика [Электронный ресурс]. URL: <http://www.let.cz/ru/l410ng> (дата обращения: 23.06.2021).
14. Самолёт L-410UVP-E20, основные характеристики: Информационный проспект компании Aircraft Industries, a.s., Na Zahonech 1177, 686 04 Куновице, Чешская республика, 2010.
15. Самолёт «Pilatus PC-12 NG. Just the facts». Информационный проспект компании Pilatus Aircraft Ltd., P.O. Box 992, 6371 Stans, Switzerland.
16. Сервисы «Яндекс-Карты» и «Яндекс-Пробки» интернет-портала <https://yandex.ru> (дата обращения: 01.09.2016-30.12.2016).
17. Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года (утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2024 года №4146-р). [Электронный ресурс] URL: https://www.economy.gov.ru/material/directions/regionalnoe_razvitie/strategicheskoe

e_planirovanie_prostranstvennogo_razvitiya/strategiya_prostranstvennogo_razvitiya_rossii_do_2030_goda_s_prognozom_do_2036_goda. (дата обращения: 01.07.2025).

18. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года (утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 года №3363-р). [Электронный ресурс] URL: <http://www.mintrans.gov.ru/file/473193> (дата обращения: 26.06.2023).
19. Укрупнённые нормативы цены строительства. НЦС 81-02-18-2017. Сборник №18. Объекты гражданской авиации (утверждён приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской федерации №835/пр от 01.06.2017).
20. Авсеенко А.А., Кикава Н.П. Методические указания по определению величины и эффективности инвестиций в строительство аэропорта. – М: МАДИ, 2011. – 45 с.: ил.
21. Акбулатов Т.Э., Журавлёв Ю.А. Оценка эффективности различных путей развития регионального авиатранспортного комплекса РФ // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. №181. С. 5-11.
22. Антонов А.В. Системный анализ. – М.: Высшая школа, 2004. – 454 с.
23. Арепьев А.Н. Проектирование лёгких пассажирских самолётов. – М.: Изд-во МАИ, 2006. – 640 с.: ил.
24. Арепьев К.А., Ковалевский С.А., Симонов Т.Н. Обзор условий эксплуатации парка самолётов типа Ан-24 в Российской Федерации в 2017-2018 гг. // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. №28. С. 40-49.
25. Арепьев К.А., Симонов Т.Н., Гуреев Г.Г., Никитин Я.Ю. Оценка коррозионного состояния парка самолётов Ан-24, зарегистрированных в государственном реестре гражданских воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. №39. С. 32-42.
26. Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О. Формирование перспективной сети местных воздушных линий России // Вестник Казанского

- государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. № 2. С. 170-176.
27. Бардаль А.Б. Обеспечение транспортной подвижности населения в Дальневосточном федеральном округе // Уровень жизни населения регионов России. 2013. № 1 (179). С. 71-82.
28. Башун А.В. О некоторых особенностях задачи рационального базирования самолётов с ГТД для местных воздушных линий // Труды ГосНИИ ГА. Перспективы развития гражданской авиации. 1978. №160. С. 9-12.
29. Белавинцев И.А. Влияние стоимости аэропортового обслуживания на стоимость и рентабельность перевозок на внутрироссийских воздушных линиях // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2011. №1. С. 180-185.
30. Борзова А.С., Железная И.П. К вопросу о развитии региональной аэропортовой инфраструктуры // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2015. №217 (7). С. 23-26.
31. Браун Р., Мэзон Р., Фламгольц Э. и др. Исследование операций: в 2-х томах. Пер. с англ./Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. – М.: Мир, 1981. – 677 с., ил.
32. Бузулук В.И., Гуревич Б.И. Оценка эффективности использования распределённой силовой установки с электроприводом на самолёте местных воздушных линий типа Л-410 // Модели и методы аэродинамики. Материалы Девятнадцатой международной школы-семинара, Евпатория, 04-11 июня 2019 г. Изд.: Центральный аэрогидродинамический институт им. Профессора Н.Е. Жуковского, 2019. С. 39-40.
33. Вагнер С. Основы исследования операций. Том 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 329 с.
34. Васильев А.Г., Ковалёв Р.Н. Методика расчёта количества автобусов для обеспечения потребностей перевозки пассажиров междугородных рейсов // Транспорт Урала. 2011. № 1 (28). С. 19-24.

35. Васильева Е.М., Левит Б.Ю., Лившиц В.Н. Нелинейные транспортные задачи на сетях. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 104 с.
36. Виноградов Л.В., Фридман Г.М., Шебалов С.М. Математическое моделирование в оптимизации планирования авиационных перевозок: формулировки и методы решения типовых задач // Научный вестник МГТУ ГА. 2008. №132. С. 49-57.
37. Виноградов Л.В., Фридман Г.М., Шебалов С.М. Математическое моделирование в оптимизации планирования авиационных перевозок: перспективы развития и эффект от использования // Научный вестник МГТУ ГА. 2008. №132. С. 58-64.
38. Голубев И.С. Эффективность воздушного транспорта. – М.: Транспорт, 1982. – 230 с.
39. Голубев И.С., Сакач Р.В., Логинов Е.Л., Пинаев Е.Г. Исследование операций в гражданской авиации. – М.: Транспорт, 1980. – 256 с.
40. Горшкова И.В., Клочков В.В. Проблемы управления развитием малой авиации и авиатранспорта малонаселённых регионов России // Региональная экономика: теория и практика. 2014. № 47 (374). С. 36-51.
41. Горяев Н.К. Маркетинговое исследование цен на междугородные перевозки // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика. Материалы ХLI Международной научно-практической конференции. Под редакцией Б.М. Ибраева, 2017. С. 142-146.
42. Далецкий С.В., Деркач О.Я., Петров А.Н. Эффективность технической эксплуатации самолётов гражданской авиации. – М.: Воздушный транспорт, 2002. – 216 с.
43. Диброва Г.С., Лисин Е.П., Хижняк А.Н. Экономика, организация и планирование гражданской авиации: учебник для авиац. училищ. Под. ред. Г.С. Дибровы. – М.: Транспорт, 1989. – 264 с.
44. Дунаевский А.И., Егошин С.Ф., Клочков В.В. Оценка влияния основных проектных параметров самолётов на стоимость перевозок в авиатранспортной

- системе местных воздушных линий // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2021. № 9. С. 15-22.
45. Дунаевский А.И., Перченков Е.С., Чернавских Ю.Н. Взлётно-посадочные характеристики региональных самолётов с вспомогательной убираемой распределённой электрической силовой установкой // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 1. С. 19-29.
46. Дутов А.В., Клочков В.В., Рождественская С.М. Измерение и нормирование транспортной связанности и качества транспортного обслуживания страны и её регионов // Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник. ИНИОН РАН, отдел научного сотрудничества; отв. редактор В.И. Герасимов. – М.: Изд. ИНИОН РАН, 2019. – С. 43-48.
47. Егер С.М., Лисейцев Н.К., Самойлович О.С. Основы автоматизированного проектирования самолётов. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
48. Егер С.М., Мишин В.Ф., Лисейцев Н.К. и др. Проектирование самолётов. Издание третье, переработанное и дополненное. Под. ред. С.М. Егера. – М.: Машиностроение, 1983. – 616 с.
49. Егошин С.Ф. Влияние особенностей моделирования пассажирских потоков на выбор оптимального воздушного судна местных воздушных линий // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 35 (346). С. 68-79.
50. Егошин С.Ф. Оценка структуры полных затрат на пассажирские авиаперевозки в местном сообщении // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. №28. С. 80-92.
51. Егошин С.Ф. Применение летательных аппаратов вертикального взлёта и посадки для развития авиатранспортной системы местных перевозок России // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. №29. С. 46-57.
52. Егошин С.Ф., Клочков В.В. Обоснование требований к перспективным самолётам для российских межрегиональных авиалиний на среднесрочную и долгосрочную перспективы // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 41. С. 90–102.

53. Егошин С.Ф., Смирнов А.В. Авиатранспортная доступность и транспортная дискриминация населения в субъектах Российской Федерации // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2018. Т. 21 №3. С. 78-90.
54. Егошин С.Ф., Смирнов А.В. Обоснование рациональных требований к самолётам местных воздушных линий России на основе моделирования авиатранспортной системы с учётом перспективных критериев эффективности // Научный вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25. № 6. С. 40–52.
55. Егошин С.Ф., Смирнов А.В. Предварительная оценка целесообразности применения распределённых электросиловых установок на самолётах местных воздушных линий // Управление научными исследованиями и разработками: роль науки в достижении национальных целей. Труды V-ой научно-практической конференции, Москва, 04 декабря 2019. ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, НИЦ «Институт им. Н.Е. Жуковского»; под общ. ред. Дутова А.В., Новикова Д.А. – М.: Издательство «Перо», 2020. – 208 с.
56. Егошин С.Ф., Шестаков И.Н. Особенности организации местных воздушных перевозок в труднодоступных регионах // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2024. №1 (42). С. 112-123.
57. Егошин С.Ф., Шестаков И.Н., Стручкова А.М. Методика расчёта парка самолётов для повышения транспортной доступности удалённых территорий Республики Саха (Якутия) // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 47. С. 99-108.
58. Зыков А.А. Основы теории графов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 384 с.
59. Ивенина Е.М., Ивенин И.Б. Математическая постановка задач обоснования качественного состава авиационного парка // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. №157. С. 12-17.

60. Кашкан И.С., Маслаков В.П., Тукеев Д.Л. Модель формирования рациональной структуры парка воздушных судов для региональной сети воздушных линий // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. №159. С. 160-163.
61. Клочков В.В. Управление инновационным развитием гражданского авиастроения. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2009. – 280 с.
62. Клочков В.В., Топоров Н.Б., Егошин С.Ф. Интегрированные авиационные системы // Управление большими системами: сборник трудов. 2021. № 90. С. 94-120.
63. Когут Г.Г., Кузьменко В.Н. Исследование статической задачи оптимального базирования самолётного парка // Труды ГосНИИ ГА. Совершенствование планирования и прогнозирования больших технико-экономических систем. 1982. №209. С. 32-35.
64. Кубил В.Н. Обзор обобщений и расширений задачи маршрутизации транспорта // Вестник РГУПС. 2018. № 2. С. 97-109.
65. Левин О.И., Ресин Э.И., Фролова Н.В. Формирование пакета научных программ решения оптимизационных задач большой размерности // Труды ГосНИИ ГА. Вопросы математического моделирования и автоматизации научных исследований в гражданской авиации. 1985. №244. С. 19-24.
66. Лесничий И.В., Бородин М.А., Самойлов В.И., Бритван Г.А. Предложения по развитию сети региональных авиаперевозок // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2013. №3. С. 107-112.
67. ЛМС-901 «Байкал» – рабочая лошадка XXI века [Электронный ресурс]. URL: <http://ato.ru/press-releases/lms-901-baykal-rabochaya-loshadka-xxi-veka/> (дата обращения 17.07.2021)
68. Макаров Е.В. Некоторые вопросы народно-хозяйственной эффективности воздушного транспорта // Труды ГосНИИ ГА. Вопросы экономики гражданской авиации. 1969. С. 26-42.
69. Медведев А.В., Виноградов В.В. Основные направления развития местных воздушных линий гражданской авиации // Труды ГосНИИ ГА. Методические

- основы построения математических моделей технико-экономических систем гражданской авиации. 1982. №215. С. 92-96.
70. Медведев А.В., Виноградов В.В., Чурбанов М.В. Формирование сети местных воздушных линий при совместном функционировании с наземными видами транспорта //Труды ГосНИИ ГА. Вопросы комплексного планирования и регионального развития гражданской авиации. 1983. №224. С. 17-20.
71. Минтранс отложит внедрение новых требований к малым аэропортам. Портал «Росбизнесконсалтинг» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rbc.ru/business/16/10/2021/61683f039a79471839a67d1b> (дата обращения: 16.10.2021).
72. Михалевич В.С., Трубин В.А., Шор Н.З. Оптимизационные задачи производственно-транспортного планирования: Модели, методы, алгоритмы. – М.: Наука, 1986. – 264 с.
73. Панкратова А.Р. Проблемы развития авиаперевозок в дальневосточном регионе // Экономика и управление. 2015. №12 (122). С. 23-28.
74. Парыгина Д.В., Белькова Е.О. Развитие местных авиаперевозок в Амурской области // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. 2018. Т. 1. С. 92-95.
75. Пинаев В.Г., Сакач Р.В., Косиченко Е.Ф., Гладышевская Г.Н. Моделирование в планировании гражданской авиации. – М.: Транспорт, 1983. – 174 с.
76. Полешкина И.О. Методология обеспечения авиационной доступности регионов Восточной Арктики Российской Федерации. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук. Москва. 2023. 367 с.
77. Полешкина И.О. Прогнозирование пассажиропотоков социально значимых авиационных маршрутов внутри арктического региона // Экономика региона. №20 (2). С. 591-607. DOI: 10.17059/ekon.reg.2024-2-16.
78. Рабочие тетради. Выпуск 2. Локальные транспортные системы Сибири и Дальнего Востока. – [б.м.]: Издательские решения, 2018. – 322 с. ISBN 978-5-4490-9241-0

79. Рулев Г.В. Применение метода декомпозиции для решения задачи определения потребностей гражданской авиации в технических средствах (самолётный парк) // Труды ГосНИИ ГА. Перспективы развития гражданской авиации. 1979. №170. С. 48-54.
80. Русол В.А., Брусиловский В.Е., Иванов К.П., Лихачёв Б.А. Экономия ресурсов в гражданской авиации, под. ред. В.А. Русола. – М.: Транспорт, 1991. – 262 с.
81. Самойленко Н.И., Кобец А.А. Транспортные системы большой размерности. Под. ред. Н.И. Самойленко. – Х.: НТМТ, 2010. – 212 с.
82. Самойлов И.А. Алгоритм формирования требований к характеристикам перспективных магистральных самолётов на базе комплекса прогностических моделей // Труды ГосНИИ ГА. Социально-экономические и научно-технические аспекты развития гражданской авиации в СССР. 1984. №232. С. 10-19.
83. Самойлов И.А., Бородин М.А., Лесничий И.В., Самойлов В.И. Методология и результаты прогнозирования российского рынка авиаперевозок // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2008. №310. С. 40-63.
84. Самойлов И.А., Бородин М.А., Кипчарский Д.А., Страдомский О.Ю. Мониторинг состояния и потребности рынка региональных и местных авиаперевозок в современных самолётах // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2013. № 3. С. 98-106.
85. Самойлов И.А., Лесничий И.В., Бородин М.А., Кипчарский Д.А. Прогноз потребности воздушного транспорта России в парке воздушных судов малой авиации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2011. №1. С. 20-27.
86. Споткай И.И. Эффективность применения различных типов самолётов в районах Восточной Сибири и Дальнего Востока // Труды ГосНИИ ГА. Вопросы экономики гражданской авиации. 1969. №53. С. 60-67.
87. Страдомский О.Ю., Самойлов И.А., Бородин М.А., Самойлов В.И., Кипчарский Д.А. Мониторинг рынка авиаперевозок и парка воздушных судов

- российских авиакомпаний // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. №32. С. 17-28.
88. Таха Х. Введение в исследование операций: в 2-х книгах. Кн. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 496 с.
89. Фридлянд А.А., Низаметдинов Р.Р. Российские авиаперевозки: стоимость и динамика цен // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. №11. С. 59-66.
90. Фридлянд А.А., Чубуков А.П., Москаленко П.И. Анализ создания и финансирования федеральных казённых предприятий аэропортовой деятельности в северных и удалённых регионах Российской Федерации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 202. С. 80-84.
91. Фридман Г.М., Зенкова Н.А. Решение задачи расстановки парка воздушных судов по рейсам полётного расписания с помощью цепочек рейсов // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. №169. С. 56-64.
92. Чернышёв С.Л., Дунаевский А.И., Редькин А.В., Михайлов Ю.С. Формирование облика семейства легких многоцелевых самолётов для местных воздушных линий России // Полёт. Общероссийский научно-технический журнал. 2013. № 8. С. 72-79.
93. Экономика пассажирского транспорта: учебное пособие / коллектив авторов под общей ред. проф. В.А. Персианова. – М.: КНОРУС, 2012. – 400 с.
94. Aydin E., Isilak C., Süzer A., Atasoy V. Serviceability analysis of training aircraft subject to maintenance operations in a flight training organisation: a case study, International Journal of Sustainable Aviation. 2021/05/10. DOI: 10.1504/IJSA.2021.10037367.
95. Flightpath 2050. Europe's vision for aviation. ISBN 978-92-79-19724-6. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011. DOI: 10.2777/50266.
96. Jenkinson L.R., Simkin P., Rhodes D. Civil Jet Aircraft Design. – Reston, Va.: AIAA, 1999. – 418 p.

97. Kubil V., Mokhov V., Grinchenkov D. Modeling the Generalized Multi-objective Vehicle Routing Problem Based on Costs // Proceedings of the 6th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAIIIT). 2018. Pp. 29-35.
98. Toth P., Vigo D. The Vehicle Routing Problem. SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002. xviii+358 p.

Приложение А

Сравнение фактического и расчётного времени перелёта самолёта L-410 на МВЛ

Линия МВЛ	L^1	$t_{\text{ФАКТ}}^2$	$t_{\text{РАСЧ}}^3$	Δ^4
	км	часы	часы	часы
Орск – Домбаровский	70	0,5	0,5	0
Светлый – Домбаровский	98	0,5	0,5	0
Николаевск-на-Амуре – Херпучи	124	0,7	0,7	0
Тигиль – Палана	160	0,7÷0,8	0,8	0
Орск – Светлый	164	1,3	0,8	-0,5
имени Полины Осипенко – Херпучи	169	0,5÷0,7	0,8	0,1
Тигиль – Усть-Хайрюзово	171	0,7÷1,0	0,7	0
Вуктыл – Ухта	174	0,6	0,8	0,2
Оссора – Палана	182	0,8	0,8	0
Петропавловск-Камчатский – Соболево	207	0,9÷1,0	0,9	0
Оссора – Тиличики	211	0,9	0,9	0
Петропавловск-Камчатский – Озёрная	226	0,9÷1,0	1,0	0
Кослан – Сыктывкар	227	0,8	1,0	0,2
Оренбург – Орск	232	0,8	1,0	0,2
Маган – Сангар	233	0,7÷0,8	0,9	0,1
Никольское – Усть-Камчатск	241	0,8÷1,1	1,0	0
Комсомольск-на-Амуре – Хабаровск	244	1,2	1,0	-0,2
Сыктывкар – Ухта	261	0,9	1,1	0,2
Надым – Салехард	301	1,0÷1,3	1,2	0
Сыктывкар – Троцко-Печорск	302	1,1	1,2	0,1
Усинск – Ухта	322	1,2÷1,3	1,3	0
Нижнеангарск – Таксимо	336	1,2	1,3	0,1
Газимурский завод – Чита	353	1,5	1,3	-0,2
Советская Гавань – Хабаровск	358	1,3÷1,4	1,4	0
Маган – Хандыга	372	1,2	1,4	0,2
Николаевск-на-Амуре – Чумикан	390	1,5	1,4	-0,1
Комсомольск-на-Амуре – Николаевск-на-Амуре	398	1,6	1,5	-0,1
Аян – Николаевск-на-Амуре	400	1,5	1,5	0
Вуктыл – Сыктывкар	407	1,4	1,5	0,1
Нижнеудинск – Усть-Илимск	420	1,3	1,5	0,2
Сыктывкар – Усть-Цильма	423	1,5	1,5	0
Петропавловск-Камчатский – Усть-Камчатск	437	1,6÷1,7	1,6	0
Иркутск – Нижнеудинск	438	1,4÷1,5	1,6	0,1
Виллойск – Маган	438	1,4÷1,5	1,5	0
Кодинск – Красноярск	445	1,8	1,6	-0,2
Новый Уренгой – Салехард	446	1,3÷1,5	1,6	0,1
Петропавловск-Камчатский – Усть-Хайрюзово	450	1,9÷2,0	1,6	-0,3
Алдан – Маган	451	1,5	1,5	0
Нижнеангарск – Улан-Удэ	456	1,5÷1,7	1,6	0
Архангельск – Котлас	477	1,8	1,7	-0,1
Подкаменная Тунгуска – Туруханск	479	1,8	1,7	-0,1
Иркутск – Казачинск	487	1,3÷1,8	1,7	0
Верхневиллойск – Маган	495	1,8	1,7	-0,1
Печора – Сыктывкар	496	1,7	1,8	0,1

Петропавловск-Камчатский – Тигиль	513	1,7	1,8	0,1
Салехард – Тарко-Сале	543	2,3	1,9	-0,4
Ноябрьск – Салехард	557	1,7	1,9	0,2
Богородское – Хабаровск	567	1,8÷2,0	1,9	0
Красноярск – Подкаменная Тунгуска	619	2,3	2,1	-0,2
Николаевск-на-Амуре – Хабаровск	642	2,2÷2,5	2,2	0
Сыктывкар – Инта	676	2,3	2,3	0
Таксимо – Улан-Удэ	686	2,3÷2,7	2,3	0
Петропавловск-Камчатский – Палана	663	2,0	2,2	0,2

Примечания:

¹ – ортодромическая дальность авиалинии;

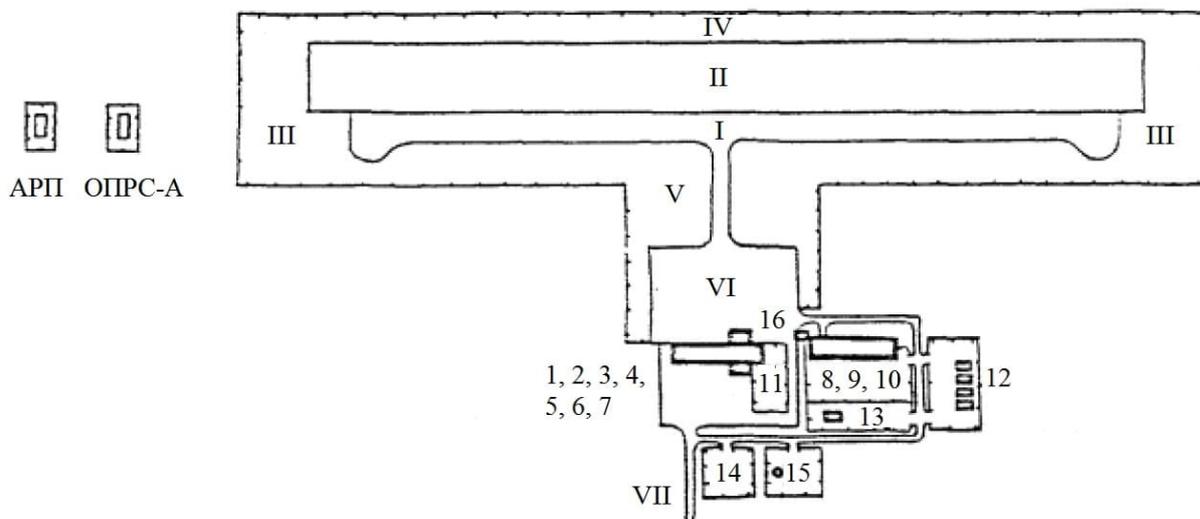
² – фактическое время выполнения рейса (указан диапазон времени в расписании);

³ – расчётное время выполнения рейса;

⁴ – минимальная разница во времени (абсолютная погрешность): отрицательный знак означает превышение фактического времени над расчётным, положительный – расчётного над фактическим.

Приложение Б

Примерная схема генерального плана аэропорта III категории [8]

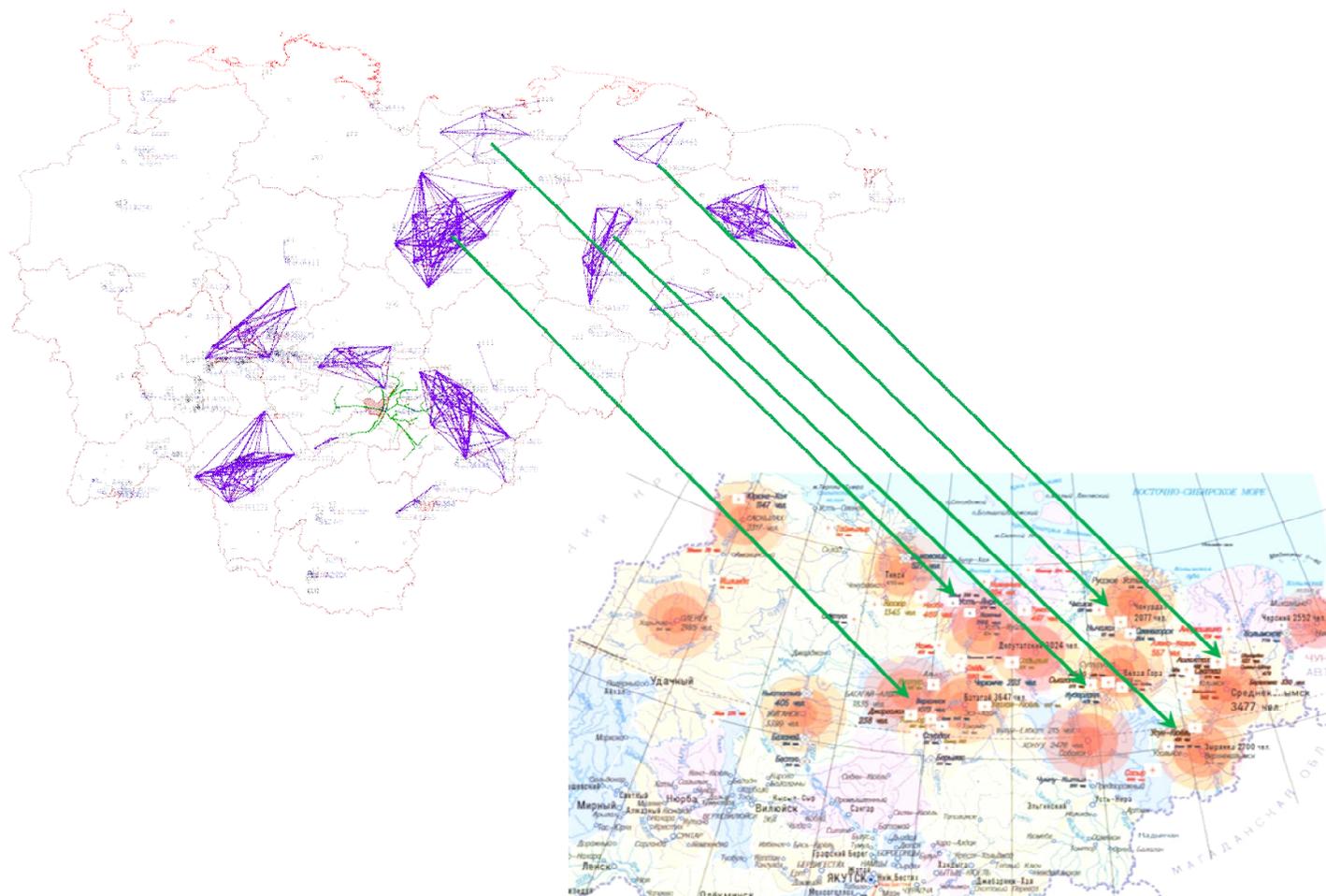


Аэродром: I – ВПП с искусственным покрытием; II – ВПП с грунтовым покрытием (возможный вариант); III – концевая полоса безопасности; IV – боковая полоса безопасности; V – рулёжная дорожка; VI – перрон; VII – привокзальная автодорога;

СТТ: 1 – аэровокзал; 2 – контрольно-диспетчерский пункт; 3 – помещение для технических бригад; 4 – помещение длительного ожидания пассажиров; 5 – профилакторий; 6 – грузовой склад с отделением перевозки почты; 7 – помещение административного и управленческого персонала; 8 – база аэродромной службы; 9 – сооружения службы спецтранспорта; 10 – сооружения аварийно-спасательной службы; 11 – склад материально-технического имущества; 12 – склад ГСМ; 13 – котельная; 14 – антенное поле; 15 – участок водопроводных сооружений; 16 – контрольно-пропускной пункт;

Прочие сооружения: АРИ – автоматический УКВ-радиопеленгатор; ОПРС-А – отдельная приводная радиостанция.

Приложение В Соответствие кластеров целесообразного применения вертолётов



Фиолетовым цветом на карте слева отображены кластеры, рассчитанные в рамках ГИС ПК, белыми квадратами на карте справа – существующие и проектируемые посадочные полосы (вертолётные площадки) [76]

Приложение Г

Рассчитанные показатели рассматриваемых сценариев при условиях «частота рейсов – 5 рейсов в неделю» и «суммарное время местной поездки – не более 4 часов»

	ед. изм.	Сценарии									
		Базовый	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	%	100,0									
Парк ВС (включая вертолёты)	шт.	115	115	118	101	112	123	112	118	101	116
ТВРС-44											
Количество ВС в парке		57	53	56	41	54	56	47	27	40	52
Доля в парке	%	49,6	46,1	47,4	40,5	48,2	45,5	42,0	22,9	39,6	44,8
Кол-во парных рейсов	шт./нед.	275	300	310	200	300	295	250	145	200	290
Налёт парка	л.ч./нед.	1464	1340	1368	1105	1345	1335	1133	628	1137	1312
Среднегодовой налёт ВС	л.ч.	1336	1314	1270	1401	1295	1240	1254	1209	1478	1312
Средневзвешенная* протяжённость рейса	км	1160	1025	1012	1206	1029	1039	1040	995	1225	1039
Средневзвешенная* продолжительность рейса	ч.	2,66	2,23	2,21	2,76	2,24	2,26	2,27	2,17	2,84	2,26
Заполняемость салона		0,26	0,20	0,23	0,27	0,20	0,21	0,24	0,33	0,33	0,21
ВС 1 типа											
Количество ВС в парке	шт.	4	5	5	3	2	4	5	5	4	4
Доля в парке	%	3,5	4,3	4,2	3,0	1,8	3,3	4,6	4,2	4,0	3,4
Кол-во парных рейсов	шт./нед.	20	30	30	10	5	30	30	25	30	20
Налёт парка	л.ч./нед.	46	58	58	21	9	54	58	76	54	55
Среднегодовой налёт ВС	л.ч.	598	603	603	364	234	702	603	790	702	715
Средневзвешенная* протяжённость рейса	км	397	382	331	361	316	359	382	600	359	474
Средневзвешенная* продолжительность рейса	ч.	1,15	0,97	0,97	1,05	0,90	0,90	0,97	1,52	0,90	1,38
Заполняемость салона		0,64	0,64	0,61	0,75	0,88	0,81	0,64	0,69	0,81	0,69
ВС 2 типа											
Количество ВС в парке	шт.	26	30	27	33	29	35	30	58	28	31
Доля в парке	%	22,6	26,1	22,9	32,7	25,9	28,5	26,8	49,2	27,7	26,7
Кол-во парных рейсов	шт./нед.	150	185	185	210	210	200	215	365	210	195
Налёт парка	л.ч./нед.	593	633	515	881	519	702	855	1342	624	635

Среднегодовой налёт ВС	л.ч.	1186	1097	992	1388	931	1043	1482	1203	1159	1065
Средневзвешенная* протяжённость рейса	км	541	509	517	751	487	522	592	727	556	484
Средневзвешенная* продолжительность рейса	ч.	1,98	1,71	1,39	2,10	1,24	1,76	1,99	1,84	1,49	1,63
Заполняемость салона		0,57	0,43	0,42	0,65	0,37	0,44	0,41	0,41	0,52	0,46
Вертолёт «Ансат»**											
Количество ВС в парке	шт.	28	27	30	24	27	28	30	28	29	29
Доля в парке	%	24,3	23,5	25,4	23,8	24,1	22,8	26,8	23,7	28,7	25,0
Налёт парка	л.ч./нед.	170	208	226	161	200	175	192	198	193	198
Среднегодовой налёт ВС	л.ч.	316	401	392	349	385	325	333	368	346	355
Инфраструктура											
А/д (аэродромы)	шт.										
в т.ч. существующие а/д, используемые ТВРС-44		20	21	22	17	21	21	21	16	18	21
-//- с удлинением ВПП, используемые ТВРС-44		20	18	19	14	18	18	12	5	14	18
новые а/д, используемые ТВРС-44		23	17	17	14	17	17	14	5	15	16
в т.ч. существующие а/д, используемые ВС 1 типа		2	3	3	2	1	3	3	3	3	2
-//- с удлинением ВПП, используемые ВС 1 типа		0	1	0	0	0	0	1	1	0	1
новые а/д, используемые ВС 1 типа		1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
существующие а/д, используемые ВС 2 типа		20	16	2	31	10	17	19	36	25	17
-//- с удлинением ВПП, используемые ВС 2 типа		7	6	20	3	15	7	6	2	2	6
новые а/д, используемые ВС 2 типа		9	12	12	20	14	13	15	24	16	12
П/п (вертолётные посадочные площадки)	шт.	55	67	75	51	64	62	68	67	65	68

* – вес – количество рейсов

** – приводятся оценочные значения показателей парка