

Министерство образования и науки РФ
Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный
аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»

На правах рукописи



Цейтлина Татьяна Олеговна

**МЕТОД ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СЕТИ
ВНУТРИРОССИЙСКИХ МАГИСТРАЛЬНЫХ АВИАЛИНИЙ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ НЕЧЁТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И
НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка
информации (авиационная и ракетно-космическая техника)»

Диссертация

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Смирнов Андрей Валентинович,

кандидат технических наук, доцент

Москва – 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. АНАЛИЗ СЕТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ АВИАЛИНИЙ РОССИИ	10
1.1 Тенденции развития сети магистральных авиалиний России.....	11
1.2 Безмасштабная природа сети магистральных авиалиний России	21
1.3 Классификация и этапы развития магистральных авиалиний России.....	31
Глава 2. ЗАДАЧА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СЕТИ ВНУТРИРОССИЙСКИХ МАГИСТРАЛЬНЫХ АВИАЛИНИЙ	41
2.1 Формализация понятия «авиалиния существует»	43
2.2 Параметры, определяющие существование прямого авиасообщения между городами ...	51
2.3 Методы и программные технологии для реализации модели «условий существования» авиалинии	58
Глава 3. РАЗРАБОТКА НЕЧЁТКОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ «УСЛОВИЙ СУЩЕСТВОВАНИЯ» АВИАЛИНИИ	66
3.1 Формирование обучающей выборки	67
3.1.1 Состав переменных для элемента обучающих данных.....	68
3.1.2 Состав множества элементов обучающей выборки	73
3.2 Построение нейросетевой модели	78
3.2.1 Генерация структуры и обучение нейронной сети.....	79
3.2.2 Математическое описание модели	84
3.2.3 Содержательная интерпретация предпосылок нечётких правил и результата нечёткого вывода модели	88
3.3 Точность и адекватность модели	96
Глава 4. ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ СЕТИ ВНУТРИРОССИЙСКИХ МАГИСТРАЛЬНЫХ АВИАЛИНИЙ	105
4.1 Формирование вариантов развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний	106
4.2 Анализ результатов прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний	117
Заключение	124
Список сокращений и условных обозначений	126
Список литературы	127
Приложение А (справочное) Список аэропортов РФ	134
Приложение Б (справочное) Значения используемых параметров городов РФ	140
Приложение В (справочное) Определение значений параметра «численность населения»	146

ВВЕДЕНИЕ

Объект и предмет исследования

Объектом исследования является сеть внутрироссийских магистральных авиалиний. Рассматриваются аэропорты России и соединяющие их авиалинии. Предметом исследования являются процессы трансформации сети внутрироссийских магистральных авиалиний, а также факторы, определяющие будущее развитие этой сети.

Актуальность работы

Прогнозирование развития сети авиалиний является одной из актуальных задач в области исследования авиатранспортной системы страны. В 70-е – 80-е гг. в СССР проводились многочисленные и разнообразные работы по исследованию и прогнозированию развития его авиатранспортной системы. Наиболее известными из них являются исследования, проводившиеся в ГосНИИ ГА, – это работы Р.В. Сакача, Е.Г. Пинаева, Е.Ф. Косиченко, Б.Е. Лужанского, В.П. Кошкина, И.А. Самойлова, А.А. Соколова, М.А. Курилец.

Группой сотрудников ГосНИИ ГА под руководством А.А. Соколова [1, 2] был проведён цикл исследований, посвящённых проблеме прогнозирования распределённого спроса на авиаперевозки. Исследовалось влияние социально-экономических факторов на формирование пассажиропотоков. С использованием метода факторного анализа разработана модель для прогнозирования пассажирских авиаперевозок в стране. Для формирования оптимальной структуры перспективного парка пассажирских самолётов И.А. Самойловым [3, 4] был предложен подход к формированию расчётной сети авиалиний на базе прогнозной информации по авиакорреспонденциям. Это позволило существенно повысить точность решения задачи.

Значительный вклад в решение задач прогнозирования перевозок пассажиров на воздушном транспорте внесли А.М. Андронов, А.Н. Хижняк, И.Е. Швацкий, А.А. Фридлянд. Среди работ последнего времени можно отметить работы В.П. Алексева, Б.В. Артамонова, В.В. Балашова, Б.Х. Давидсона, А.В. Климина, В.В. Клочкова, С.К. Колпакова, Г.А. Павловца, И.А. Самойлова, В.И. Самойлова, Н.А. Селивановой, А.В. Смирнова, О.Ю. Страдомского, А.Ю. Уджуху, в которых рассматриваются вопросы исследования и прогнозирования авиаперевозок, анализа конкурентоспособности перспективных воздушных судов (ВС) на сети авиалиний.

Значительное количество зарубежных исследований, посвящённых анализу развития структуры авиационной транспортной системы [5 – 14], сосредоточено на изучении

топологических и метрических свойств маршрутных сетей (аэропортов и связей между ними). Работы ведутся в трёх основных направлениях: рассмотрение пространственных характеристик топологии сети авиалиний без учёта развития сети во времени; выявление и изучение изменений топологии сети авиалиний во времени; изучение динамики потоков (пассажиров, грузов и др.) на сети авиалиний.

Методы прогнозирования развития сети авиалиний занимают значительное место в методиках прогнозирования рынка ВС зарубежных производителей авиационной техники. В прогнозах Airbus [15] и Boeing [16] специально указывается на то, что учёт предполагаемых изменений сети авиалиний в различных регионах мира существенно повышает качество и обоснованность прогнозов.

Обеспечение конкурентоспособности отечественной авиационной техники требует создания новых эффективных технологий. Оценка эффективности новых авиационных технологий связана с определением их вклада в улучшение эксплуатационных характеристик ВС. При этом важно не только определить, насколько разрабатываемая технология повлияет на те или иные характеристики перспективных летательных аппаратов (ЛА), но и проанализировать, как её использование в конструкции ЛА отразится в будущем на уровне безопасности, доступности и качестве услуг воздушного транспорта, степени его воздействия на окружающую среду. Оценка эффективности разрабатываемых технологий должна выполняться с учётом тенденций и темпов развития авиаперевозок. Объёмы и структура будущих авиаперевозок определяют не только потребности авиакомпаний в поставках ВС различного типа, но и масштаб полезности разрабатываемых в настоящее время технологий. Нужны такие модели, которые позволят сформировать сценарии развития авиаперевозок, спрогнозировать интенсивность движения самолётов различных классов на сети авиалиний.

Основной проблемой при решении многих задач в области исследования и прогнозирования пассажирских авиаперевозок является проблема прогнозирования пассажиропотоков. Традиционно существуют два подхода к прогнозированию пассажиропотоков.

- 1) *Использование трендовых методов.* При использовании трендовых методов рассматриваются изменения объёмов пассажиропотоков на сложившейся стационарной сети авиалиний. При этом исключается появление новых авиасвязей между населёнными пунктами. Такой подход хорош для решения широкого круга задач (например, для определения спроса на авиаперевозки или оценки потребного парка ВС), однако он не годится для формирования требований к летательному аппарату или оценки эффективности его использования, особенно в случае развивающейся структуры сети авиалиний. Использование линейных трендовых моделей сопряжено со

значительными трудностями при прогнозировании развития пассажиропотоков в долгосрочной перспективе.

- 2) *Построение эмпирических или регрессионных моделей.* Применение таких моделей предполагает существование функциональной зависимости объёма пассажиропотока от небольшого количества параметров (чаще всего социально-экономического характера) для любой пары населённых пунктов (или регионов). Как правило, используются гравитационные и двухфакторные регрессионные (например, рекомендованная ИКАО [17]) модели. При прогнозировании пассажиропотоков рассматриваются все возможные пары населённых пунктов (или регионов). Указанные модели отличаются простотой построения и способностью отражать изменения в структуре сети авиалиний. Однако возможности данных моделей ограничены фиксированным видом функциональной зависимости. Определённые трудности построения моделей связаны с одной стороны, с необходимостью выделения значимых факторов, оказывающих влияние на объём пассажиропотоков между населёнными пунктами, а с другой стороны, с невозможностью использования в модели большего количества параметров для описания этих факторов.

Анализ работ, посвящённых проблемам прогнозирования авиаперевозок, позволяет предположить, что процесс развития пассажиропотоков и процесс развития сети авиалиний несколько отличаются друг от друга: авиалинии и пассажиропотоки определяются разными (как по составу, так и по количеству) измеряемыми параметрами и, по-видимому, описываются разными функциональными зависимостями. Возможно, это и затрудняет создание модели для прогнозирования пассажиропотоков, учитывающей динамику развития сети. Для устранения этой проблемы задачу прогнозирования пассажиропотоков необходимо решать в два этапа. На первом этапе решать задачу прогнозирования развития сети авиалиний (без пассажиропотоков). А на втором этапе – задачу распределения прогнозного спроса на пассажирские авиаперевозки по авиалиниям сформированной сети.

В настоящей работе рассматривается решение задачи только первого этапа: решается вопрос о существовании либо отсутствии авиалиний. Используется эмпирический метод наряду с современными вычислительными технологиями (нейросетевое программирование и нечёткое моделирование), которые позволяют значительно расширить число переменных и не задавать для них вид функциональной зависимости. Анализ развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний позволяет сформулировать гипотезу о существовании *универсальных* правил, в соответствии с которыми происходит возникновение и исчезновение авиалинии (прямого авиасообщения между городами) в сети. Решение проблемы поиска таких правил

позволяет создать универсальную модель и дать ответ на вопрос о том, какие пары городов будут связаны между собой прямым авиасообщением в будущем.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью работы является повышение качества и обоснованности долгосрочного прогнозирования развития пассажирских авиаперевозок. Для достижения этой цели на этапе прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний в диссертации были поставлены следующие научные задачи:

1. провести анализ принципов формирования существующей сети внутрироссийских магистральных авиалиний;
2. выявить параметры, определяющие наличие или отсутствие прямого авиасообщения между двумя городами/аэропортами;
3. построить модель «условий существования» прямого авиасообщения между городами/аэропортами рассматриваемой сети;
4. провести анализ полученной модели и определить границы её применимости;
5. построить прогноз развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний на основе данных социально-экономических и демографических прогнозов развития страны.

Методы исследования

В диссертационной работе использовались методы системного анализа, теории сложных сетей, нечёткой логики, нечёткого моделирования, нейросетевого моделирования, компьютерного моделирования.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе, подтверждается использованием аппаратов математической статистики; адекватностью разработанной информационной модели на данных, не использованных при её создании; непротиворечивостью полученных результатов с существующими представлениями о функционировании и развитии авиатранспортных сетей.

Научная новизна результатов исследования состоит в применении методов системного анализа, нечёткой логики и нейросетевого моделирования для исследования закономерностей построения и долгосрочного прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний. На защиту выносятся следующие результаты, определяющие новизну и научную значимость исследования (*в скобках указаны соответствующие пункты паспорта специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (авиационная и ракетно-космическая техника)»*):

1. Новый подход к решению задачи прогнозирования развития сети магистральных авиалиний. В основе подхода лежит гипотеза о том, что существование прямого авиасообщения между городами определяется набором универсальных правил, не зависящих явно от времени и не привязанных к конкретной паре городов. В отличие от традиционных подходов, использующих трендовые, регрессионные или эмпирические модели, для решения рассматриваемой задачи выбран подход «чёрного ящика» (*пп. 2, 4*).
2. Закономерности развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний, выявленные на основе анализа развития сети как сложной системы. Сеть авиалиний обладает основными свойствами, характерными для безмасштабных графов, процесс её развития происходит в соответствии с механизмами предпочтительного присоединения и ассортативности (*пп. 8, 12*).
3. Модель «условий существования» авиалинии, созданная как система нечёткого вывода. Основу модели составляют нечёткие правила, определяющие наличие или отсутствие прямого авиасообщения между городами России. Модель создана с помощью нейросетевых технологий на основе статистических данных о параметрах городов, пар городов и наличии прямого авиасообщения между ними (*п. 3*).
4. Метод долгосрочного прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний, учитывающий возможные изменения социально-экономических параметров регионов страны и целевые параметры развития инфраструктуры наземного и воздушного транспорта. Метод предназначен для моделирования развития коммуникационного ядра сети на основе прогнозных значений параметров городов и пар городов (*пп. 3, 11*).

Практическая значимость

Диссертация обладает практической значимостью. В работе разработан метод долгосрочного прогнозирования развития сети магистральных авиалиний, осуществлён прогноз развития структуры сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 г. для трёх сценариев социально-экономического развития страны (инерционного, энерго-сырьевого и инновационного). Полученные результаты (в совокупности с прогнозированием уровней пассажиропотоков на прогнозной сети авиалиний) позволяют эффективно решать ряд прикладных задач в области исследования перспектив развития гражданской авиационной техники, в частности:

- оценка эффективности новых авиационных технологий;
- формирование рациональных технических требований к перспективным ВС;

- сравнительный анализ различных концепций перспективных ВС;
- прогнозирование потребного парка ВС.

Апробация работы

Результаты и основные положения диссертационной работы докладывались автором и обсуждались на следующих научных конференциях: 9-я и 10-я международные научно-технические конференции «Research and Education in Aircraft Design (READ)» (Варшава, 2010 г., Брно, 2012 г.); XVII и XVIII международные молодёжные научные конференции «Туполевские чтения» (Казань, 2009, 2010 гг.); IV международная молодёжная научная конференция «Гражданская авиация: XXI век» (Ульяновск, 2012 г.); 45-е, 46-е, 47-е и 49-е Научные чтения памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 2010-2012, 2014 гг.); VII Московская международная конференция по исследованию операций (ORM'2013) (Москва, 2013 г.).

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в пятнадцати работах: четыре статьи [18 – 21] в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, одна статья [22] в зарубежном издании, индексируемом в базе данных Scopus, и десять работ [23 – 32] в трудах и сборниках материалов научных конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Содержание работы изложено на *133* машинописных страницах, включая *67* рисунков и *31* таблицу. Список литературы включает *81* наименование.

Аннотация

В первой главе рассмотрена информационная база исследования сети внутрироссийских магистральных авиалиний; проанализировано развитие сети с 1992 по 2008 гг.; выявлены принципы построения и развития сети – показано, что авиатранспортная сеть России по своей структуре близка к безмасштабной сети (имеет основные свойства, характерные для безмасштабных сетей), а процесс её развития происходит в соответствии с закономерностями, свойственными безмасштабным графам – механизмами предпочтительного присоединения и ассортативности; проведена классификация авиалиний и определены этапы их развития.

Во второй главе решение задачи прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний сводится к решению задачи прогнозирования существования прямого авиасообщения между двумя городами из заданной совокупности. Формализуется нечёткое понятие «авиалиния существует» с учётом стабильности существования, направления и темпа развития авиасвязи между двумя городами. Формируются значения выходной

переменной. Рассматриваются факторы, характеризующие существование прямого авиасообщения между двумя городами и определяющие их измеряемые параметры. Обосновывается выбор методов и программных технологий, используемых в работе.

В третьей главе устанавливается, что в рассматриваемой сети существование авиалинии определяется главным образом целевым потенциалом одного из городов в паре. Формируется состав входных переменных модели «условий существования» авиалинии (модели УСА): 6 переменных, характеризующих возможности транспортной инфраструктуры пары городов, целевой потенциал главного города и генерационные возможности другого (с более низким целевым потенциалом) города в паре. С помощью методики самоорганизующихся карт Кохонена формируется обучающая выборка, обладающая наибольшей информативностью. В рамках системы нечёткого вывода создаётся модель УСА. Основу системы составляют 6 нечётких правил, частично им даётся смысловая интерпретация. Анализируется точность построенной модели, уточняется область её применимости.

В четвертой главе рассматриваются сценарии социально-экономического развития России; формируются варианты прогнозных значений входных переменных модели УСА; для трёх сценариев развития страны на основе социально-экономических и демографических прогнозов её развития проводится прогнозирование развития коммуникационного ядра сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 г.; исследуются статистические свойства прогнозов; обсуждаются результаты прогнозирования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СЕТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ АВИАЛИНИЙ РОССИИ

Сеть авиалиний является неотъемлемой частью авиатранспортной системы России. В состав сети входят авиалинии разного вида. В настоящее время в России отсутствует строгая общепринятая классификация авиалиний. В соответствии с принятыми в государственной статистике видами сообщений для авиационного транспорта (международное и внутреннее, включая местное) может быть предложена следующая классификация авиалиний России:

- международная авиалиния – авиалиния, у которой хотя бы один аэропорт находится за пределами территории страны;
- внутрироссийская авиалиния – авиалиния, у которой оба аэропорта находятся на территории страны:
 - межрегиональная магистральная авиалиния – авиалиния, у которой аэропорты находятся в разных федеральных округах;
 - внутрирегиональная магистральная авиалиния – авиалиния, у которой оба аэропорта находятся на территории одного федерального округа;
 - местная воздушная линия – авиалиния, у которой оба аэропорта находятся на территории одного субъекта Федерации.

В настоящей работе рассматривается сеть внутрироссийских магистральных авиалиний. Использование магистральных авиалиний во внутреннем авиасообщении является следствием больших размеров территории России. Сеть внутрироссийских магистральных авиалиний является частью мировой сети магистральных авиалиний и связана с ней посредством международных авиалиний. Однако сеть внутрироссийских магистральных авиалиний, как и сеть внутренних авиалиний любой другой страны, развивается в значительной степени обособлено. Поэтому в работе её развитие будет рассмотрено отдельно от мировой сети магистральных авиалиний.

Развитие сети магистральных авиалиний неразрывно связано с растущим спросом на авиаперевозки в стране. Спрос на авиаперевозки характеризуется не только объёмом (количеством пассажиров и грузов), но и разнообразием целей (направлений) полёта. Достижение полного удовлетворения (и по объёму, и по набору направлений прямого сообщения) спроса на авиаперевозки сдерживается возможностями авиакомпаний в организации экономически целесообразной деятельности по оказанию транспортных услуг

населению, предприятиям экономики, государственным и общественным организациям. Осуществление прямого воздушного сообщения между двумя городами/аэропортами не всегда экономически оправдано. Существующая сеть магистральных авиалиний, представляющая собой совокупность (перечень) пар городов/аэропортов, связанных прямым воздушным сообщением, является отражением компромисса, сложившегося при столкновении потребностей пассажиров с возможностями авиакомпаний.

Развитие сети магистральных авиалиний представляет собой процесс установления прямого авиасообщения для новых пар городов/аэропортов и исключения из перечня тех пар городов, для которых прямое авиасообщение оказалось прерванным. В целях понимания современного состояния и особенностей развития сети магистральных авиалиний России в работе были выполнены следующие исследования:

- анализ современных тенденций развития сети;
- выявление принципов построения и развития сети;
- анализ этапов развития и классификация авиалиний в сети.

1.1 Тенденции развития сети магистральных авиалиний России

Коренные изменения, которые произошли в политическом и экономическом устройстве России на протяжении 1990-х гг., привели к кардинальной перестройке экономических моделей хозяйствования предприятий воздушного транспорта. Эти изменения не могли не сказаться на объёме и структуре платёжеспособного спроса населения на авиатранспортные услуги. Анализ данных с 1992 по 2011 гг. о годовом пассажиропотоке на внутрироссийских авиалиниях (рисунок 1.1)¹ позволяет выделить три периода, характерных для развития авиаперевозок и авиатранспортной системы страны в целом в это время.

Кризисный период – период с 1992 г. по 1996 г., характеризующийся резким (на десятки процентов в год) снижением показателей авиаперевозок. В этот период происходило стремительное разрушение созданной в СССР авиатранспортной системы.

Переходный период – период с 1996 г. по 2000 г. со значительно более медленным темпом изменения показателей, свидетельствующим о стабилизации авиаперевозочного процесса. В этот период закладывались новые принципы развития авиатранспортной системы страны.

Период восстановления – период, начиная с 2000 г., характеризующийся устойчивым ростом показателей авиаперевозок. В этот период происходило формирование тенденций, в

¹ Приведены данные о перевезённых пассажирах (млн. человек) регулярными авиаперевозчиками во внутреннем (включая местное) / междугороднем сообщении [77 – 81]

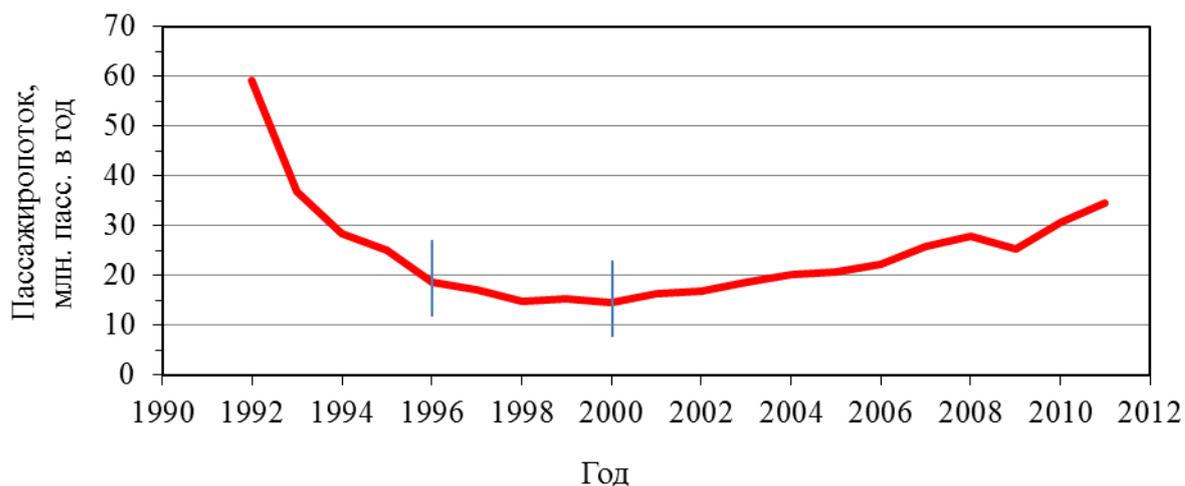


Рисунок 1.1 – Годовой пассажиропоток на внутренних авиалиниях России за период с 1992 по 2011 гг.

соответствии с которыми, по-видимому, будет в дальнейшем происходить последующее развитие авиатранспортной системы страны.

Если сложившиеся в стране экономические условия в обозримом будущем кардинально не изменятся, то сформировавшиеся тенденции развития авиатранспортной системы в целом и авиатранспортной сети в частности сохранятся. Это позволяет для прогнозирования дальнейшего развития авиатранспортной сети России использовать методы исследования систем в условиях устойчивого развития.

В качестве информационной базы для исследования тенденции развития сети магистральных авиалиний России были использованы расписания движения воздушных судов, ежегодно формируемые Центром расписаний и тарифов (ЦРТ) Федерального агентства воздушного транспорта (ФАВТ) Российской Федерации. На основе расписаний полётов за период с 1992 по 2008 гг. был проведён анализ тенденций развития сети магистральных авиалиний России. При анализе развития сети за период с 1992 по 2000 гг. использовались результаты исследований [33 – 37]. В работе рассматривается ограниченная сеть внутрироссийских магистральных авиалиний из 145 аэропортов (Приложение А), рассматриваются только магистральные авиалинии, местные авиалинии исключены из рассмотрения.

В центральных и южных регионах Европейской части страны складывается система из небольшого числа аэропортов в городах Москва, С.-Петербург и ещё 5-6 аэропортах региональных центров. Вблизи этих центров местные авиаперевозки практически отсутствуют, поскольку авиапассажиры для того, чтобы попасть в центральный аэропорт, пользуются автомобильным и железнодорожным транспортом, который в этих регионах достаточно хорошо развит. В Поволжье за перспективу стать крупнейшим региональным центром пассажирских

авиаперевозок идёт конкуренция между городами Н. Новгород, Казань, Самара, Уфа. В регионе Нижнего Поволжья и Дона конкурируют города Волгоград и Ростов-на-Дону. В Уральском регионе город Екатеринбург имеет предпочтение в борьбе за пассажиропотоки перед такими городами, как Челябинск, Тюмень. Сложная ситуация в Чечне и вокруг неё явно сдерживает развитие авиаперевозок на Северном Кавказе, смещая основной объём перевозок на Чёрноморское побережье.

Совсем другая ситуация складывается в районах севера Европейской части страны, Сибири и Дальнего Востока, где авиационный транспорт во многих случаях является единственно возможным. На севере Европейской части в качестве региональных лидеров в пассажирских авиаперевозках выдвигаются города Архангельск, Мурманск и Сыктывкар. В районах Сибири и Дальнего Востока следует выделить два основных фактора, определяющих формирование узловых региональных аэропортов. Первый фактор – развитие добывающих отраслей в республике Саха (Якутия) и городе Норильске, развитие нефте- и газоносных районов – Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа. Вторым фактором, определяющим развитие авиатранспортной сети южной части Сибири и Дальнего Востока, – концентрация промышленности и населения вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали. Этот фактор является определяющим в развитии крупнейших региональных аэроузлов в городах Новосибирск, Красноярск, Иркутск, Хабаровск, Владивосток. Аэроузлы Сибири и Дальнего Востока более удалены друг от друга, чем аэроузлы Европейской части страны, и обслуживают обширные районы. Каждый из перечисленных аэроузлов связан с городом Москва авиалиниями со сравнительно большими пассажиропотоками.

За период с 1992 по 2000 гг. произошло существенное сокращение общего числа внутрироссийских авиалиний (на 40%) (рисунок 1.2). Сокращение числа авиалиний произошло в первую очередь за счёт резкого сокращения числа сравнительно коротких авиалиний с дальностью менее 2000 км и особенно с дальностью до 1000 км. Появились новые авиалинии с дальностью более 3000 км. В результате максимум в распределении количества авиалиний по дальности сместился в сторону авиалиний с большей дальностью.

При описании транспортных сетей, как правило, используют **OD**-матрицу (origin/destination matrix), каждая ячейка которой может быть заполнена численными значениями параметров данной транспортной связи. Ячейки строки матрицы характеризуют все потоки от данного «отправителя» (пункта отправления), а ячейки столбца – все потоки к данному «получателю» (пункту прибытия). **OD**-матрица даёт возможность наглядно отобразить в компактном и читаемом виде сложную транспортную систему. Последовательность **OD**-матриц, соответствующих последовательным интервалам времени, позволяет описать развитие сети, отразить изменения в структуре транспортных потоков.

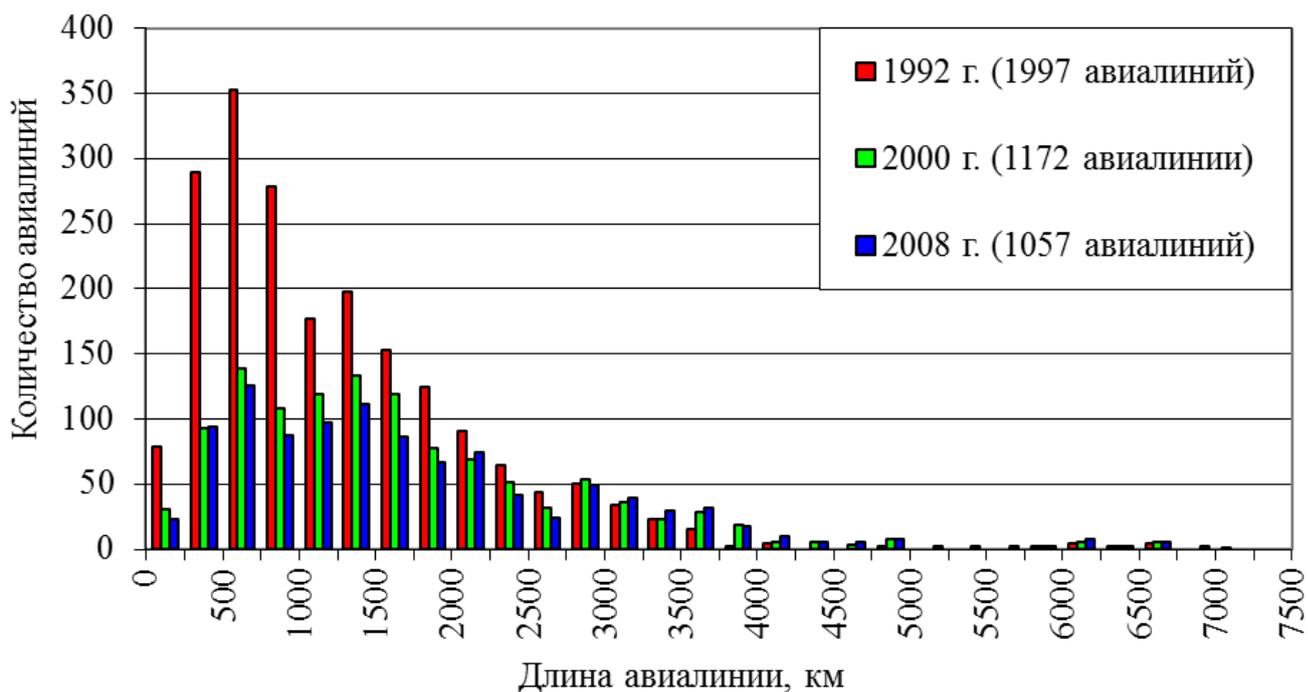


Рисунок 1.2 – Изменение структуры сети авиалиний

В настоящей работе для графического представления сети авиалиний используется вариант **OD**-матрицы в бинарных переменных. Тёмные ячейки матрицы соответствуют авиалиниям между городами, на которых осуществляется навигация, светлые – на которых навигация не осуществляется. Подобная матрица может быть сформирована на основании расписания полётов для заданного календарного года. По результатам сравнительного анализа последовательности **OD**-матриц можно судить о направлениях развития исследуемой сети авиалиний в определённый период.

OD-матрицы сети внутрироссийских магистральных авиалиний для 1992, 1996, 2000 и 2008 гг. представлены на рисунке 1.3. Для удобства визуального анализа города (пункты отправления и прибытия) размещены в матрице по федеральным округам (ФО) РФ. Это позволяет разделить матрицу на блоки: в «диагональных» блоках сосредоточены внутрирегиональные авиалинии, во «внедиагональных» – межрегиональные авиалинии. На рисунке 1.3: ДВ – Дальневосточный ФО, П – Приволжский ФО, СЗ – Северо-Западный ФО, С – Сибирский ФО, У – Уральский ФО, Ц – Центральный ФО, Ю – Южный ФО. Сравнительный анализ последовательности **OD**-матриц показывает значительную трансформацию структуры сети авиалиний (рисунок 1.3). Видно не только как происходило сокращение общей численности авиалиний, но и как уменьшалось количество внутрирегиональных авиалиний (плотность «тёмных» ячеек в диагональных блоках матрицы).

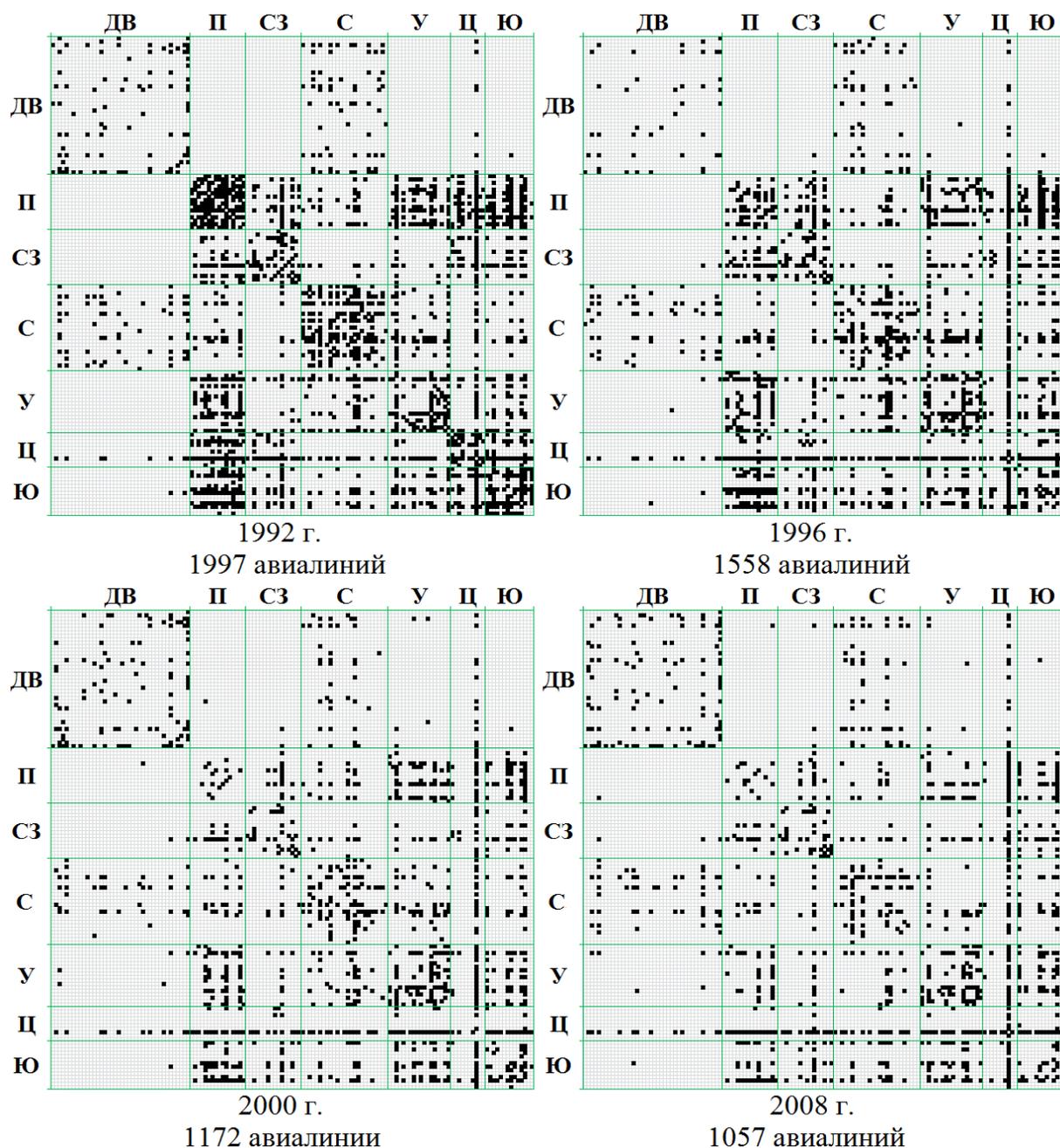
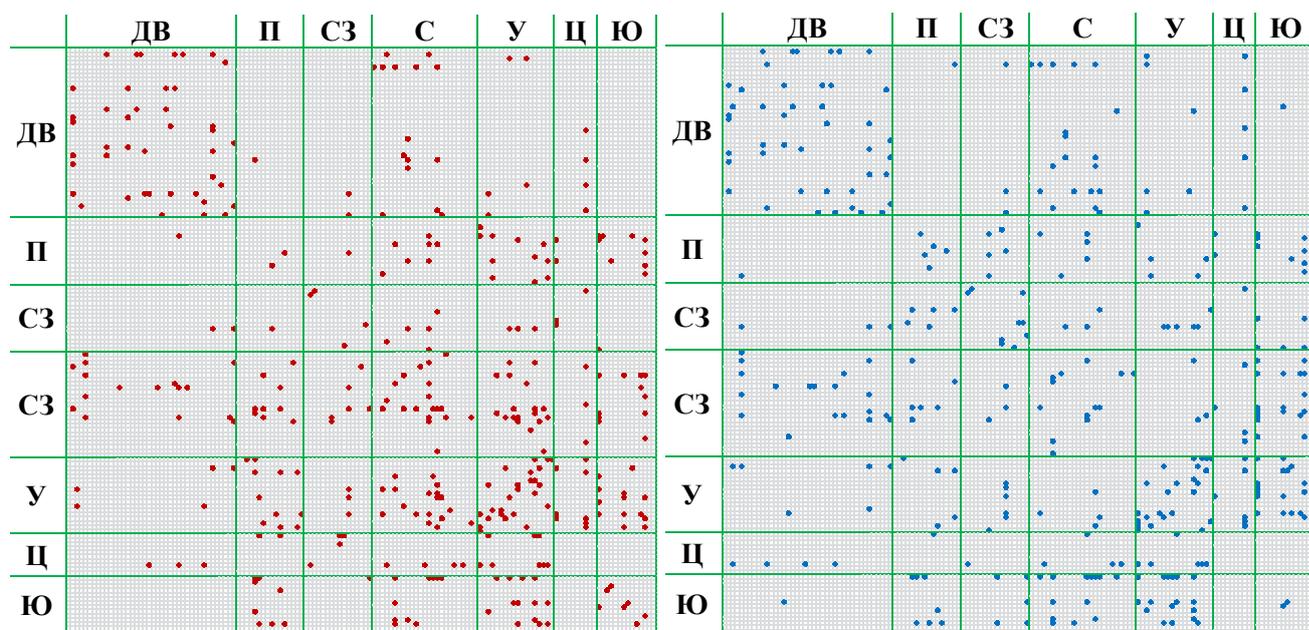


Рисунок 1.3 – Трансформация сети магистральных авиалиний России за период с 1992 по 2008 гг.

Обновление сети авиалиний (появление новых авиалиний) с 1992 по 2008 гг. представлено на рисунке 1.4: ДВ – Дальневосточный ФО, П – Приволжский ФО, СЗ – Северо-Западный ФО, С – Сибирский ФО, У – Уральский ФО, Ц – Центральный ФО, Ю – Южный ФО. За рассматриваемый период произошло существенное обновление сети. Из общего числа авиалиний в 2000 г. две трети составляют сохранившиеся с 1992 г. авиалинии и одну треть – новые авиалинии (рисунок 1.4, а). Число «исчезнувших» авиалиний в 3,4 раза превышает число новых авиалиний (1171² против 346).

² 1171 авиалиния (исчезли в 2000 г. по сравнению с 1992 г.) = 1997 авиалиний (в 1992 г.) – 1172 авиалинии (в 2000 г.) + 346 авиалиний (замещённых новыми авиалиниями в 2000 г. по сравнению с 1992 г.)

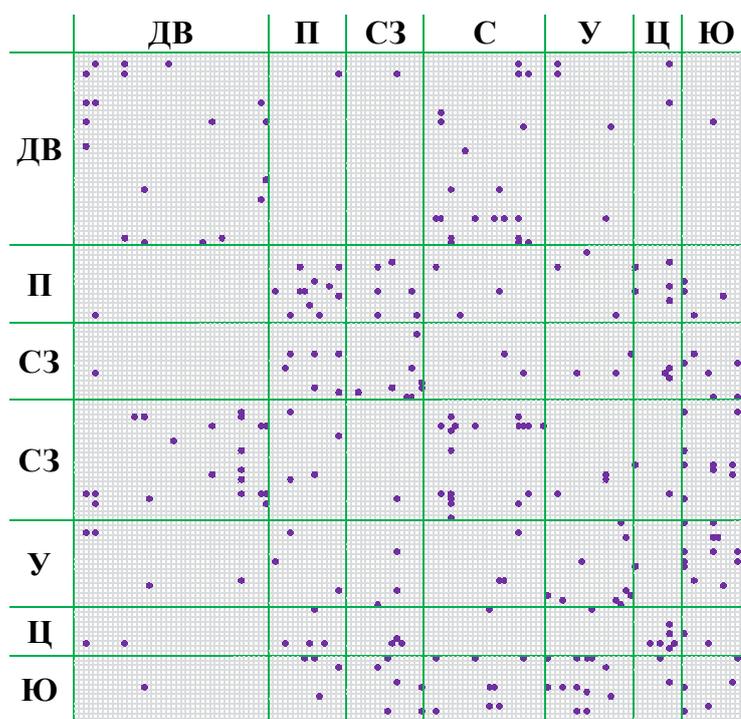


(a)

(b)

2000 г. относительно 1992 г.

2008 г. относительно 1992 г.



(c)

2008 г. относительно 2000 г.

Рисунок 1.4 – Обновление сети авиалиний с 1992 по 2008 гг.

Цветом закрашены ячейки матрицы, соответствующие новым авиалиниям:

- (a) 346 новых авиалиний (из 1172) в 2000 г. относительно 1992 г.;
- (b) 336 новых авиалиний (из 1057) в 2008 г. относительно 1992 г.;
- (c) 259 новые авиалинии (из 1057) в 2008 г. относительно 2000 г.

После 2000 г. достаточно отчётливо наблюдается стабилизация темпов изменения сети и её обновления. В сети 2008 г. по сравнению с 2000 г. появилось более 20% новых авиалиний, число «исчезнувших» авиалиний больше числа новых авиалиний в 1,4 раза (374³ против 259) (рисунок 1.4, с). Это свидетельствует об определённом замедлении темпов обновления сети в период с 2000 по 2008 гг. По сравнению с 1992 г. в сети 2008 г. появилось более 30% новых авиалиний (рисунок 1.4, б), при этом число «исчезнувших» авиалиний в 3,8 раза превышает число новых авиалиний (1276⁴ против 336). Наличие «исчезнувших» и «новых» авиалиний, т.е. постоянное обновление сети, указывает на то, что в структуре сети в каждый определённый момент времени присутствуют авиалинии, находящиеся на промежуточных стадиях развития – исчезающие и появляющиеся.

Проведён анализ плотности распределения авиалиний по субъектам РФ – количества авиалиний, проходящих через аэропорты, расположенные в данном субъекте РФ (рисунки 1.5 – 1.7⁵).

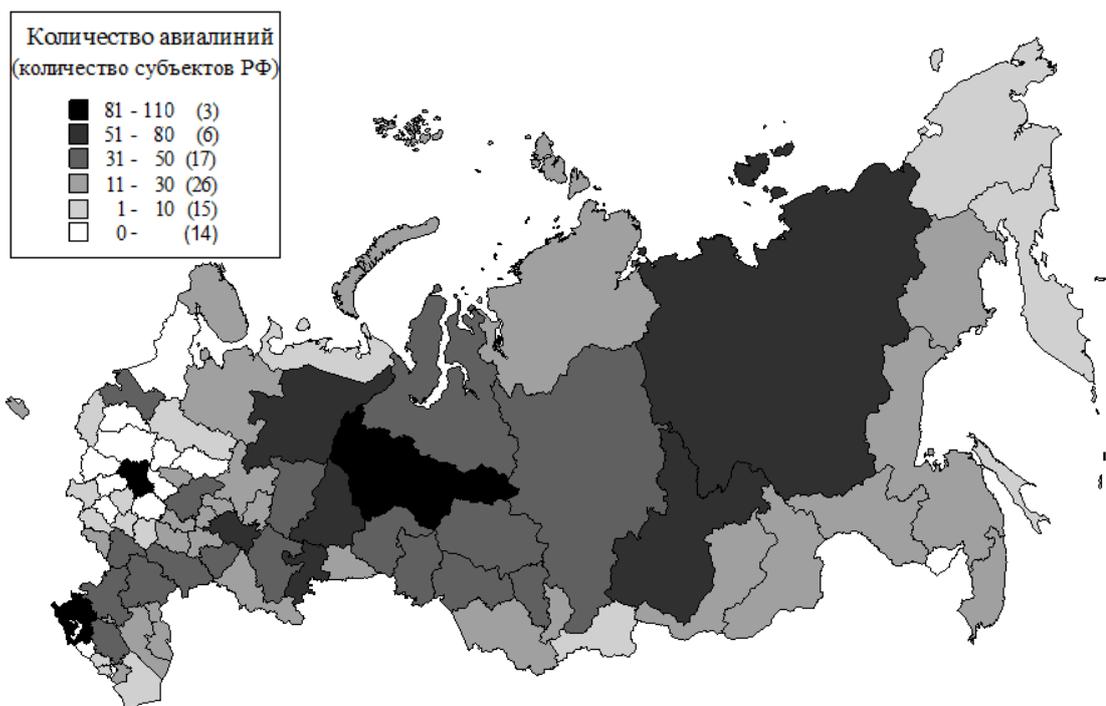


Рисунок 1.5 – Плотность авиалиний по субъектам РФ в 1992 году

³ 1172 авиалинии (в 2000г.) – 1057 авиалиний (в 2008г.) + 259 авиалиний (замещённых новыми авиалиниями в 2008г. по сравнению с 2000г.) = 374 авиалинии (исчезло в 2008г. по сравнению с 2000г.)

⁴ 1997 авиалиний (в 1992г.) – 1057 авиалиний (в 2008г.) + 336 авиалиний (замещённых новыми авиалиниями в 2008г. по сравнению с 1992г.) = 1276 авиалиний (исчезло в 2008г. по сравнению с 1992г.)

⁵ Количество субъектов РФ – 83, на рисунках представлено разделение РФ на 81 субъект, поскольку г. Москва рассматривается совместно с Московской обл., г. Санкт-Петербург – совместно с Ленинградской областью, респ. Алтай – совместно с Алтайским краем, а Таймырский (Долгано-Ненецкий) авт. округ – отдельно от Красноярского края.

Общая тенденция на протяжении с 1992 г. по 2000 г. – уменьшение плотности авиатранспортной сети: за это время вдвое сократилось количество субъектов РФ с наибольшим (более 50) числом авиалиний и одновременно вдвое увеличилось количество субъектов РФ с минимальным (не более 10) числом авиалиний. Количество субъектов РФ с большой плотностью авиалиний (более 30) сократилось с 26 до 13. Помимо Московской области (включая г. Москва), Краснодарского края и Ханты-Мансийского автономного округа, традиционно обладающих наибольшей плотностью авиалиний, в число субъектов РФ с большой плотностью авиалиний вошли: Республика Саха (Якутия), Ямало-Ненецкий автономный округ, Иркутская, Свердловская, Новосибирская, Ленинградская, Самарская и Челябинская области, Красноярский край и респ. Татарстан, т.е. крупнейшие промышленные центры и добывающие районы. Количество регионов, в которых прекращено регулярное сообщение на магистральных авиалиниях, увеличилось с 14 до 21. В Центральной Европейской части страны это объясняется конкуренцией со стороны других видов транспорта, на Северном Кавказе – нестабильностью положения в Чечне.



Рисунок 1.6 – Плотность авиалиний по субъектам РФ в 2000 году

За период 2000-2008 гг. не изменилось количество субъектов РФ с наибольшим (более 50) числом авиалиний и незначительно увеличилось количество субъектов РФ с минимальным (не более 10) числом авиалиний. Количество субъектов РФ с большой плотностью авиалиний (более 30) сократилось с 13 до 11. Из их числа вышли респ. Татарстан, Самарская и Челябинская обл., в их число вошёл Хабаровский край. Отмечено восстановление регулярного

сообщения на магистральных авиалиниях в пяти субъектах РФ: Ивановская, Курская, Псковская и Тамбовская области и Чеченская республика.

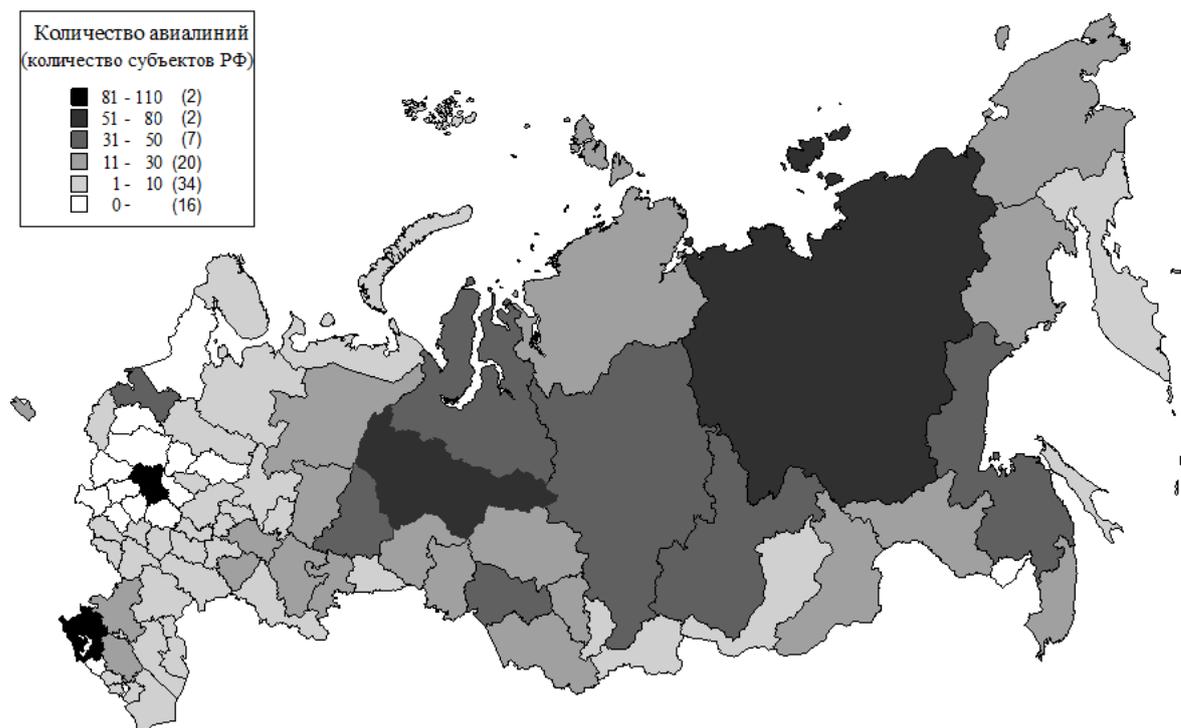


Рисунок 1.7 – Плотность авиалиний по субъектам РФ в 2008 году

В период с 1992 г. по 2000 г. (таблица 1.1) годовой пассажиропоток сократился на 66%. Анализ внутрирегиональных и межрегиональных пассажиропотоков показывает, что наименьшее сокращение (менее 40%) произошло на направлениях, связывающих Центральный ФО с другими регионами РФ; наибольшее сокращение (более 80%) – на направлениях, связывающих Приволжский ФО с другими регионами РФ. Отмечено появление пассажиропотоков в межрегиональном сообщении между Дальневосточным ФО и Приволжским, Северо-Западным, Уральским ФО. Наиболее существенное уменьшение пассажиропотока (более 90%) отмечено: во внутрирегиональном сообщении – в Приволжском, Центральном и Южном ФО; в межрегиональном сообщении – между Дальневосточным ФО и Южным ФО, между Северо-Западным ФО и Приволжским ФО. Наименее существенное уменьшение пассажиропотока (менее 25%) отмечено в межрегиональном сообщении между Центральным ФО и Дальневосточным, Северо-западным, Уральским, Южным ФО. Основу межрегиональных пассажиропотоков составляют направления, связывающие Центральный ФО с другими регионами России. Изменения системного характера происходят в направлениях авиаперевозок, связанных с Дальневосточным ФО.

За 2000-2008 гг. отмечается рост пассажиропотока – объем пассажиропотока в 2008 г. восстановился на 30% (таблица 1.1) по сравнению с 1992 г. (таблица 1.2).

Таблица 1.1

**Внутрирегиональные и межрегиональные пассажиропотоки в 2000 г.
по сравнению с 1992 г.**

Федеральный округ	Дальне-восточный	Приволж-ский	Северо-западный	Сибир-ский	Ураль-ский	Цент-ральный	Южный	Общий итог
Дальневосточный	30%	+	+	22%	+	78%	5%	34%
Приволжский	+	2%	9%	23%	17%	35%	14%	16%
Северо-западный	+	9%	15%	49%	25%	87%	27%	30%
Сибирский	23%	22%	50%	11%	21%	55%	31%	24%
Уральский	+	17%	25%	20%	19%	83%	36%	31%
Центральный	76%	36%	88%	56%	82%	9%	94%	63%
Южный	5%	15%	27%	30%	35%	92%	6%	39%
Общий итог	34%	16%	30%	24%	31%	62%	39%	34%

Таблица 1.2

**Внутрирегиональные и межрегиональные пассажиропотоки в 2008 г.
по сравнению с 1992 г.**

Федеральный округ	Дальне-восточный	Приволж-ский	Северо-западный	Сибир-ский	Ураль-ский	Цент-ральный	Южный	Общий итог
Дальневосточный	56%	+	+	30%	+	136%	4%	59%
Приволжский	+	7%	42%	8%	18%	108%	8%	34%
Северо-западный	+	42%	38%	86%	68%	257%	53%	81%
Сибирский	30%	7%	86%	15%	22%	86%	46%	33%
Уральский	+	18%	68%	22%	29%	167%	42%	51%
Центральный	133%	111%	258%	87%	166%	33%	187%	135%
Южный	4%	9%	52%	41%	40%	182%	15%	67%
Общий итог	60%	34%	81%	34%	51%	133%	68%	64%

Анализ внутрирегиональных и межрегиональных пассажиропотоков показывает, что полное восстановление с превышением объёмов 1992 г. (на 35%) произошло на направлениях, связывающих Центральный ФО с другими регионами РФ; наименьшее восстановление (до 33 % от объёма в 1992 г.) произошло на направлениях, связывающих Сибирский ФО с другими регионами РФ. Полное восстановление пассажиропотока с существенным превышением объёмов 1992 г. (на 158%) отмечено в межрегиональном сообщении между Центральным ФО и Северо-Западным ФО. Полное восстановление пассажиропотока с превышением объёмов 1992 г. (на 11 ÷ 82 %) отмечено в межрегиональном сообщении между Центральным ФО и Дальневосточным, Приволжским, Уральским, Южным ФО. Наименьшее восстановление пассажиропотока (до 15% от объёма в 1992 г.) отмечено во внутрирегиональном сообщении в Приволжском, Сибирском, Южном ФО. На ряде направлений в межрегиональном сообщении отмечено сохранение тенденции к сокращению объёма пассажиропотока, но в меньшей степени (на 1 ÷ 15 % от объёма в 1992 г.), чем в период с 1992 по 2000 гг. (на 78 ÷ 95 %) – между Приволжским ФО и Сибирским, Южным ФО, между Южным ФО и Дальневосточным ФО.

По-прежнему, как и в предыдущие годы, основу межрегиональных пассажиропотоков составляют направления, связывающие Центральный ФО с другими регионами России. Отмечено закрепление связей между Дальневосточным ФО и Приволжским, Северо-Западным, Уральским ФО. Наблюдается ослабление связей между Приволжским ФО и Сибирским, Южным ФО, между Дальневосточным ФО и Южным ФО.

Таким образом, в период после 2000 г. развитие сети происходит в соответствии с новыми установившимися тенденциями. Эти тенденции могут быть использованы при прогнозировании развития сети в долгосрочной перспективе (при условии сохранения сложившейся политической и экономической ситуации в стране). Для дальнейших исследований представляется возможным исходить из данных 2006 г. Развитие сети в окрестности этого года происходит равномерно (рисунок 1.1). Это позволяет утверждать, что законы, характеризующие развитие сети в 2006 г., характеризуют развитие сети во всём периоде с 2000 г. по 2008 г. Выбор 2006 г. также позволяет проверить адекватность сделанных прогнозов на доступных данных последующих лет.

Основой сети 2006 г. является около 20 городов (с крупными аэропортами федерального значения), составляющих так называемую опорную сеть аэропортов, через которые проходит подавляющее (более 90 %) число внутрироссийских магистральных авиалиний. Число авиалиний, не проходящих через эти аэропорты, в период после 2000 г. неуклонно сокращается. Анализ тенденций развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний показал, что к 2000 году в стране в основном сложились экономические условия, необходимые для устойчивого развития её авиатранспортной сети.

1.2 Безмасштабная природа сети магистральных авиалиний России

Авиатранспортная система России имеет сложную структуру, и входящая в её состав сеть внутрироссийских магистральных авиалиний может рассматриваться как сложная сеть (рисунок 1.8). В сложных сетях взаимодействие осуществляется в соответствии со сложным графом, структура которого может развиваться. Теория графов является основным инструментом работы со сложными сетями. Изначально предполагалось, что в сетях со сложной структурой образование новых связей происходит случайным образом, поэтому такие сети рассматривались как случайные и, следовательно, описывались случайными графами [38–40]. В случайном графе каждая пара из N узлов связана с вероятностью p , т.е. случайный граф имеет $pN(N-1)/2$ рёбер, распределённых случайным образом. В последние годы было установлено, что развитие ряда сложных (особенно социально

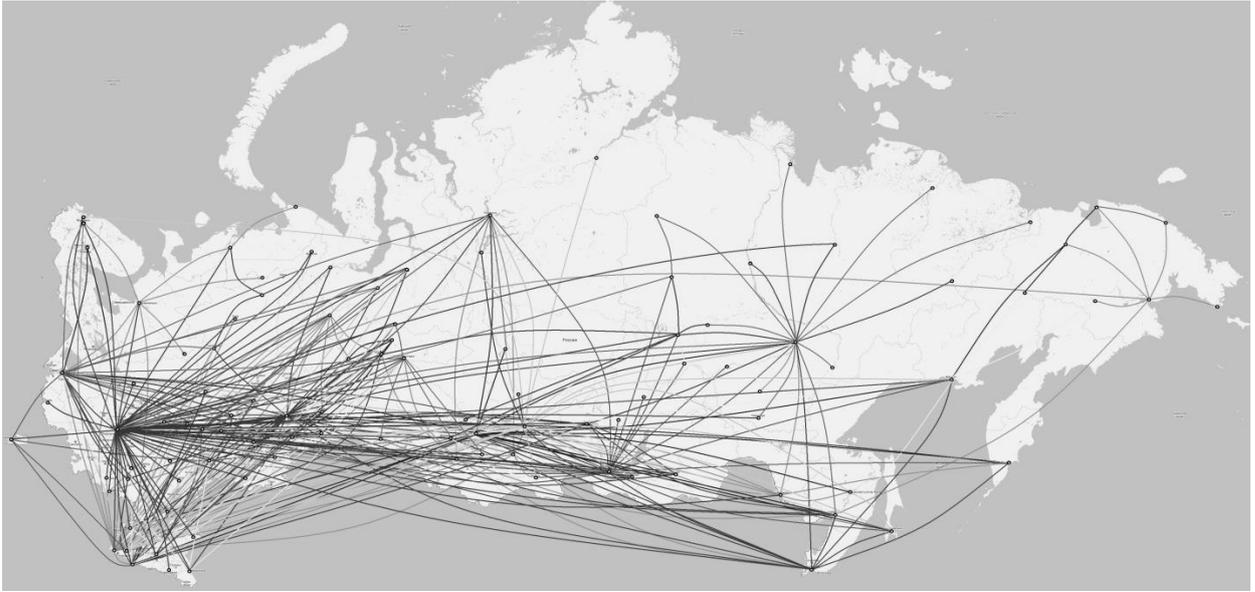


Рисунок 1.8 – Сети внутривосийских магистральных авиалиний на карте страны

значимых) сетей, подчиняется определённым закономерностям. Были сформулированы три основные концепции, дающие представление о сложных сетях и их отличии от чисто случайных сетей: «малые миры», «кластеризация» и «распределение степеней» [41 – 43].

Концепция *малых миров* (“small world”) описывает тот факт, что в большинстве сложных сетей, даже если они имеют огромные размеры, между любыми двумя узлами существует относительно короткий путь. Под длиной пути подразумевается количество рёбер этого пути. В случайных графах среднее расстояние между двумя вершинами растёт как логарифм числа вершин. Следовательно, случайные графы также являются малыми мирами.

Кластеризация (clustering) характеризует степень взаимодействия ближайших узлов данного узла между собой. Большинство сложных сетей обладают высокой кластеризацией, на порядки превышающей кластеризацию соизмеримых случайных сетей, имеющих такое же количество узлов и рёбер.

В случайных графах большинство узлов имеет одну и ту же «степень узла» (количество рёбер, проходящих через данный узел) и *распределение степеней* (degree distribution) узлов случайного графа является «пуассоновским». Однако для многих сложных сетей распределение степеней узлов значительно отклоняется от пуассоновского. В частности, у большинства сложных сетей распределение степеней имеет «хвосты» степенного закона с показателем степени n между 2 и 3: вероятность того, что некоторый узел связан с k другими узлами, пропорциональна $1/k^n$. В отличие от «равноправного» распределения связей, наблюдающегося в чисто случайных сетях, степенной закон описывает системы, в которых доминируют несколько узлов, имеющих очень большое количество связей. Такие сети, описываемые степенным законом распределения связей, были названы *безмасштабными* (*масштабно-инвариантными*)

сетями (*scale-free network*) [41 – 43]. На рисунке 1.9 представлены рассмотренные характеристики случайных и безмасштабных сетей.

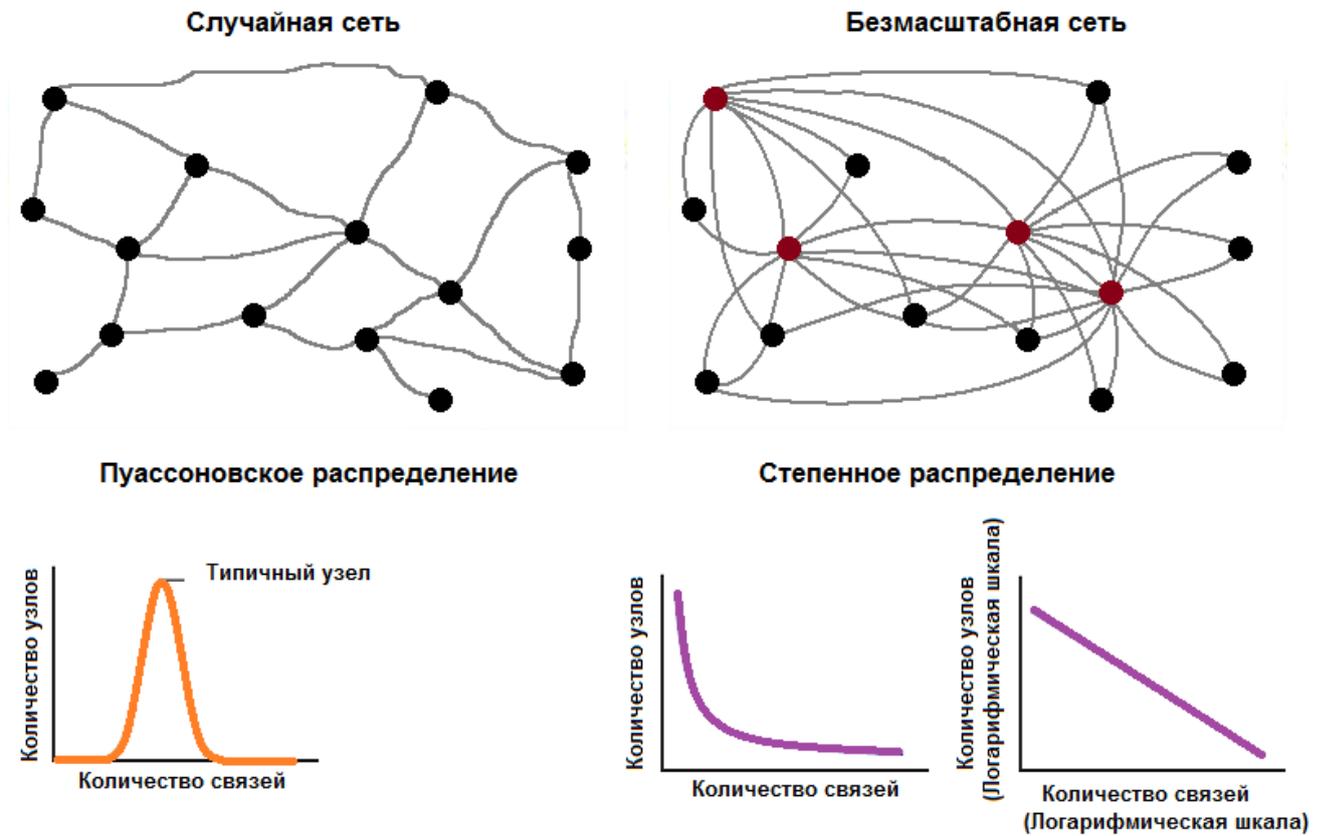


Рисунок 1.9 – Случайная и безмасштабная сети

Основные свойства безмасштабной сети не зависят от её размера. Характерной особенностью безмасштабных сетей является наличие *концентраторов* (hubs) – узлов, имеющих большое количество связей. Они связывают сеть воедино, образуя так называемое «концентратороподобное ядро» (“hub-like core”). Это даёт устойчивую к случайным воздействиям, но одновременно уязвимую к целенаправленным воздействиям структуру сети, что является основополагающим признаком безмасштабности сети. В таких сетях узлов с небольшим количеством связей намного больше, чем концентраторов, поэтому случайное удаление узлов исключает главным образом узлы с небольшим количеством связей, устранение которых не разрушает структуру сети. Чувствительность к целенаправленному воздействию объясняется тем, что удаление одного или нескольких концентраторов часто разрушает структуру сети (сеть разделяется на несвязанные фрагменты) [41 – 44].

Образование новых связей в безмасштабных сетях происходит не случайным образом, а в соответствии с так называемым механизмом «предпочтительного присоединения» (preferential attachment), объясняющим существование концентраторов. Новые элементы сети присоединяются преимущественно к узлам, имеющим большее количество связей. Таким образом, сеть, растущая в соответствии с механизмом *предпочтительного присоединения*,

является безмасштабной, и распределение количества связей её узлов описывается степенным законом. Ещё одним механизмом образования новых связей в безмасштабной сети является «ассортативность» (assortativity) – предпочтение в образовании новых связей внутри группы узлов по сравнению с образованием внешних (по отношению к этой группе) связей. *Ассортативность* способствует усилению кластеризации в растущей безмасштабной сети. Благодаря механизмам предпочтительного присоединения и ассортативности безмасштабная сеть сохраняет свои свойства независимо от размеров сети, т.е. остаётся безмасштабной в процессе развития.

Строгое определение класса безмасштабных графов связано с введением понятия структурной метрики графа, называемой *S-метрикой* (s-Metric) [44]. Данная метрика является «структурной» в том смысле, что её величина зависит от «степени связанности» данного графа (отношения числа рёбер графа к их максимальному числу $N(N-1)$, N -число вершин графа). *S-метрика* характеризует степень, с которой узлы с большим количеством связей связаны между собой. Эта метрика даёт понимание заявленных свойств безмасштабных графов и представление о том, в какой степени граф является безмасштабным. Чем больше значение *S-метрики* исследуемого графа, чем ближе оно к значению *S-метрики* графа, который может быть получен при максимизации *степени связанности* (connectivity) исследуемого графа, тем в большей степени данный граф является безмасштабным и тем в большей степени для него характерны свойства, присущие безмасштабным графам. *S-метрика* зависит только от структуры самого графа и не зависит явно от процесса, с помощью которого он построен. Вычисление *S-метрики* графа является трудоёмким процессом, но не является обязательным, поскольку качественно может быть заменено выявлением других характеристик безмасштабных сетей [43, 44]:

- степенное распределение связей между узлами сети ($n = 2 \div 3$);
- механизмы образования новых связей в сети (предпочтительное присоединение и ассортативность);
- самоподобие сети (self-similarity) (развитие отдельных частей сети происходит приблизительно так же, как и всей сети в целом);
- малый диаметр сети – является величиной достаточно стабильной и практически не зависит от размеров безмасштабной сети;
- устойчивость сети к случайным воздействиям и неустойчивость к целенаправленным воздействиям.

Сеть авиалиний является коммуникационной сетью. Однако не все коммуникационные сети могут быть описаны безмасштабными графами. Сети магистральных автодорог, железных дорог или энергосистема страны не относятся к безмасштабным сетям. Поведение сети

определяется не только её типом, но и другими параметрами, также заслуживающими внимания. Один из них – стоимость добавления новых связей. Например, большие затраты на строительство автострад, железных дорог, линий электропередач препятствуют развитию этих систем как безмасштабных сетей [41]. Для коммуникационных систем важную роль играет загруженность отдельных связей: слишком большой трафик на конкретной линии может вызвать выход её из строя. В результате под угрозой отказа окажутся другие связи, которым придётся работать с перегрузкой. Наконец, сами узлы могут быть очень разными, что сильно влияет на механизм предпочтительного присоединения.

Мировая авиатранспортная сеть имеет свою иерархию. На верхнем уровне иерархии находятся города (аэропорты) – мировые сетевые концентраторы. Эти концентраторы, располагаясь в различных регионах мира, являются сильносвязанными, образуют кластер верхнего уровня иерархии и обеспечивают целостность мировой авиатранспортной сети. В каждом регионе мира (Северная Америка, Европа, Южная Америка и др.) существуют крупные города и столицы государств, имеющие аэропорты международного значения – региональные (для каждого региона мира) сетевые концентраторы. Эти концентраторы также являются сильносвязанными в группе с концентраторами своего региона и образуют кластеры второго уровня иерархии. Последующие уровни иерархии связаны с организацией авиаперевозок внутри стран.

Благодаря наличию сильносвязанных концентраторов на каждом уровне иерархии мировая авиатранспортная сеть является безмасштабной сетью не только в целом, но и в каждой ветви иерархии по отдельности. Такая сеть обладает свойством «самоподобия». Это свойство позволяет рассматривать сеть внутрироссийских авиалиний как безмасштабную, исследовать её структуру и прогнозировать её развитие отдельно от остальной части мировой авиатранспортной сети.

На рисунке 1.10 представлена организационная структура авиатранспортной сети России. Помимо городов с аэропортами федерального значения, на которых строится большая часть сети внутрироссийских магистральных авиалиний, в авиатранспортной сети РФ существуют города с аэропортами регионального значения, на базе которых в рамках одного федерального округа образуются кластеры третьего уровня иерархии мировой авиатранспортной сети. На рисунке 1.10 МЛ – международные авиалинии, МРЛ – внутренние межрегиональные авиалинии, ВРЛ – внутренние внутрирегиональные авиалинии, ФА – аэропорты федерального значения, РА – аэропорты регионального значения, МА – аэропорты местных авиалиний.

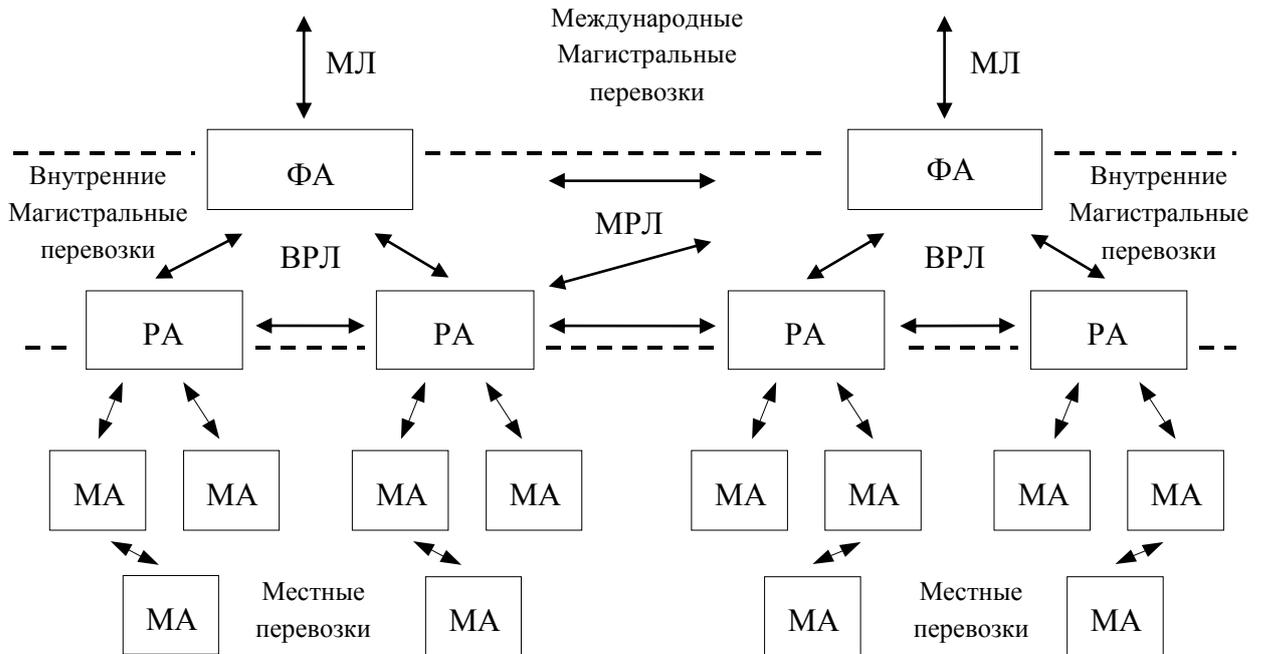


Рисунок 1.10 – Иерархия аэропортов и авиалиний в организационной структуре авиатранспортной сети России

Согласно проведённым в работе расчётам для сети внутрироссийских магистральных авиалиний распределение количества городов по количеству авиасвязей (k) хорошо описывается степенным законом (рисунок 1.11): вероятность того, что некоторый город связан прямым авиасообщением с k другими городами сети, пропорциональна величине $1/k^n$. Чем больше количество авиасвязей k у города, тем меньше городов с таким количеством авиасвязей в сети. При этом, как и в большинстве безмасштабных сетей, показатель степени n оказывается между 2 и 3.

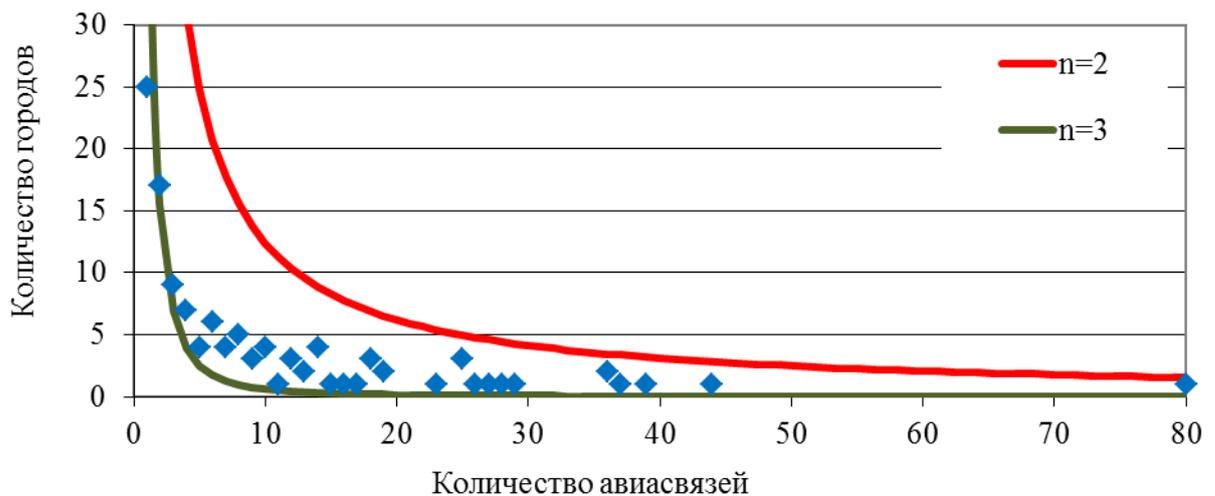


Рисунок 1.11 – Степенной закон распределения количества городов по количеству авиасвязей для сети внутрироссийских магистральных авиалиний

осуществлено по числу проходящих через них авиалиний: на каждом шаге ранжирования определяется город с максимальным числом проходящих через него авиалиний, после чего эти авиалинии исключаются из дальнейшего рассмотрения. Тем самым каждая авиалиния полагается принадлежащей только одному городу в данной паре городов – городу с большим числом проходящих через него авиалиний.

В соответствии с ранжированной **OD**-матрицей городов построена зависимость степени связанности группы от количества городов, входящих в её состав (рисунок 1.13), – в группу последовательно включаются города в порядке убывания количества авиалиний, проходящих через данный город.

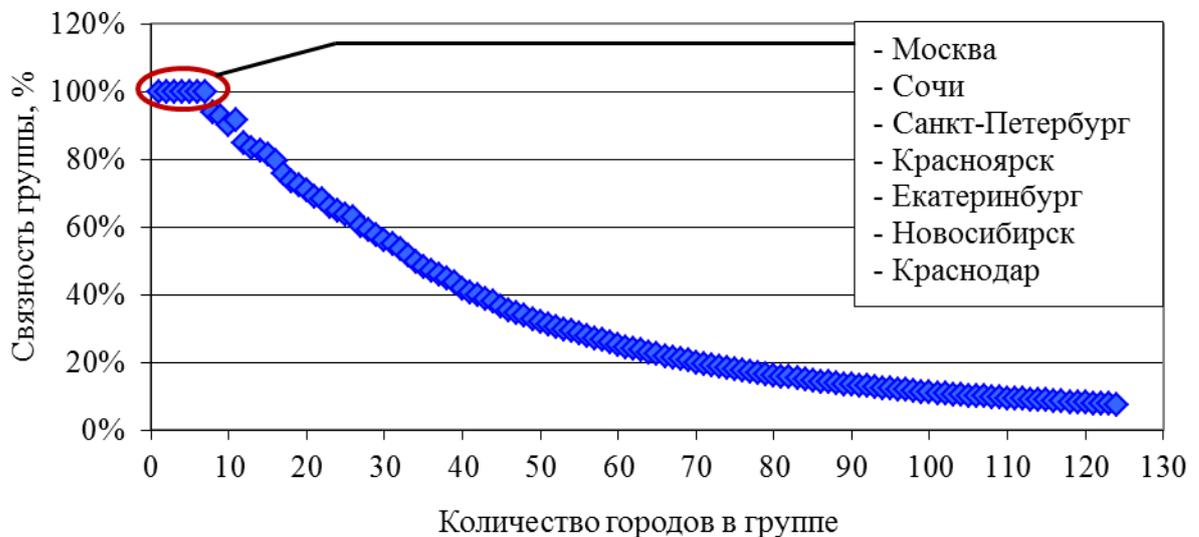
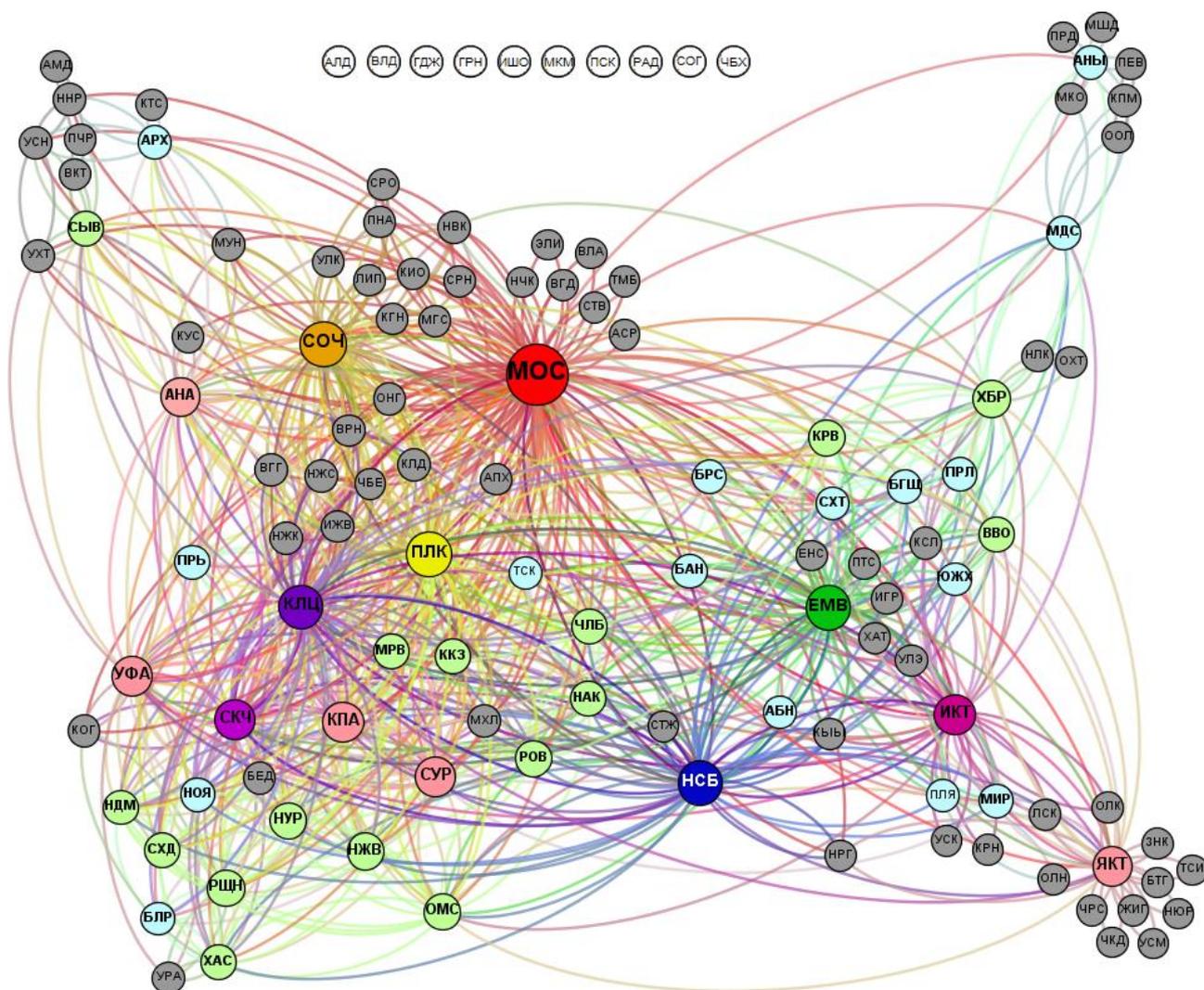


Рисунок 1.13 – Зависимость степени связанности группы от количества городов, входящих в её состав

Анализ степени связанности сети показывает, что эта сеть содержит ядро сильносвязанных концентраторов (красный квадрат и красный овал на рисунках 1.12 и 1.13). Это семь городов (Москва, Сочи, Санкт-Петербург, Красноярск, Екатеринбург, Новосибирск и Краснодар) с наибольшим количеством авиалиний, попарно соединённых друг с другом. Они образуют «концентратороподобное ядро» сети со связанностью равной 100%. Наличие концентратороподобного ядра в сети является необходимым качественным признаком её безмасштабности.

Ориентированный граф сети внутрироссийских магистральных авиалиний для 2006 г., построенный с использованием пакета для анализа социальных сетей Gephi [45], представлен на рисунке 1.14. В сети доминирует относительно небольшое число узлов (7%), имеющих большое (более 50) количество связей. Среднее расстояние от этих узлов до любого узла в графе не превышает 2. Более 60% узлов сети имеет небольшое количество связей (менее 10).



Количество связей (ориентированных авиалиний)

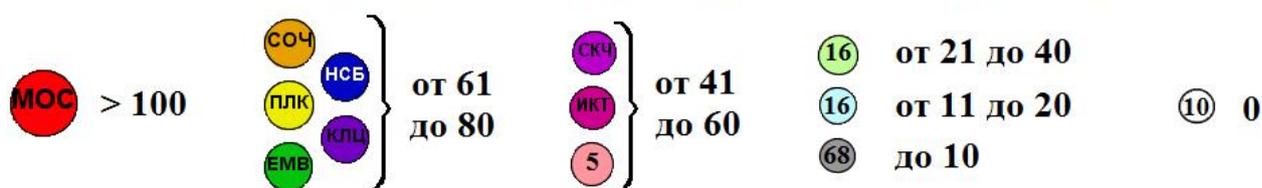


Рисунок 1.14 – Ориентированный граф сети внутрироссийских магистральных авиалиний для 2006 г. (код в круге – код города⁶; цифра в круге соответствует количеству городов указанного типа)

В таблице 1.3 представлены характеристики связного графа (десять городов сети в 2006 г. не имели магистральных авиалиний, они не входят в состав связного графа) также полученные с помощью пакета Gephi. Для некоторых метрик графа в таблице даны комментарии. Анализ метрик графа подтверждает, что сеть внутрироссийских магистральных авиалиний может быть отнесена к классу безмасштабных: данная сеть обладает свойством

⁶ См. Приложение А. Код города совпадает с кодом аэропорта. Для трёх городов, имеющих несколько аэропортов, введён код города, отличный от кодов аэропортов: АРХ – код г. Архангельска, НСБ – код г. Новосибирска, МОС – код г. Москвы.

«малого диаметра» сети. Диаметр сети не превышает четырёх, т.е. не более чем с тремя пересадками (или остановками) можно из любого города сети прибыть в любой другой город этой сети. Для подавляющего большинства пар городов РФ длина кратчайшего пути не будет превосходить трёх перелётов с двумя промежуточными посадками.

Таблица 1.3

**Характеристики связного графа сети внутрироссийских магистральных авиалиний
для 2006 г.**

Топологическая метрика	Значение	Комментарий
Количество узлов графа (Nodes)	113	(городов)
Количество рёбер ориентированного графа (Edges)	937	(авиалиний)
Количество рёбер в полном ориентированном графе (Number of shortest paths)	12656	Полный граф имеет все возможные ребра
Плотность графа (Graph Density Report)	0.074	Метрика показывает, насколько граф близок к полному графу: полный граф имеет плотность = 1
Средняя степень узла (Average Degree)	8.292	Среднее количество рёбер у узла
Диаметр графа (Network Diameter)	4	Максимальное расстояние по всевозможным парам узлов графа показывает, насколько удалены друг от друга два максимально удалённых узла
Средний коэффициент кластеризации графа (Average Clustering Coefficient)	0.523	Наряду со средним кратчайшим путём может служить для проверки гипотезы "Small World" – "Малых миров": он отображает, насколько плотно узлы упакованы в своём ближайшем окружении. Соответствует степени кластеризации всего графа
Средняя длина пути в графе (Average Path length)	2.355	Среднее расстояние по всевозможным парам узлов графа: связанные напрямую узлы имеют расстояние равное 1

Таким образом, сеть внутрироссийских магистральных авиалиний по своей топологии близка к безмасштабной сети (т.е. обладает свойствами, характерными для безмасштабных графов). Процесс её развития может рассматриваться как совокупность процессов развития подсетей концентраторов, принадлежащих различным уровням иерархии в топологической структуре сети авиалиний. При анализе адекватности прогнозируемой сети внутрироссийских магистральных авиалиний необходимо обращать внимание на то, чтобы сеть оставалась безмасштабной.

1.3 Классификация и этапы развития магистральных авиалиний России

Для понимания процессов эволюции авиалиний во времени на основе анализа расписания полётов ВС на магистральных авиалиниях России была проведена классификация внутрироссийских магистральных авиалиний и выделены этапы, характерные для развития авиалиний различного типа. В базе данных расписаний полётов Центра расписаний и тарифов РФ информация хранится в виде нормализованных таблиц (таблица 1.4). Для каждого рейса в разные периоды навигации из расписания были выбраны для анализа следующие данные: код авиакомпании; номер рейса; начало навигации; конец навигации; дни недели, в которые осуществляются полёты ВС; город/аэропорт отправления; город/аэропорт прибытия; время отправления; время прибытия.

Таблица 1.4

Фрагмент расписания движения ВС на внутрироссийских магистральных авиалиниях

Код п/п	Код авиа-компании	Номер рейса	Начало навигации	Конец навигации	Пн	Вт	Ср	Чт	Пт	Сб	Вс	Город отправления	Аэропорт отправления	Время отправления	Город прибытия	Аэропорт прибытия	Время прибытия
1	ЗР	1111	09.07.2006	23.07.2006	0	0	0	1	0	0	1	МОС	ДМД	21:20:00	БАН	БАН	4:25:00
2	ЗР	1111	26.07.2006	24.09.2006	0	0	1	1	0	0	1	МОС	ДМД	21:20:00	БАН	БАН	4:25:00
...

Анализ проводился на основе расписаний движения ВС за 2006 год. Выделено 1039 авиалиний, на которых осуществляется навигация в течение года хотя бы однажды. Для каждой авиалинии (город вылета – город прилёта) рассчитывался показатель состояния, определяющий продолжительность функционирования авиалинии в течение года – «навигационный период» авиалинии. Он определяется как суммарное количество недель в году, когда на авиалинии осуществляются полёты.

На рисунке 1.15 представлена картина полётов на авиалиниях в течение 2006 года. По вертикальной оси упорядочены авиалинии по количеству недель, в которые осуществлялись полёты за год, по горизонтальной оси перечислены недели года по порядку (от 1 до 53 недели).

Для каждой авиалинии ячейка, соответствующая неделе года, когда на авиалинии осуществляются полёты, закрашивается серым цветом, а ячейки, соответствующие неделям, когда полёты на авиалинии не осуществляются, не закрашиваются. Авиалинии по периоду навигации условно можно разделить на три группы: авиалинии, на которых полёты осуществлялись круглогодично (нижняя часть рисунка 1.15); в течение некоторой части года (средняя часть рисунка 1.15); эпизодически (верхняя часть рисунка 1.15).

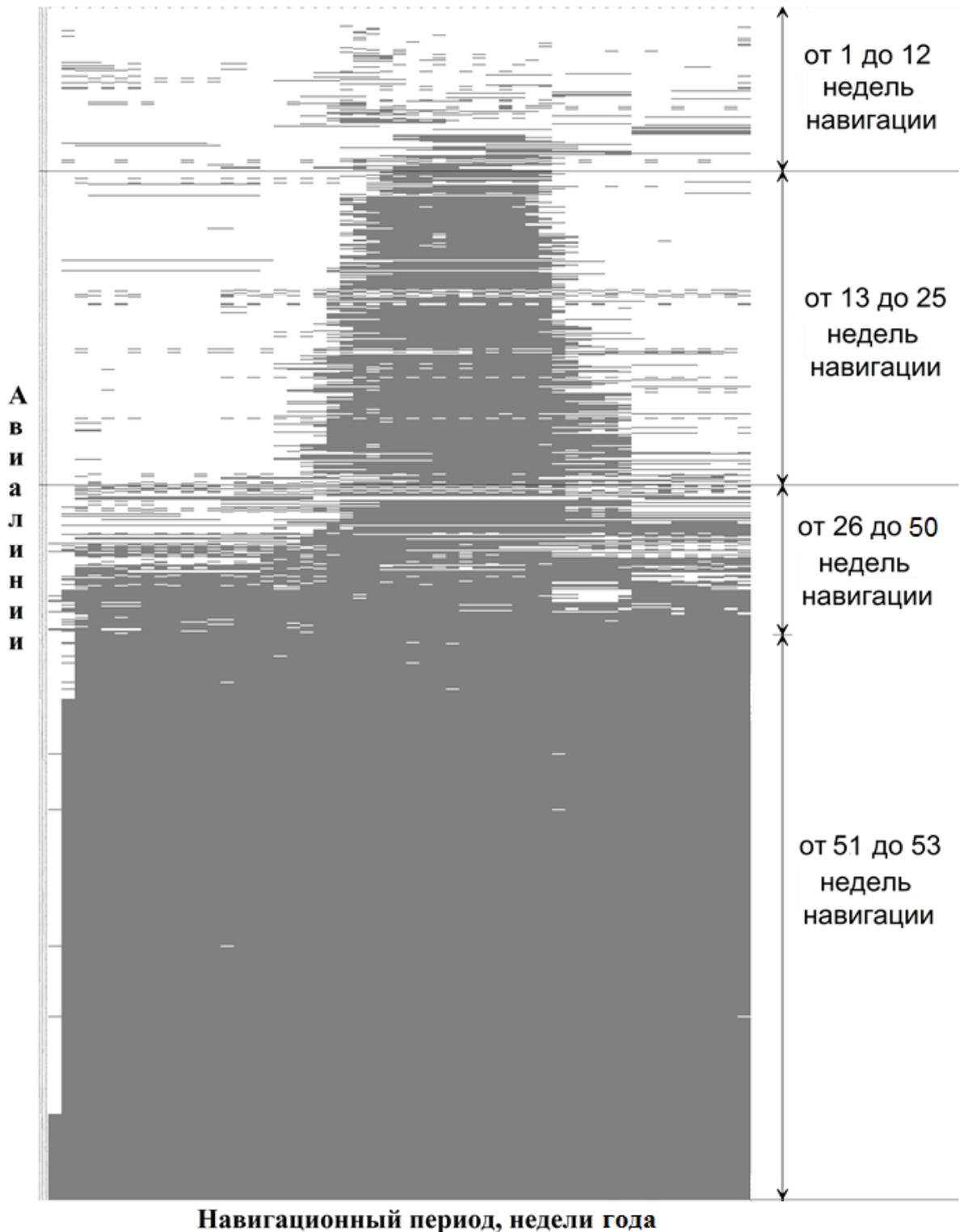


Рисунок 1.15 – Картина полётов на авиалиниях в течение 2006 года

На рисунке 1.16 представлены данные по количеству авиалиний (нарастающим итогом), имевших в 2006 году определённый период навигации. Увеличение *навигационного периода* при нарастании количества авиалиний происходит неравномерно. Изменение наклона кривой (рисунок 1.16) свидетельствует о том, что различным диапазонам изменения навигационного периода соответствует различное количество авиалиний. Условно можно выделить четыре таких диапазона: от 1 до 12, от 13 до 25, от 26 до 50 и от 51 до 53 недель навигации. В работе принято, что авиалинии, имеющие период навигации менее 13 недель, можно считать эпизодическими и рассматривать такие авиалинии как «отсутствующие в течение года». Появление эпизодических авиалиний связано с факторами, не рассматриваемыми в настоящей работе в качестве основных.

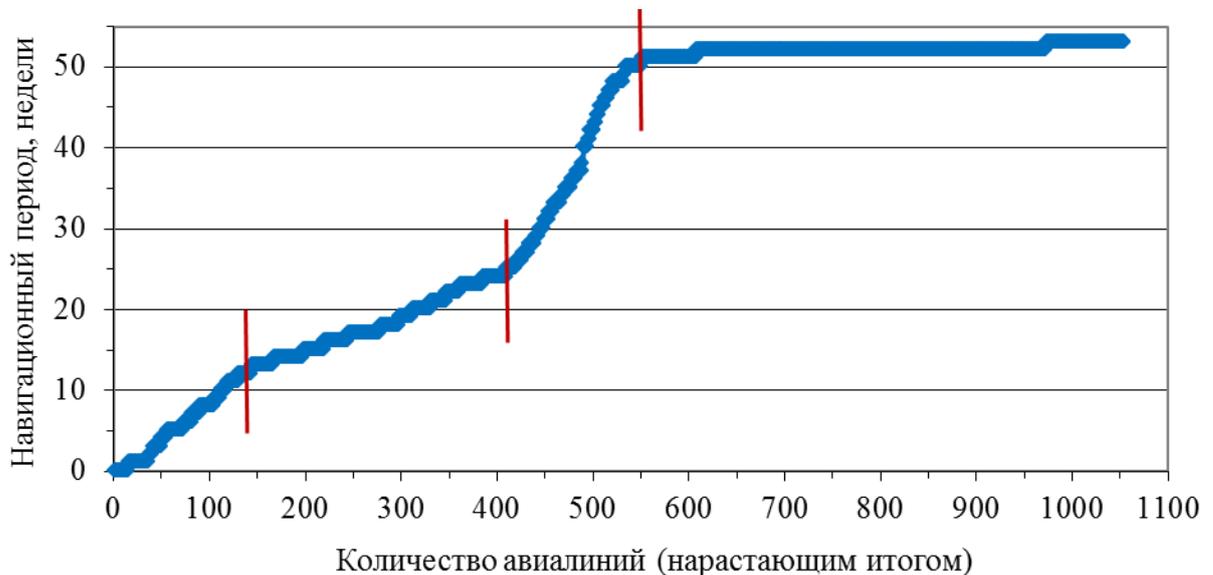


Рисунок 1.16 – Количество авиалиний, имевших в 2006 году определённый период навигации

Можно предположить, что на каждой авиалинии присутствуют две составляющих пассажиропотока – «круглогодичная» и «сезонная». Эти составляющие определяются в основном целевым назначением поездок пассажиров. Круглогодичный пассажиропоток характерен, в частности, для поездок в административный центр. Сезонный пассажиропоток связан, как правило, с поездками к местам отдыха. Представляется целесообразным разделять авиалинии на авиалинии с преобладанием той или иной составляющей пассажиропотока.

К авиалиниям с преобладанием круглогодичной составляющей пассажиропотока относятся авиалинии, начинающиеся с увеличивающейся интенсивностью (рисунок 1.17, а), продолжающиеся с постоянной интенсивностью (рисунок 1.17, б) и заканчивающиеся с уменьшающейся интенсивностью (рисунок 1.17, с).

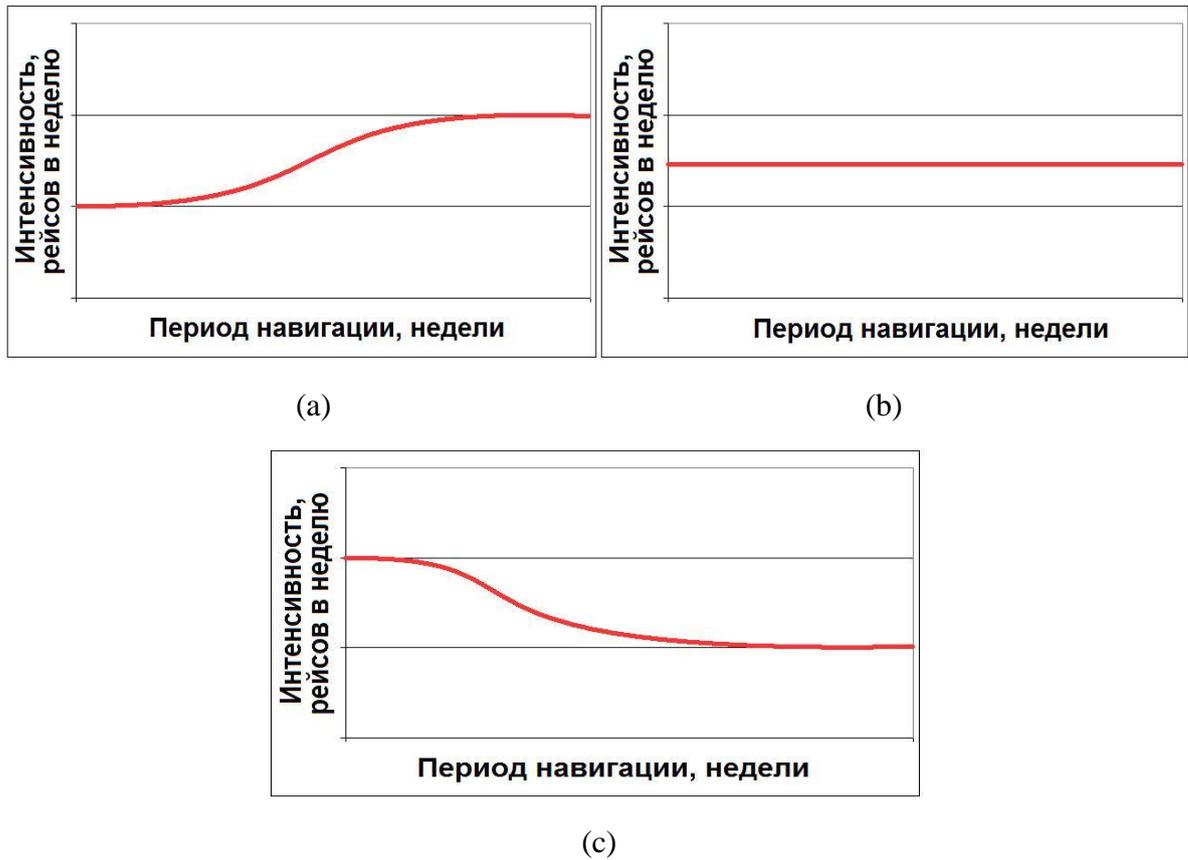


Рисунок 1.17 – Авиалинии с преобладанием круглогодичной составляющей пассажиропотока

К авиалиниям с преобладанием сезонной составляющей пассажиропотока относятся авиалинии, на которых интенсивность навигации в течение года меняется существенно, но в начале и в конце года является практически одинаковой (рисунок 1.18).

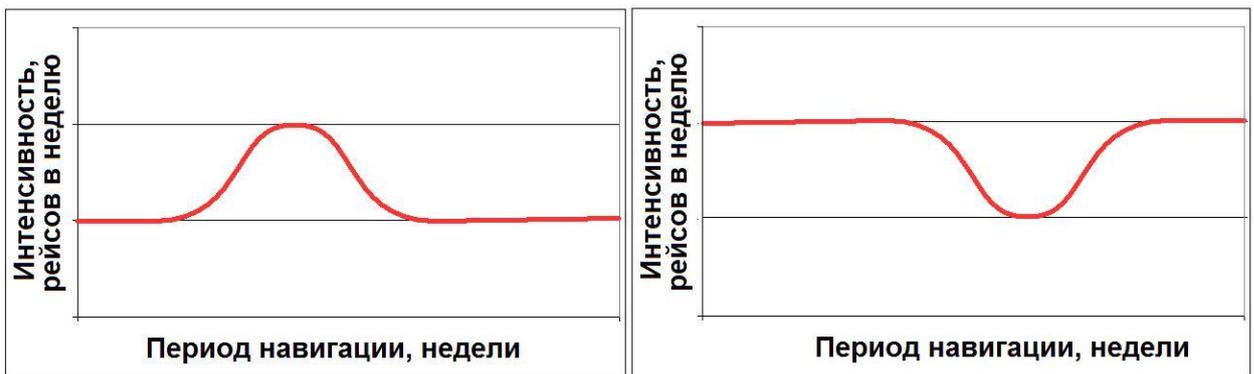


Рисунок 1.18 – Авиалинии с преобладанием сезонной составляющей пассажиропотока

В соответствии с приведёнными критериями авиалинии можно подразделить на «круглогодичные» (с преобладанием круглогодичной составляющей пассажиропотока) и «сезонные» (с преобладанием сезонной составляющей пассажиропотока). На рисунке 1.19 приведены данные о количестве круглогодичных (слева) и сезонных (справа) авиалиний, имевших в 2006 г. определённый период навигации. Разделение авиалиний с периодом

навигации менее 13 недель было выполнено чисто формально и не имеет значения для дальнейшего рассмотрения, поскольку наличие навигации на этих авиалиниях в течение года в работе игнорируется.

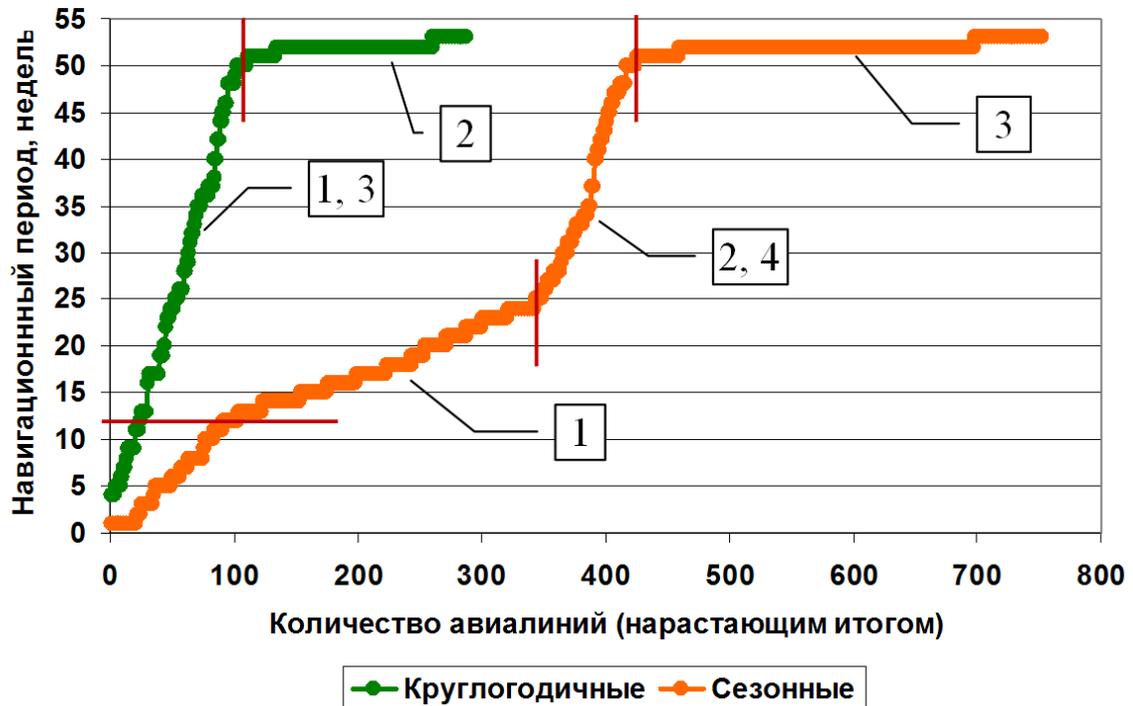


Рисунок 1.19 – Круглогодичные и сезонные авиалинии 2006 года

Полученные результаты позволяют судить о развитии круглогодичных и сезонных авиалиний. Это развитие происходит от авиалиний с небольшим периодом навигации к авиалиниям, функционирующим круглый год. Процесс развития авиалинии имеет ряд стадий. Для круглогодичных авиалиний можно выделить три стадии развития (рисунок 1.19, левая кривая):

- 1 стадия – появление авиалинии (период навигации авиалинии расположен ближе к концу года);
- 2 стадия – развитие авиалинии в основном за счёт круглогодичной составляющей пассажиропотока (период навигации авиалинии занимает почти весь год);
- 3 стадия – исчезновение авиалинии (период навигации авиалинии расположен ближе к началу года).

К первому участку кривой (большой угол наклона) относятся авиалинии, находящиеся на 1 и 3 стадиях развития (рисунок 1.19, левая кривая). Ко второму участку кривой (горизонтальному) – авиалинии, находящиеся на 2 стадии развития. Количество круглогодичных авиалиний, находящихся на 2 стадии развития, в два раза превышает суммарное количество авиалиний, находящихся на 1 и 3 стадиях. Столь высокое относительное

количество «появляющихся» и «исчезающих» круглогодичных авиалиний свидетельствует об активной фазе развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний.

Для сезонных авиалиний можно выделить четыре стадии развития (рисунок 1.19, правая кривая):

- 1 стадия – развитие авиалинии за счёт сезонной составляющей пассажиропотока (период навигации авиалинии расположен в середине или в начале и в конце года);
- 2 стадия – перехода к функционированию авиалинии в течение всего года (период навигации авиалинии достаточно большой и расположен ближе к концу года);
- 3 стадия – развитие авиалинии как за счёт сезонной, так и круглогодичной составляющих пассажиропотока (период навигации авиалинии занимает почти весь год);
- 4 стадия – переход к сезонному функционированию авиалинии (период навигации авиалинии достаточно большой и расположен ближе к началу года).

К первому участку кривой (небольшой угол наклона) относятся авиалинии, находящиеся на 1 стадии развития (рисунок 1.19, правая кривая). Ко второму участку кривой (большой угол наклона) относятся авиалинии, находящиеся на 2 и 4 стадиях развития. К третьему участку кривой (горизонтальному) – авиалинии, находящиеся на 3 стадии развития. Первый участок кривой соответствует периоду навигации $13 \div 25$ недель в год. Количество сезонных авиалиний, находящихся на 1 стадии развития, достаточно велико – около 250. Можно предположить, что эта стадия развития авиалинии длится сравнительно долго. Второй участок кривой соответствует периоду навигации $26 \div 50$ недель в год. Угол наклона кривой увеличивается, и таких авиалиний сравнительно немного – менее 100. Авиалинии этого участка находятся на переходных стадиях своего развития. Третий участок кривой соответствует периоду навигации $51 \div 53$ недели в год. Количество сезонных авиалиний, находящихся на 3 стадии развития, достаточно велико – более 300.

Выделение стадий развития сезонных и круглогодичных авиалиний проведено на основании анализа данных о длительности навигационного периода внутрироссийских магистральных авиалиний. Этот анализ позволяет отделить авиалинии, находящиеся в коротких переходных стадиях развития, от стабильно развивающихся авиалиний. Для более полной характеристики состояния авиалиний в течение года была использована информация о регулярности и интенсивности полётов воздушных судов, также содержащаяся в расписании движения ВС на внутрироссийских магистральных авиалиниях в 2006 году.

Для одной и той же авиалинии в один и тот же навигационный период полёты ВС могут осуществлять несколько авиакомпаний с различной «регулярностью» (количество дней навигации в неделю) и «интенсивностью» (количество рейсов в неделю) полётов. Таким образом, в общем случае для одной авиалинии *регулярность* и *интенсивность* полётов может

меняться от недели к неделе в течение года. Для того чтобы усреднить эти данные, для каждой авиалинии на основе данных о навигационном периоде авиалинии, суммарном количестве дней в году, когда осуществляются полёты на авиалинии, и о суммарном количестве рейсов на авиалинии за год были сформированы следующие показатели развития авиалинии:

– *средняя регулярность* – осреднённое за год количество дней в неделю, когда осуществляются полёты на авиалинии, определяемое по формуле:

$$\frac{\sum \text{Количество дней навигации в году}}{\sum \text{Количество недель навигации в году}};$$

– *средняя интенсивность* – осреднённое за год количество рейсов в неделю, определяемое по формуле:

$$\frac{\sum \text{Количество рейсов за год}}{\sum \text{Количество недель навигации в году}}.$$

На рисунке 1.20 представлены данные о навигационном периоде существующих в 2006 году авиалиний в пространстве показателей «средняя регулярность» (дней в неделю) и «средняя интенсивность» (рейсов в неделю).

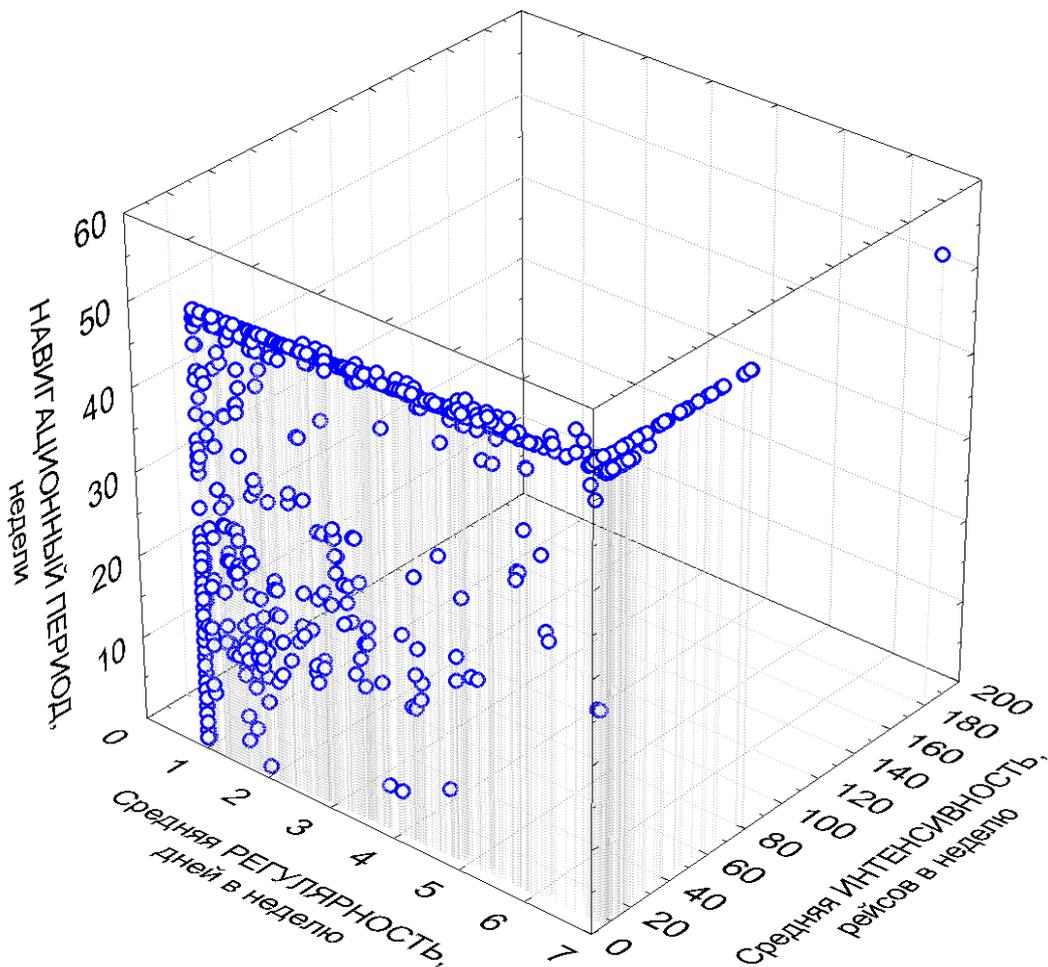


Рисунок 1.20 – Распределение авиалиний, существующих в 2006 г., в пространстве показателей «средняя регулярность» и «средняя интенсивность»

Показательно, что большая часть авиалиний концентрируется вдоль рёбер трёхмерного куба с минимальными значениями средней регулярности и средней интенсивности, с максимальным значением навигационного периода и минимальным значением средней интенсивности, а также с максимальными значениями навигационного периода и средней регулярности. Место расположения авиалинии в пространстве трёх показателей указывает на стадию её развития, которая определяется уровнем пассажиропотока. Увеличение годового пассажиропотока на данной авиалинии приводит к необходимости увеличения числа полётов ВС в течение года.

Наиболее рациональные варианты развития круглогодичных и сезонных авиалиний можно представить следующим образом. Как круглогодичная, так и сезонная авиалинии при возникновении располагаются, как правило, в окрестности ребра с минимальными значениями средней регулярности и средней интенсивности. В своём развитии круглогодичная авиалиния быстро достигает максимального значения навигационного периода. Напротив, сезонная авиалиния может достаточно долго развиваться путём увеличения числа полётов ВС в течение года за счёт увеличения средней регулярности полётов и оставаться в рамках практически постоянного начального периода навигации. Только с появлением на сезонной авиалинии заметной круглогодичной составляющей пассажиропотока она переходит в стадию круглогодичного функционирования со значением навигационного периода, близким к максимальному.

Развитие круглогодичных и сезонных авиалиний на стадии круглогодичного функционирования происходит одинаково. Увеличение числа полётов в течение года происходит сначала за счёт роста средней регулярности и только потом за счёт роста средней интенсивности. Учитывая расположение авиалинии в пространстве показателей состояния в течение года, можно предложить следующую классификацию авиалиний по стадиям развития, выделив следующие группы (рисунок 1.21).

- I. *Круглогодичные ежедневные авиалинии* – с полным периодом навигации и растущей средней интенсивностью (зелёные маркеры).
- II. *Круглогодичные неежедневные авиалинии* – с полным периодом навигации и растущей средней регулярностью (синие маркеры).
- III. *Некруглогодичные неежедневные авиалинии* – с неполным периодом навигации и растущей средней регулярностью, в основном – сезонные авиалинии (сиреневые маркеры).
- IV. *Некруглогодичные еженедельные авиалинии* – с неполным периодом навигации, появившиеся или исчезнувшие в данном году (красные маркеры).
- V. *Эпизодические авиалинии* – с периодом навигации менее 13 недель (чёрные маркеры).

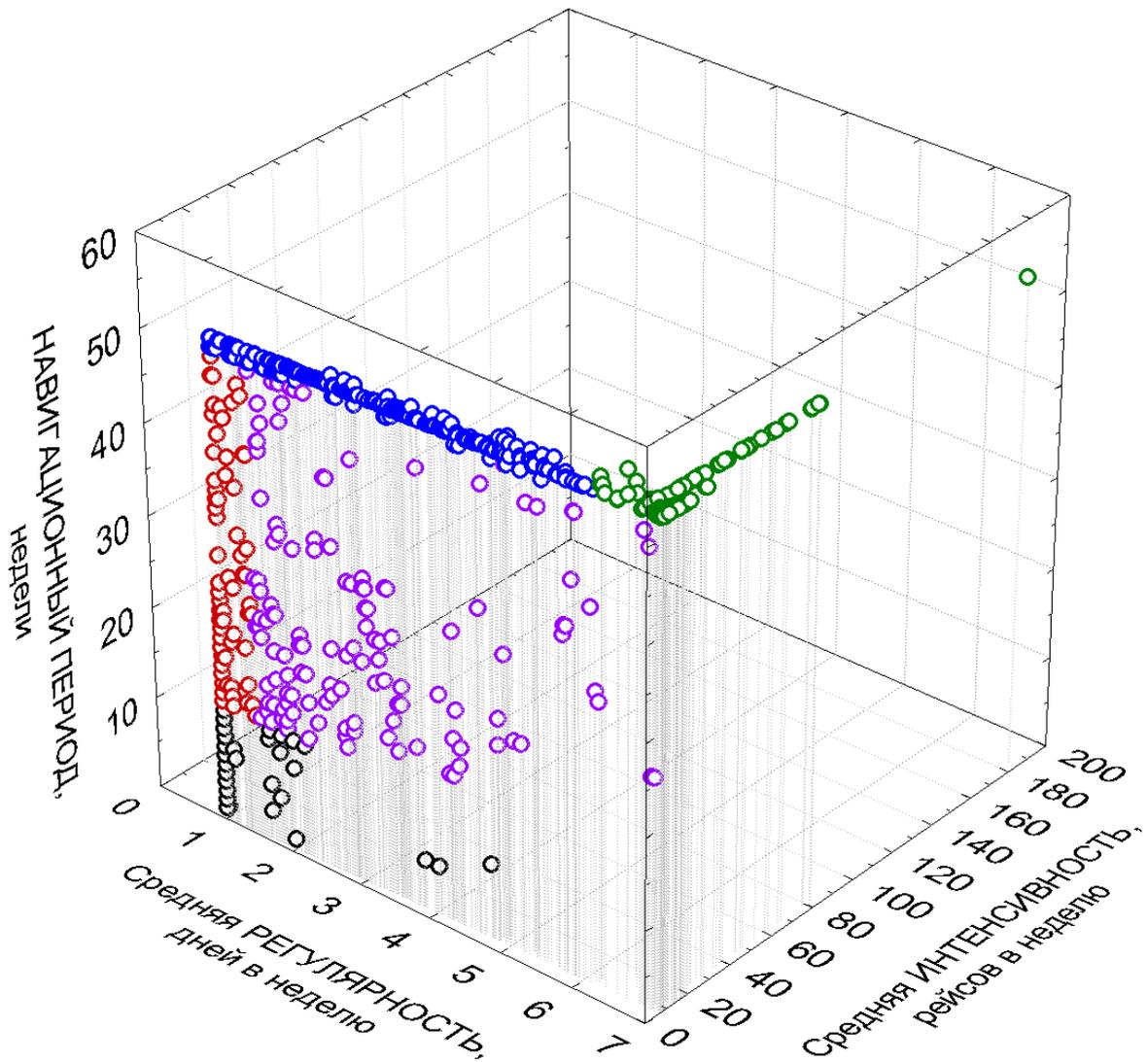


Рисунок 1.21 – Классификация авиалиний по стадиям развития

Развитие авиалинии связано с её переходом из одной группы авиалиний в другую. Эти переходы происходят в направлении от IV-ой группы к I-ой. Для сезонных авиалиний сначала происходит определённое наращивание регулярности, далее наращивание навигационного периода до насыщения, наращивание регулярности до насыщения и лишь затем наращивание интенсивности. Для круглогодичных авиалиний вначале происходит наращивание навигационного периода до насыщения, далее наращивание регулярности до насыщения и лишь затем наращивание интенсивности.

В таблице 1.5 приведены основные количественные характеристики каждой из 5 групп авиалиний. Доля круглогодичных ежедневных авиалиний (I-ая группа) не превышает 15% от общего числа внутрироссийских магистральных авиалиний. Только в отношении этих авиалиний можно чётко утверждать, что полёты на них осуществляются ежедневно в течение практически всего года. На авиалиниях других групп полёты выполняются либо не ежедневно, либо не круглый год.

Характеристики 5 групп авиалиний

Цвет маркера					
№ группы	I	II	III	IV	V
Навигационный период (недель)	51 ÷ 53		13 ÷ 50		<13
Средняя регулярность (дней в неделю)	> 6	≤ 6	≥ 1,5	< 1,5	1 ÷ 7
Количество авиалиний (всего 1039 авиалиний)	159 15%	345 33%	192 19%	215 21%	128 12%

Таким образом, процесс эволюции магистральной авиалинии включает ряд этапов (от её появления до исчезновения). На каком этапе развития находится авиалиния можно судить по её периоду навигации, средней регулярности и средней интенсивности её использования для полётов ВС в течение года. Присутствие авиалинии (прямого авиасообщения между городами) в структуре авиатранспортной сети страны не может быть определено однозначно.

На основе результатов проведённых исследований авиатранспортной сети России можно сформулировать следующие предпосылки, использованные при разработке метода прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний:

- к 2000 году в стране в основном сложились экономические условия, способствующие устойчивому развитию авиатранспортной сети;
- сеть магистральных авиалиний страны имеет безмасштабную природу, её развитие подчиняется законам развития безмасштабных графов (для сети характерны механизмы предпочтительного присоединения и ассортативности при образовании новых связей);
- невозможность однозначного определения присутствия в структуре сети (в силу различных периодов навигации, средней регулярности и средней интенсивности использования для полётов ВС в течение года) той или иной авиалинии (прямого авиасообщения между городами) требует использования при разработке метода нечёткого понятия «авиалиния существует».

ГЛАВА 2. ЗАДАЧА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СЕТИ ВНУТРИРОССИЙСКИХ МАГИСТРАЛЬНЫХ АВИАЛИНИЙ

Традиционные методы прогнозирования развития сети основаны на использовании индивидуальных и групповых моделей прогнозирования пассажирских перевозок для пар городов. К индивидуальным моделям относятся модели, для которых оценка параметров проводится только по статистике, относящейся непосредственно к данной паре городов, поэтому индивидуальная модель может быть определена только для той пары городов, по которой имеется статистика за достаточно большой период времени. Групповая модель является общей для многих пар городов. Как правило, групповые модели прогнозирования развития сети используются при формировании прогнозов, структурированных по зонам дальности или интенсивности пассажиропотока. Групповые модели более предпочтительны для прогнозирования авиаперевозок на отдалённую перспективу. Они также позволяют решать задачи прогнозирования перевозок для пар городов, которые в настоящее время не связаны авиалиниями.

В настоящей работе предлагается подход к решению задачи прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний, основанный на анализе возможности осуществления прямого авиасообщения для каждой пары городов из заданной совокупности. Чаще всего целесообразность прямого авиасообщения между двумя городами обосновывается авиакомпаниями наличием достаточного (с точки зрения экономической эффективности) объёма прямого пассажиропотока. Наличие транзитного пассажиропотока, как правило, является дополнительным стимулирующим фактором. Таким образом, задача прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний может быть сведена к задаче прогнозирования существования прямого авиасообщения между двумя городами из заданной совокупности.

В основе предлагаемого подхода лежит гипотеза о том, что *существуют универсальные* (не зависящие явно от времени и не привязанные к конкретной паре городов) *правила, определяющие существование* авиалинии (прямого авиасообщения между двумя городами) *или её отсутствие в зависимости от характерного только для данной пары городов сочетания значений ограниченного количества измеряемых параметров*. В дальнейшем в работе эти правила будут называться «условиями существования» авиалинии (УСА). Выявление этих правил позволит также ответить на вопрос о существовании данной авиалинии в случае изменения значений параметров. Перебор всех пар городов, имеющих аэропорты (входящие в

состав магистральной сети), позволит сделать вывод об изменении структуры сети в будущем. «Условия существования» авиалинии могут быть сформированы на основе статистических данных об одновременно наблюдаемых (измеряемых) параметрах для пар городов, между которыми есть прямая авиасвязь или между которыми она отсутствует. Предполагается, что наличие транзитных пассажиров не оказывает влияние на «условия существования» прямого авиасообщения между двумя городами, т.е. дополнительной информации о других городах не требуется.

На основе доступных статистических данных разработана *информационная модель УСА*. Подобные модели основаны на гипотезе о существовании статистической связи между «входом» и «выходом» системы, т.е. отображением входной информации в выходную. Важным преимуществом информационных моделей перед математическими является отсутствие ограничений на сложность (например, нелинейный характер или многомерность) исследуемой связи. В отличие от имитационных моделей в информационных моделях параметр «время» не является существенным и исключается из непосредственного рассмотрения. «Время» остаётся лишь в «опосредованном» виде, поскольку исходные данные – измеряемые параметры – соответствуют определённым моментам времени. Кроме этого, важным преимуществом информационных моделей является их способность сохранять свою адекватность в условиях неопределённости – в случаях нечёткости или неточных значений измеряемых параметров.

Как правило, информационные модели уступают формальным математическим моделям и экспертным системам по степени «объяснимости» получаемых результатов, однако отсутствие ограничений на сложность моделируемых систем определяет их важную практическую значимость. При разработке информационной модели определяющую роль играет правильный выбор состава и качество содержания исходной информации. Недостаточная информация не позволяет создать качественную информационную модель. В то же время избыточная информация может привести к «зашумлению» исходных данных, что также может негативно отразиться на качестве информационной модели.

В целях детализации описания модели «условий существования» авиалинии как информационной модели:

- предложен способ формализации понятия «авиалиния существует» для устранения нечёткости в определении выходной переменной модели;
- сформировано множество измеряемых параметров, определяющих существование прямого авиасообщения для пары городов;

– обоснован выбор методов и программных технологий для реализации данной модели.

2.1 Формализация понятия «авиалиния существует»

Для задания значения выходной переменной модели «условий существования» авиалинии необходимо выполнить формализацию нечёткого понятия «авиалиния существует». В разделе 1.3 показано, что авиалинии могут иметь различный период навигации в году, для них может быть характерна различная степень регулярности и интенсивности движения ВС. Авиасвязь между двумя городами может возникать, исчезать, отсутствовать или сохраняться в течение года. Это связано не только с типом авиалинии, но и с этапом её развития, т.е. авиалиниям свойственна различная «степень существования». Следовательно, бинарного определения наличия или отсутствия авиасвязи (существования авиалинии) недостаточно.

В работе предложен вариант формализации понятия «авиалиния существует», который учитывает не только показатели состояния авиалинии в текущем году, но и динамику её развития. Определение значения выходной переменной в зависимости только от интенсивности движения на авиалинии ВС в одном году не позволяет достаточно обоснованно судить о стабильности состояния авиасвязи или о направлении и темпах развития прямого авиасообщения между двумя городами. Использование информации о движении воздушных судов между этими городами в предыдущий и последующий годы позволяет более адекватно раскрыть содержание понятия «авиалиния существует». С этой целью были рассмотрены базы данных расписаний полётов не только 2006 года, но 2005 и 2007 годов. На основе информации о движении ВС в эти годы были подготовлены данные о суммарном количестве вылетов воздушных судов за год для каждой пары городов (таблица 2.1).

На основании количества вылетов для каждой авиалинии в каждом году делается заключение о наличии (существовании) (1) или отсутствии (0) авиалинии в данном году. Если суммарное количество вылетов за год < 12 , то полагается, что данная авиалиния является эпизодической, и делается заключение, что она отсутствует (0) в данном году (обнуляется количество вылетов за год). Если суммарное количество вылетов за год ≥ 12 , то делается заключение, что авиалиния присутствует (1) в данном году. В итоге определяется количество лет из трёх, в которых данная авиалиния присутствует.

Из трёх значений суммарного количества вылетов за год для каждой авиалинии определяется максимальное. По этому значению нормируются все три значения суммарного количества вылетов за год для данной авиалинии. Таким образом, у каждой авиалинии (с суммарным количеством вылетов за год ≥ 12 хотя бы в одном году из трёх) хотя бы одно нормированное значение суммарного количества вылетов за год равно 1 (таблица 2.1).

Таблица 2.1

Фрагмент таблицы, создаваемой при анализе расписаний полётов для 2005, 2006 и 2007 гг.

№ авиалинии	Авиалиния	Суммарное количество вылетов за год			Наличие (1) или отсутствие (0) авиалинии			\sum лет	Нормированное значение суммарного количества вылетов за год		
		2005 г.	2006 г.	2007 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.		2005 г.	2006 г.	2007 г.
1	АБН-АЛД	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
...	...										
8	АБН-БАН	78	0	0	1	0	0	1	1	0	0
...	...										
14	АБН-ВВО	486	53	53	1	1	1	3	1	0,109	0,109
...	...										
23	АБН-ЕМВ	67	206	0	1	1	0	2	0,325	1	0
...	...										
308	АМД-ННР	29	29	4	1	1	0	2	1	1	0
...	...										
377	АНА-БЛР	7	5	2	0	0	0	0	0	0	0
...	...										
15006	ЯКТ-ЮЖХ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Такой подход позволяет представить авиалинии на поверхности трёхмерного куба нормированных значений суммарного количества вылетов в 2005, 2006 и 2007 гг. (рисунок 2.1). Подобное представление позволяет визуализировать изменения в количестве вылетов на авиалинии в течение рассматриваемых трёх лет.

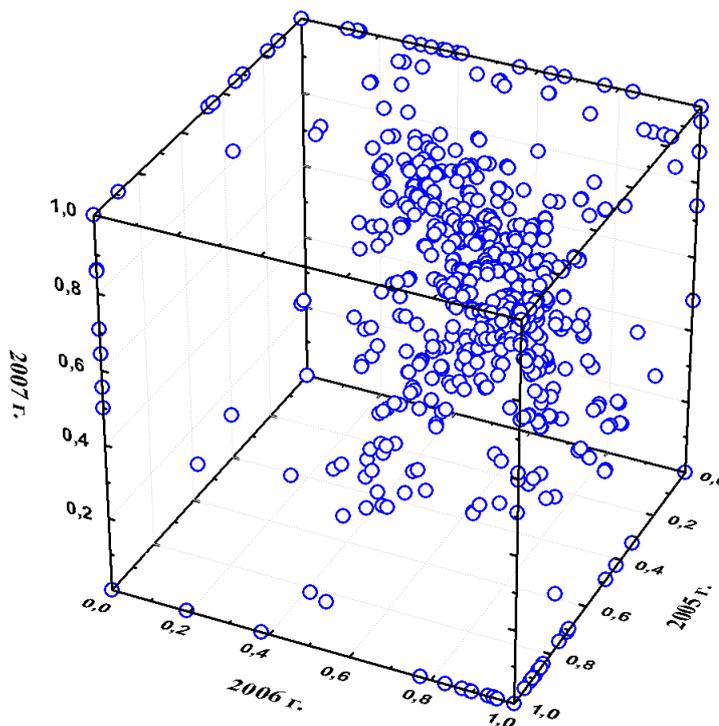


Рисунок 2.1 – Авиалинии в пространстве нормированных значений суммарного количества вылетов на авиалиниях в 2005, 2006 и 2007 гг.

Из рисунка 2.1 видно, что есть авиалинии, сосредоточенные в районе вершины куба с координатами (1;1;1), для которых изменения количества вылетов по рассматриваемым годам незначительны, а есть авиалинии, сосредоточенные по рёбрам куба, которые присутствуют только в один или два года из рассматриваемых трёх. Таким образом, можно заключить, что близость авиалинии к вершине куба с координатами (1;1;1) свидетельствует о стабильности её присутствия в течение рассматриваемых трёх лет.

Степень близости авиалинии к вершине куба с координатами (1;1;1) можно оценить углом α между диагональю куба $\vec{a}(1; 1; 1)$ и вектором $\vec{b}(x_{2005}; x_{2006}; x_{2007})$, где x_i – суммарное количество вылетов на авиалинии в i -м году (рисунок 2.2, а). Формула для расчёта:

$$\cos \alpha = \cos(\vec{a} \wedge \vec{b}) = \frac{\vec{a} \times \vec{b}}{|\vec{a}| \times |\vec{b}|} = \frac{1 \cdot x_{2005} + 1 \cdot x_{2006} + 1 \cdot x_{2007}}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2} \times \sqrt{x_{2005}^2 + x_{2006}^2 + x_{2007}^2}}.$$

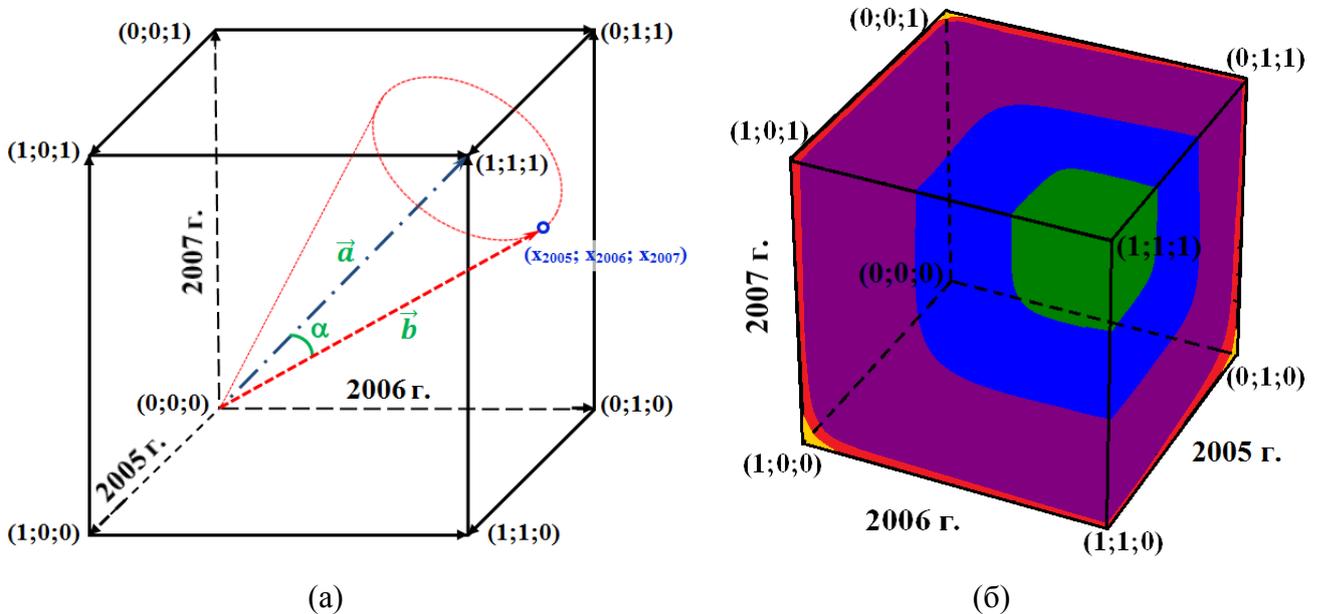


Рисунок 2.2 – Оценка степени близости авиалинии к вершине куба с координатами (1;1;1)

(а) – угол α отклонения от пространственной диагонали куба $\vec{a}(1; 1; 1)$

(б) – разными цветами представлены точки поверхности куба, соответствующие разным диапазонам значений угла α

Тогда, переходя к формированию значений выходной переменной, можно предложить представленную в таблице 2.2 формализацию понятия «авиалиния существует», исходя из стабильности состояния авиалинии в течение рассматриваемых трёх лет, где y – значение выходной переменной. В таблице представлены принятые диапазоны значений угла α и соответствующие им значения выходной переменной y , рассчитанные по начальному углу диапазона значений угла α и округлённые. Формула для расчёта выходной переменной y :

$y(\alpha) = \frac{90^\circ - \beta(\alpha)}{90^\circ}$, где $\beta(\alpha)$ – начальный угол диапазона значений угла α . На рисунке 2.2 (б)

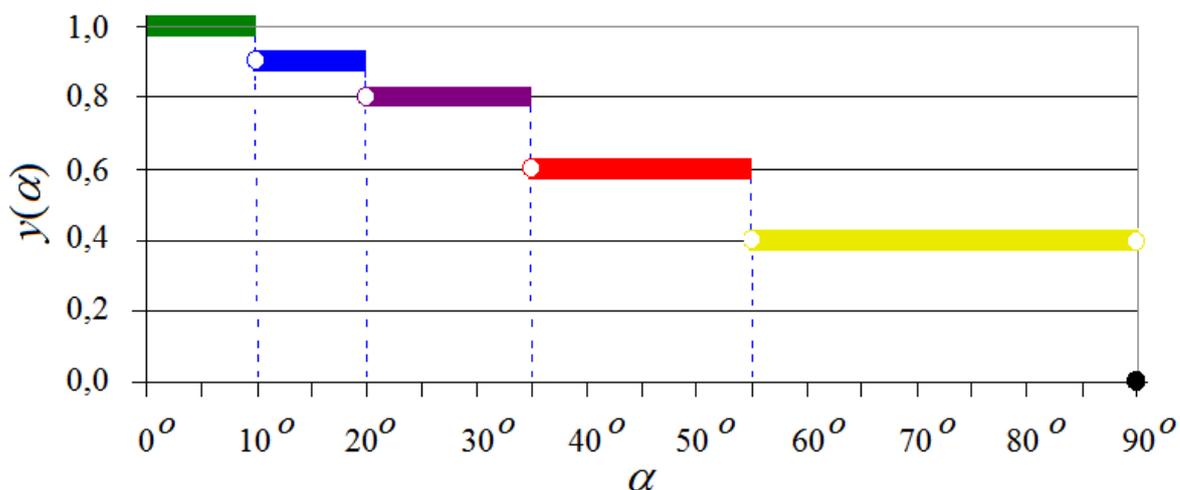
поверхность куба размечена разными цветами по диапазонам значений угла α в соответствии с таблицей 2.2. Значение выходной переменной y для каждой авиалинии определяется по количеству лет наличия авиасвязи, а в случае наличия авиасвязи во всех трёх годах – по принадлежности к одному из диапазонов значений угла α , указанных в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Определение значения выходной переменной y

Наличие авиасвязи в 2005-2007 гг.	Диапазон значений угла α	Значение выходной переменной y	Интерпретация значения y
3 года	$[0^\circ \div 10^\circ)$	1	«Существующая» авиалиния
	$[10^\circ \div 20^\circ)$	0.9	
	$[20^\circ \div 35^\circ)$	0.8	
2 года	$[35^\circ \div 55^\circ)$	0.6	«Несуществующая» авиалиния
1 год	$[55^\circ \div 90^\circ)$	0.4	
0 лет	$[90^\circ]$	0	

Кусочно-постоянная функция принадлежности выходной переменной $y(\alpha)$, сформированная в соответствии с данными таблицы 2.2, представлена на рисунке 2.3.

Рисунок 2.3 – Кусочно-постоянная функция принадлежности $y(\alpha)$

Авиалинии, представленные на поверхности трёхмерного куба (нормированных значений суммарного количества вылетов в 2005, 2006 и 2007 гг.), закрашены цветами в соответствии с определёнными для них значениями выходной переменной y (рисунок 2.4).

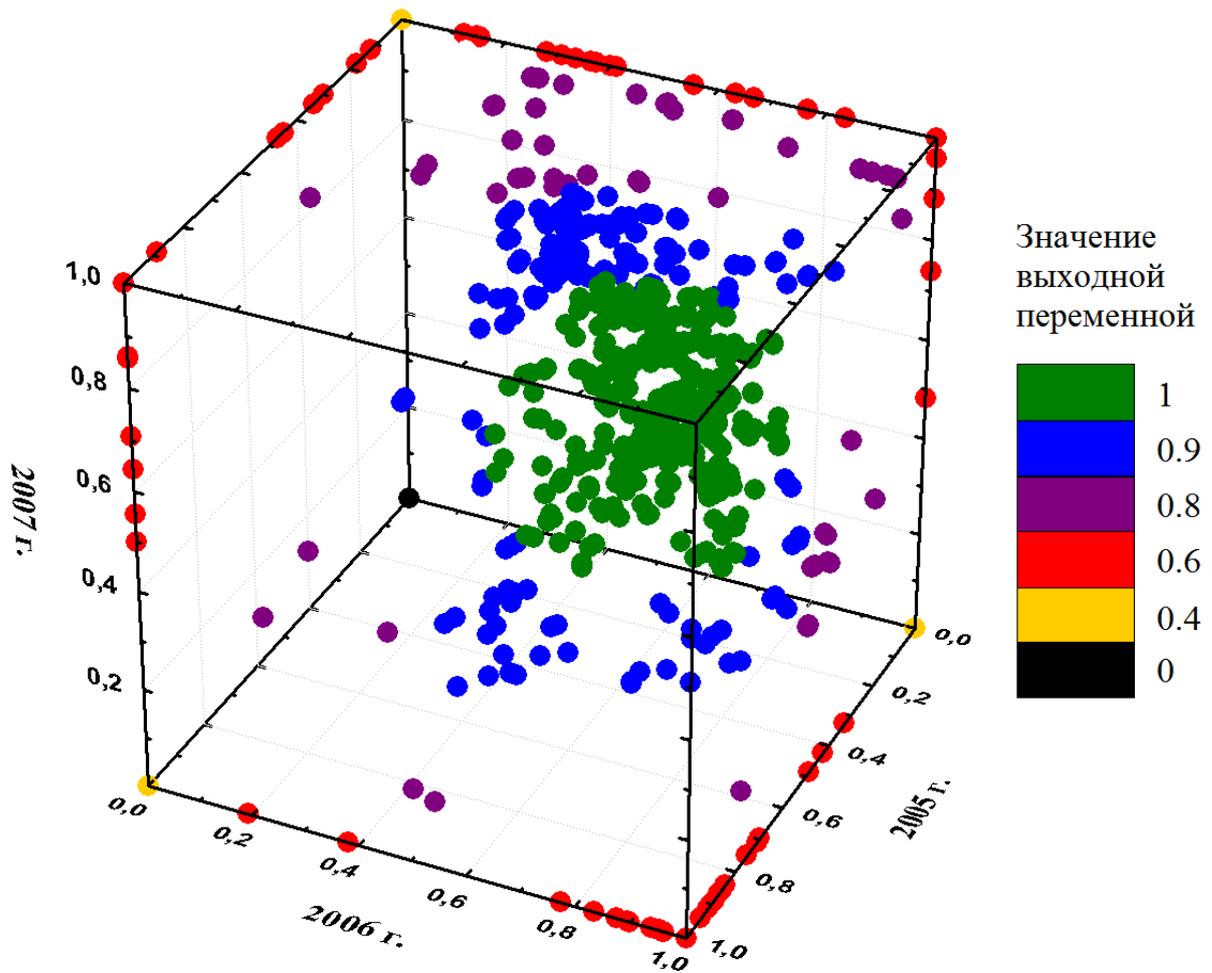


Рисунок 2.4 – Расположение авиалиний в соответствии со значением выходной переменной y (степенью существования авиалинии)

С целью уменьшения степени «зашумления» в исходных данных были выполнены следующие изменения. Помимо эпизодических авиалиний (количество рейсов в течение года < 12), значение выходной переменной было изменено на 0 (авиалиния отсутствует) у следующих категорий авиалиний:

- 105 авиалиний с «нулевой» средней рейсовой загрузкой, т.е. авиалинии, которые были заявлены в расписании, но полёты ВС на них не выполнялись (согласно данным о перевезённых в 2006 г. пассажирах, приведённым в сборнике «Информация об объёмах перевозок между пунктами полёта за 2000 – 2007 гг.», подготовленном ЗАО «Транспортная клиринговая палата»);

- 118 чисто транзитных авиалиний – авиалинии, которые в течение года существуют только в качестве начального или конечного либо промежуточного участка маршрута полёта ВС и не существуют сами по себе (в виде одноучасткового маршрута полёта ВС).

Для графического представления сети внутрироссийских магистральных авиалиний в работе используется **OD**-матрица (origin/destination matrix) – квадратная матрица размера $n \times n$, где n – число узлов в рассматриваемой транспортной сети (рисунок 2.5). Каждый узел

рассматривается как в качестве пункта отправления, так и в качестве пункта прибытия. Строки матрицы ($i = 1, 2, \dots, n$) соответствуют пунктам отправления (X_i), столбцы матрицы ($j = 1, 2, \dots, n$) – пунктам прибытия (X_j). Ячейка матрицы u_{ij} соответствует потоку из пункта отправления (X_i) в пункт прибытия (X_j). Каждая ячейка матрицы (за исключением диагональных ячеек) соответствует потенциальному транспортному потоку. Под «потенциальным транспортным потоком» подразумевается какая-либо характеристика возможной транспортной связи между двумя рассматриваемыми узлами. Каждой паре узлов в матрице соответствуют две ячейки, симметричные относительно диагонали матрицы, которые характеризуют транспортные потоки между узлами в противоположных направлениях.

$i \setminus j$	X_1	X_2	...	X_i
X_1	u_{11}	u_{12}		u_{1i}		
X_2	u_{21}	u_{22}		u_{2i}		
...						
...						
X_i	u_{i1}	u_{i2}		u_{ij}		
...						

Рисунок 2.5 – Схема OD-матрицы

(X_i – пункт отправления, X_j – пункт прибытия, u_{ij} – поток из X_i в X_j)

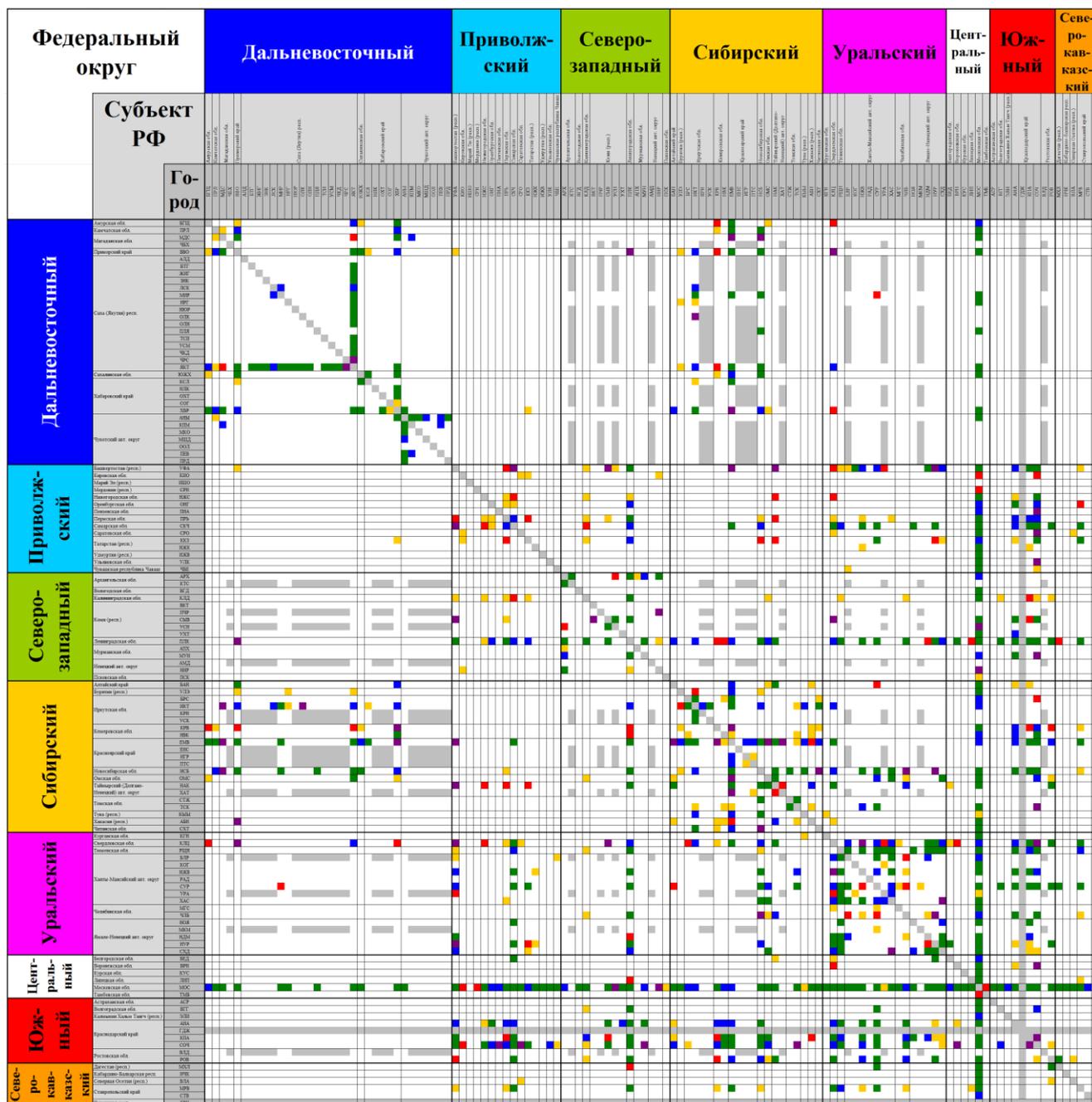
Исходя из перечня 145 российских аэропортов, приведённого в Приложении А, в работе исключаются из рассмотрения 14 аэропортов, не имевших магистральных авиалиний в период 2000 – 2006 гг.: АЧН (Ачинск), БРЯ (Брянск), ВЕК (Великие Луки), ВОЗ (Воздвиженка), ДИК (Диксон), ЗВТ (Завитинск), ИВВ (Иваново), КАЛ (Калуга), КЛШ (Колпашево), ЛЕН (Ленино), МГН (Маган), СМЧ (Сеймчан), ТЕК (Тёплый Ключ), ТУЛ (Тула), а также 3 закрытых в период с 2003 по 2007 гг. аэропорта (полёты магистральных ВС в 2006 г. в эти аэропорты не осуществлялись) – БАО (Балаково), НЮГ (Нефтеюганск), УТК (Усть-Илимск). Аэропорт ГРН (Грозный), не имевший магистральных авиалиний в период 2000 – 2006 гг., не исключается из рассмотрения (в этот период в аэропорту проводились восстановительные работы, а в 2007 г. аэропорт был вновь введён в эксплуатацию), но авиалинии с ГРН в 2006 г. не рассматриваются. Также в рассмотрение вводится аэропорт ГДЖ (Геленджик), введённый в эксплуатацию в 2010 г., но авиалинии с ГДЖ в 2006 г. не рассматриваются.

Безмасштабная природа сети внутрироссийских магистральных авиалиний предполагает формирование сети в соответствии с принципом ассортативности. Согласно этому принципу

предполагается, что связь внутри одного субъекта РФ или одного ФО важнее, чем между разными. На основании этого из рассмотрения исключаются 778 авиалиний между городами, расположенными в разных ФО и имеющими аэропорты регионального значения. В 2006 г. на этих авиалиниях магистральные авиаперевозки не осуществлялись.

В результате в работе рассматривается сеть из 128 аэропортов, расположенных в 123 населённых пунктах (именуемых далее *городами*) России. Для населённого пункта введён код города (Приложение А). В случае, когда в городе имеется один аэропорт, код города совпадает с кодом этого аэропорта. В случае, когда в городе имеется несколько аэропортов, вводится код города, отличный от кодов этих аэропортов. В работе рассматриваются три города, имеющих несколько аэропортов – это Архангельск, Новосибирск и Москва. Для них введены следующие коды городов: код Архангельска – АРХ (коды аэропортов ВСЬ и АХГ), код Новосибирска – НСБ (коды аэропортов ТЛЧ и СВР), код Москвы – МОС (коды аэропортов БКВ, ДМД, ВНК и ШРМ). В этих случаях в качестве характеристик аэропорта города приняты характеристики аэропорта с наибольшей длиной ВПП.

OD-матрица рассматриваемой в работе сети авиалиний имеет блочную структуру (рисунок 2.6): города сгруппированы по субъектам РФ и федеральным округам с учётом образования в 2010 г. Северо-Кавказского ФО. При этом аэропорты, расположенные в Северо-Кавказском ФО, в 2006 г. рассматриваются как относящиеся к Южному ФО. В матрице представлены 123 города, однако в 2006 г. рассматриваются только 121 город. Как было указано выше, не рассматриваются города Грозный (ГРН) и Геленджик (ГДЖ). Это необходимо для удобства сравнения **OD**-матрицы авиалиний 2006 г. и прогнозных **OD**-матриц 2020 г. Таким образом, **OD**-матрица сети внутрироссийских магистральных авиалиний имеет размерность 123×123 , в ней отображается $123 \cdot 123 - 123 = 15006$ авиалиний, из которых рассматриваются $121 \cdot 121 - 121 - 778 = 13742$ авиалинии. В **OD**-матрице авиалиний 2006 г. (рисунок 2.6) цветом для каждой авиалинии отмечены значения выходной переменной. Матрица имеет практически симметричный вид. Небольшие различия между потоками «туда» и «обратно» определяются наличием «круговых» маршрутов и срезом временных интервалов (границы календарного года). Авиалинии в базах расписания рассматриваются как однонаправленные (в одном направлении). Наличие авиалинии хотя бы в одном направлении (т.е. без обратного) соответствует наличию авиасвязи между данными двумя городами. Поэтому далее для обоих направлений авиалинии («туда» и «обратно») выбирается единое значение выходной переменной, равное наибольшему из двух значений (даже если авиалиния существует в расписании только в одном направлении). После этой процедуры **OD**-матрица авиалиний 2006 г., соответствующих определённым значениям выходной переменной, приобретает «симметричный» вид.



Значение выходной переменной



Рисунок 2.6 – OD-матрица (несимметричная) авиалиний 2006 г., соответствующих определённым значениям выходной переменной

В таблице 2.3 приведены сводные данные по принятым значениям выходной переменной и соответствующим им количествам авиалиний.

Распределение рассматриваемых в работе авиалиний по значениям выходной переменной

Значение выходной переменной y	1	0.9	0.8	0.6	0.4	0
Количество авиалиний	434	192	70	90	208	12748
Σ	994					12748
	13742					

Таким образом, понятие «авиалиния существует» формализовано исходя из стабильности состояния авиалинии в течение трёх лет. Выходная переменная может принимать одно из следующих значений: 1, 0.9, 0.8, 0.6, 0.4 или 0. Предложенный способ формализации понятия «авиалиния существует» позволяет учесть «степень самого существования» (стабильность состояния, направление и темп развития) авиасвязи. Возможность подойти обоснованно и взвешено к заданию значений выходной переменной при формировании модели УСА позволит повысить качество моделирования.

2.2 Параметры, определяющие существование прямого авиасообщения между городами

Невозможно установить априори, какие из измеряемых параметров окажутся наиболее значимыми при формировании УСА. Для этого необходимо проведение численных экспериментов и анализ их результатов. Предпочтительно, чтобы начальный состав измеряемых параметров был достаточно широк: в результате численных экспериментов наиболее значимые параметры сохранятся, а наименее значимые и зависимые будут исключены из дальнейшего рассмотрения. Однако с ростом количества измеряемых параметров увеличивается объём информации, подлежащей сбору, предварительной обработке и хранению. В прогнозном периоде возникают дополнительные сложности с поиском большого объёма прогнозной информации, который, как правило, ограничен.

Проблеме исследования и прогнозирования спроса на пассажирские авиаперевозки на протяжении последних трёх десятилетий были посвящены исследования в ряде организаций, и в первую очередь в ГосНИИ ГА [1, 2, 46, 47]. В этих работах исследовалось влияние различных факторов на показатели пассажирских авиаперевозок, например: влияние ограничений провозной способности парка ВС на величину неудовлетворённого спроса [1]; влияние социально-экономических факторов на формирование пассажиропотоков [2]; влияние

дальности поездки [46], а также показателей подвижности населения на автомобильном и железнодорожном транспорте в междугородном сообщении [47] на распределение спроса. Методами факторного анализа [48] в [2] было определено четыре основных фактора: первый фактор характеризует изменения в размещении производительных сил по регионам страны; второй – обеспеченность населения регионов услугами железнодорожного транспорта на дальнее расстояние; третий – обеспеченность населения регионов услугами автомобильного транспорта; четвёртый – процессы, замедляющие урбанизацию населения регионов. Факторы были определены по количественно измеряемым параметрам, среди которых: валовой региональный доход, розничный товарооборот, объём выпуска промышленной продукции, реальный доход на душу населения, среднемесячная заработная плата рабочих и служащих, подвижность пассажиров на железнодорожном/автомобильном транспорте, протяжённость железнодорожной сети на 1000 жителей региона, протяжённость автомобильной сети на 1000 км² площади региона, процент городского населения в регионе и др. Анализ исследований, проведённых в указанных работах, показывает, что процессы, происходящие как внутри авиатранспортной системы, так и во внешней среде, могут быть охарактеризованы системой нескольких факторов, выраженных через значительно большее (по сравнению с количеством факторов) число измеряемых параметров.

Современный уровень развития информационных технологий позволяет работать с большими по объёму и составу массивами исходных данных, чем это было возможно 20-30 лет назад, а также – с неполными и нечёткими данными. На основании опыта исследования и прогнозирования спроса на пассажирские авиаперевозки последних трёх десятилетий, а также проведённого анализа тенденций развития и принципов построения современной сети внутрироссийских магистральных авиалиний (глава 1) в работе предлагается система факторов, определяющих «условия существования» авиалинии:

- «генерационные возможности города»,
- «целевой потенциал города»,
- «возможности транспортной инфраструктуры пары городов».

Фактор «генерационные возможности города» (или пары городов авиалинии) характеризует потенциал спроса на авиаперевозки в городе (или паре городов авиалинии) и платёжеспособность потенциальных пассажиров в городе (или паре городов авиалинии). Фактор «целевой потенциал города» (или пары городов авиалинии) характеризует привлекательность города (или пары городов авиалинии) для осуществления поездки и возможности размещения привлечённых пассажиров в городе (или паре городов авиалинии). Фактор «возможности транспортной инфраструктуры пары городов» характеризует

существование альтернативных видов транспортного сообщения между городами авиалинии, эксплуатационные возможности транспортной инфраструктуры пары городов.

Перечисленные факторы необходимо выразить через измеряемые параметры. При выборе параметров следует учитывать, что при прогнозе развития сети потребуется информация о прогнозных значениях этих параметров. К рассмотрению приняты следующие измеряемые параметры (курсивом даны названия параметров). Потенциал спроса на авиаперевозки в городе (или паре городов авиалинии) выражается через численность населения, отнесённого к городу (или паре городов авиалинии) – *Численность населения*. Платёжеспособность потенциальных пассажиров в городе (или паре городов авиалинии) выражается через валовой региональный продукт (ВРП) субъекта (или пары субъектов) РФ, где располагается город (или пара городов авиалинии), пересчитанный в соответствии с прожиточным минимумом данного субъекта (или пары субъектов) РФ – *ВРП субъекта/-ов РФ*. Привлекательность города (или пары городов авиалинии) в качестве цели поездки выражается через административную, экономическую, промышленную и туристическую характеристику города (или пары городов авиалинии) – *Статус города/-ов*. Возможности размещения привлечённых пассажиров выражаются через число мест коллективного размещения в городе (или паре городах авиалинии) – *Число мест*. Существование альтернативных видов транспортного сообщения между городами авиалинии выражается через наличие железнодорожной (ж.-д.) станции в обоих городах авиалинии – *Наличие ж.-д. сообщения*. Эксплуатационные возможности транспортной инфраструктуры пары городов выражаются через потенциалы обоих аэропортов авиалинии, определяемые по типам принимаемых/отправляемых ВС – *Потенциал авиасвязи*. Предлагается выразить перечисленные факторы через следующие измеряемые параметры:

- «генерационные возможности города» – через
 - *численность населения*, отнесённую к данному городу,
 - валовой региональный продукт, пересчитанный в соответствии с прожиточным минимумом (*ВРП'*), отнесённый к данному городу;
- «целевой потенциал города» – через
 - *статус города*,
 - *число мест* коллективного размещения, отнесённое к данному городу;
- «возможности транспортной инфраструктуры пары городов» – через
 - *наличие ж.-д. сообщения* между городами авиалинии,
 - *потенциал авиасвязи*.

Ряд параметров (численность населения, ВРП, наличие ж.-д. сообщения, статус города) в том или ином виде ранее уже использовались в работах по проблеме исследования и

прогнозирования спроса на пассажирские авиаперевозки. Другие же параметры (число мест коллективного размещения, потенциал авиасвязи) в настоящей работе вводятся в рассмотрение впервые.

Параметр, характеризующий расстояние между двумя городами, в работе в качестве входной переменной модели УСА не рассматривается. Анализ пар из 123 рассматриваемых городов на предмет наличия между ними прямого авиасообщения в 2005-2007 гг., показал, что для любого расстояния имеются пары городов как имеющие прямое авиасообщение между собой, так и не имеющие. Параметр, характеризующий расстояние между двумя городами (дальность поездки), имеет значение при выборе вида транспорта (автомобильного, железнодорожного, водного, авиационного), но не является определяющим для образования авиасвязи в совокупности существенно различающихся по параметрам пар городов.

Рассмотрим более подробно описание и способ определения каждого измеряемого параметра.

а) Численность населения

Каждому городу ставится в соответствие определённая численность населения (Приложение Б). Если в данном субъекте РФ имеется только один город рассматриваемой сети внутрироссийских магистральных авиалиний (см. Приложение А), то *численность населения* города принимается равной численности населения данного субъекта РФ (по данным на 1 января 2007 г.) [49]. Если же в данном субъекте РФ имеется несколько городов сети, то население субъекта РФ распределяется между этими городами по территориальному принципу. В качестве «прилегающих территорий» рассматривается некоторая совокупность административно-территориальных единиц (городов, посёлков городского типа и районов), наиболее близко расположенных к данному городу. Распределение численности населения РФ по городам сети дано в Приложении В. Там же приведены карты субъектов РФ с указанием их административно-территориального деления. Численность населения административно-территориальных единиц принята в соответствии с данными Росстата [50].

б) Валовой региональный продукт субъекта РФ, пересчитанный в соответствии с прожиточным минимумом данного субъекта РФ (ВРП')

ВРП (в млрд. руб.) исчисляется в ценах 2006 г. для субъекта РФ [51], где располагается город. При формировании данных по ВРП принято следующее:

- Московская область рассматривается в совокупности с городом Москва;
- Ленинградская область рассматривается в совокупности с городом Санкт-Петербург;
- Архангельская область рассматривается отдельно от Ненецкого автономного округа;

– Тюменская область рассматривается отдельно от Ханты-Мансийского и Ямало-Ненецкого автономных округов;

– Таймырская (Долгано-Ненецкая) автономная область рассматривается как часть Красноярского края;

– Камчатская область рассматривается как часть Камчатского края;

– Республика Алтай рассматривается как часть Алтайского края.

Если в данном субъекте РФ имеется несколько городов сети, то ВРП распределяется между этими городами пропорционально численности населения, относящейся к каждому из этих городов. Пересчёт ВРП в соответствии с прожиточным минимумом в данном субъекте РФ [49] осуществляется по формуле:

$$ВРП' = \frac{ВРП}{\text{Относительный прожиточный минимум}},$$

где
$$\left(\begin{array}{c} \text{Относительный} \\ \text{прожиточный минимум} \end{array} \right) = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{Прожиточный минимум} \\ \text{в данном субъекте РФ} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} \text{Средний прожиточный} \\ \text{минимум по РФ} \end{array} \right)}.$$

Для ряда субъектов РФ использованы данные о суммарных ВРП нескольких субъектов РФ. В этих случаях пересчёт ВРП осуществляется по формуле:

$$ВРП' = \frac{ВРП_1}{\text{Отн. прож. минимум}_1} + \frac{ВРП_2}{\text{Отн. прож. минимум}_2} + \dots$$

В частности для г. Москва и Московской обл.:

$$ВРП'_{МОС} = ВРП'_{\text{Московская обл.}} + ВРП'_{\text{г.Москва}};$$

для г. Санкт-Петербург и Ленинградской обл.:

$$ВРП'_{\text{ПЛК}} = ВРП'_{\text{Ленинградская обл.}} + ВРП'_{\text{г.Санкт-Петербург}};$$

для Алтайского края и Республики Алтай:

$$ВРП'_{\text{БАН}} = ВРП'_{\text{Алтайский край}} + ВРП'_{\text{Республика Алтай}}.$$

Значения параметра $ВРП'$ для городов приведены в Приложении Б.

в) Статус города

Параметр задаётся экспертным образом. Для неё используются 4 категории и соответствующие им значения параметра (1 – наиболее важный, 4 – наименее важный):

1 – столица государства – г. Москва (МОС);

2 – административные центры ФО (либо их «заменители»), а также федеральные курорты – г. Екатеринбург (КЛЦ), г. Краснодар (КПА), г. Новосибирск (НСБ),

г. Санкт-Петербург (ПЛК), г. Самара (СКЧ), а также г. Анапа (АНА) и г. Сочи (СОЧ);

3 – административные центры субъектов РФ (области, края и др.) либо промышленный/ курортный центр, но не принадлежащий п.2;

4 – остальные города.

Общий статус пары городов авиалинии соответствует менее важному из них. Значения параметра *статус города* приведены в Приложении Б.

г) Число мест коллективного размещения

Под понятием «число мест коллективного размещения» подразумевается статистический показатель «число мест (коек) в коллективных средствах размещения» [52, сс. 58-60]. К коллективным средствам размещения относятся [52, сс. 254-255]: гостиницы и аналогичные средства размещения гостиничного типа; специализированные средства размещения (санаторно-курортные организации, организации отдыха, туристические базы, туристические теплоходы). При формировании данных по числу мест коллективного размещения приняты те же допущения, что и при формировании данных по ВРП (см. п. б данного раздела). Если в одном субъекте РФ имеется несколько городов сети, то число мест коллективного размещения распределяется между ними пропорционально численности населения, отнесённого к каждому из этих городов (за исключением Краснодарского края). В Краснодарском крае число мест коллективного размещения (всего 220,3 тыс. коек) распределяется следующим образом:

г. Краснодар – 6% (12,71 тыс. коек);

г. Сочи – 44% (98,03 тыс. коек);

г. Анапа – 50% (109,56 тыс. коек).

Значения параметра *число мест* коллективного размещения приведены в Приложении Б.

д) Наличие ж.-д. сообщения

Информация о наличии ж.-д. станции в рассматриваемых городах получена с сайтов <http://maps.yandex.ru/russia>, <http://rzd.ru>, <http://tutu.ru>, <http://ru.wikipedia.ru>, <http://tks.ru/db/rwstation/> (от 01.10.2008) и представлена в виде значений бинарной переменной: «0» – отсутствие ж.-д. станции в городе; «1» – наличие ж.-д. станции в городе (Приложение Б). Для пары городов: «0» – отсутствие ж.-д. сообщения, если хотя бы в одном из городов пары нет ж.-д. станции; «1» – наличие ж.-д. сообщения, если в обоих городах пары есть ж.-д. станции. Безусловно, наличие ж.-д. станции в обоих городах авиалинии не гарантирует существования прямого ж.-д. сообщения между ними. В данном случае параметр *наличие ж.-д. сообщения* используется для обозначения наличия или отсутствия альтернативного вида транспорта (т.е. ж.-д.) между городами данной авиалинии.

е) Потенциал авиасвязи

Информация об аэропортах получена с сайтов: <http://www.aviapages.ru/airports/> и <http://aviadocs.net/AIP/aip/ad/ad1/ad1-3.pdf> (от 16.12.2010). Значение параметра *потенциал авиасвязи* определяется по результатам сравнения «потенциалов аэропортов» пары городов и равен значению меньшего потенциала. «Потенциал аэропорта» принимает значения от 1 до 6. Эти значения соответствуют классам аэродромов, определяемым по максимальному взлётному весу принимаемых ВС (таблица 2.4). Классификация аэропортов по потенциалу позволяет опосредованно учесть такие характеристики аэропортов как: характеристики взлётно-посадочной полосы (длина, ширина, покрытие, класс, грузоподъёмность и др.), оборудование и оснащение аэропорта, возможности навигационного и технического обслуживания ВС и др. Значения потенциала аэропорта для рассматриваемых городов приведены в Приложении Б. Среди рассматриваемых в работе городов нет городов с потенциалом аэропорта равным 6.

Таблица 2.4

Потенциалы аэропортов по типам регулярно принимаемых ВС

(1 – наибольший потенциал, 6 – наименьший потенциал)

Потенциал аэропорта	Класс аэродрома (по взлётному весу принимаемых ВС)	Регулярно принимаемые ВС	
		Мах взлётный вес, т	Типы ВС
1	Вне класса	>300	А-380, А-340, В-747, В-777
2	1	150÷300	А-330, А-310, В-767, Ил-62М, Ил-86, Ил-96
3		75÷150	А-320, А-321, В-737, В757, Ту-154, Ту-204
4	2	30÷75	А-319, Ан-12, Ту-134, Як-42, АTR-72, Е-190, Е-170
5	3	10÷30	Ан-24, Ан-26, Ан-72, Ан-74, Ан-140, Як-40, АTR-42
6	4	< 10	Ан-2, Ан-3, Ан-28, Ан-38, L-410, Е-120

В соответствии с предложенной системой факторов «генерационные возможности города», «целевой потенциал города», «возможности транспортной инфраструктуры пары городов», определяющих «условия существования» авиалинии, сформировано множество измеряемых параметров: четыре параметра, характеризующие каждый город авиалинии, и два параметра, характеризующие пару городов. На основе доступных данных государственной статистики за 2006 год подготовлены два массива: массив значений измеряемых параметров для 123 городов, а также массив значений измеряемых параметров для 6871 пары из этой совокупности городов. Эта база была использована при задании значений входных переменных модели УСА.

2.3 Методы и программные технологии для реализации модели «условий существования» авиалинии

Задача формирования модели «условий существования» авиалинии является сложной неалгоритмической задачей, зависящей от многих социально-экономических процессов, происходящих в стране. Формирование модели УСА возможно на основе данных о расписаниях полётов и об одновременно наблюдаемых параметрах для пар городов. Измеряемые параметры, определяющие существование или отсутствие прямого авиасообщения между двумя городами, носят статистический характер и могут быть неточными. Само представление о существовании авиалинии носит формальный характер. Кроме того, задача формирования модели УСА характеризуется следующими аспектами неопределённости: неопределённостью состава параметров, определяющих существование или отсутствие прямого авиасообщения между двумя городами; неопределённостью значений параметров в прогнозируемом периоде; неопределённостью правил, на основании которых делается вывод о существовании или отсутствии авиалинии.

Наиболее общей методологией построения и использования информационных моделей сложных систем является *системное моделирование*. К *сложным системам* [53] относят системы, состоящие из множества взаимодействующих подсистем, обладающие принципиально новыми свойствами, нехарактерными для этих подсистем. Сложность системы во многом определяется сложностью её структуры, характеризуемой большим количеством элементов и различными видами взаимодействия между ними. Вторым аспектом сложности является сложность процесса функционирования системы или отдельных её подсистем, что может быть связано как с непредсказуемым характером поведения системы, так и с невозможностью формального представления правил преобразования входных переменных в выходные.

Результатом системного моделирования является построение некоторой модели системы, которая описывает важнейшие (с точки зрения решаемой проблемы) свойства системы-оригинала. Общим свойством всех моделей является их подобие системе-оригиналу. Процесс построения и последующего использования моделей для получения информации о системе-оригинале является основным содержанием системного моделирования. Наиболее общей информационной моделью системы является т.н. модель «чёрного ящика», содержание которого скрыто от системного аналитика или вообще неизвестно. Основное назначение этой модели состоит в том, чтобы структурировать исходную информацию о самой системе и внешней по отношению к ней среды, т.е. модель фиксирует границы системы.

В общем случае процесс системного моделирования может быть представлен в форме взаимосвязанных этапов, на каждом из которых выполняются определённые действия,

направленные на построение и последующее использование информационно-логических моделей. Отдельными этапами процесса системного моделирования являются: анализ проблемной ситуации; структуризация предметной области и построение модели; выполнение вычислительных экспериментов с моделью; применение результатов вычислительных экспериментов; коррекция или доработка модели.

Развитие сложной системы происходит в условиях неопределённости. Один из простейших видов неопределённости – неопределённость исходной информации. Другой вид неопределённости – неопределённость цели, которая является следствием многокритериальности задач системного анализа. Традиционные методы построения моделей сложных систем не приводят к удовлетворительным результатам, если исходное описание системы является неполным или неточным. В подобной ситуации целесообразно воспользоваться технологией *нечёткого моделирования* [54], которая специально ориентирована на построение моделей, учитывающих неполноту, нечёткость и даже противоречивость исходной информации. Методология нечёткого моделирования конкретизирует методологию системного моделирования применительно к процессу построения и использования нечётких моделей сложных систем. В общем случае под нечёткой моделью понимается информационно-логическая модель системы, построенная на основе теории нечётких множеств и нечёткой логики. Процесс нечёткого моделирования можно представить в виде той же последовательности этапов, что и процесс системного моделирования.

Основу технологии нечёткого моделирования составляет *система нечёткого вывода* (Fuzzy Inference System – FIS). Центральное место в процедурах нечёткого вывода занимает база правил нечётких продукций. *Нечёткие продукционные модели* (Rule-Based Fuzzy Models / Systems) являются наиболее общим видом нечётких моделей, используемых для описания, анализа и моделирования сложных слабо формализуемых систем и процессов [55, сс. 25-26]. Под «нечёткой продукционной моделью» понимается согласованное множество отдельных нечётких продукционных правил вида «ЕСЛИ A , ТО B » (где A и B – предпосылка и заключение данного правила в виде нечётких высказываний), предназначенное для определения степени истинности заключений нечётких продукционных правил на основе предпосылок с известной степенью истинности соответствующих правил. Для построения нечёткой продукционной модели необходимо задать следующие определяющие её компоненты [54, 55]:

- способ (схему) нечёткого вывода заключений;
- базу нечётких продукционных правил;
- процедуру введения нечёткости (fuzzification – фаззификация);

- процедуру агрегирования (aggregation) степени истинности предпосылок по каждому из нечётких продукционных правил;
- процедуру активизации (activation) заключений каждого из нечётких продукционных правил;
- процедуру аккумуляции (accumulation) активизированных заключений всех нечётких продукционных правил для каждой выходной переменной;
- процедуру приведения к чёткости (defuzzification – дефаззификация) для каждой аккумулязированной выходной переменной;
- процедуру параметрической оптимизации конечной базы нечётких правил.

Общая архитектура компонентов *системы нечёткого вывода* приведена на рисунке 2.7.

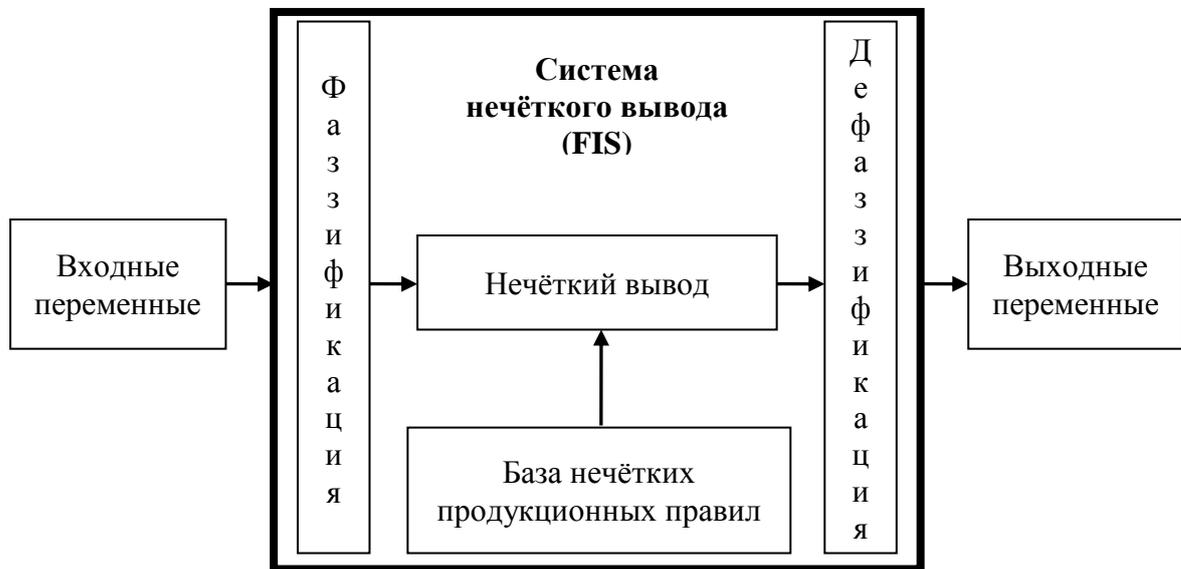


Рисунок 2.7 – Система нечёткого вывода (FIS)

Информация, которая поступает на вход системы нечёткого вывода, соответствует входным переменным. Информация, которая формируется на выходе системы нечёткого вывода, соответствует выходным переменным. Система нечёткого вывода предназначена для преобразования значений входных переменных в выходные переменные на основе использования правил нечёткой продукции. Система нечёткого вывода содержит базу правил нечётких продукций и реализует нечёткий вывод заключений на основе предпосылок, представленных в форме нечётких лингвистических высказываний.

На каждом этапе нечёткого вывода рассматриваются отдельные параметры, которые должны быть фиксированы или специфицированы. Выбор конкретных вариантов параметров каждого из этапов определяет *алгоритм нечёткого вывода*. К настоящему времени известно несколько алгоритмов нечёткого вывода [55, с. 62]: алгоритм Мамдани (Mamdani), алгоритм Цукамото (Tsukamoto), алгоритм Ларсена (Larsen), алгоритм Такаги-Сугэно (Takagi-Sugeno) и упрощённый алгоритм нечёткого вывода. При решении практических задач нечёткого

моделирования могут одновременно использоваться несколько алгоритмов с целью получения наиболее адекватных результатов.

Несмотря на несомненные достоинства нечётких продукционных моделей при решении целого ряда задач, для них характерны и определённые недостатки [55, с. 95]:

- исходный набор нечётких правил формируется экспертом и может оказаться неполным или противоречивым;
- субъективность в выборе вида и параметров функций принадлежности в нечётких высказываниях правил;
- отсутствует возможность автоматического «приобретения» знаний.

Для устранения указанных недостатков рекомендуется создавать нечёткие продукционные модели адаптивными (с коррекцией как состава правил в базе, так и параметров функций принадлежности в процессе и по результатам функционирования модели), а также реализовывать различные компоненты этих моделей на основе нейросетевой технологии [56].

Нейронные сети оказываются более предпочтительными по сравнению с методами непараметрической статистики при высокой стоимости экспериментальных данных или невозможности получения достаточного их количества, их высокой «зашумлённости», неполноте и противоречивости. Нейронная сеть оказывается избирательно чувствительной в областях скопления данных и даёт гладкую интерполяцию в остальных областях. Эта особенность нейросетевых моделей основывается на более общем принципе – адаптивной кластеризации данных. Нейронные сети в отличие от классических методов статистического анализа данных (факторного и корреляционного анализа) могут не только воспроизводить нелинейные зависимости между входной и выходной информацией, но и могут быть адаптированы к новым, изменившимся, данным [56, 57].

Нейронные сети, реализующие адаптивные нечёткие продукционные модели, называются *нечёткими нейронными продукционными сетями*. Элементы каждого слоя (или совокупности слоёв) сети реализуют отдельные этапы нечёткого вывода в нечёткой продукционной модели:

- первый слой нейронов выполняет функцию введения нечёткости (fuzzification);
- скрытые слои отображают совокупность нечётких правил и реализуют алгоритм нечёткого вывода;
- последний слой выполняет функцию приведения к чёткости (defuzzification) выходной переменной.

В 1992 г. Чангом (Jang J.-S.R.) был предложен отдельный тип нечётких нейронных продукционных сетей, обучаемых на основе классических градиентных алгоритмов – нечёткие сети типа *ANFIS* (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System – адаптивная сеть системы

нечёткого вывода или Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System – адаптивная система нейро-нечёткого вывода) [55, с. 97; 58]. Общая схема адаптивной системы нейро-нечёткого вывода приведена на рисунке 2.8.

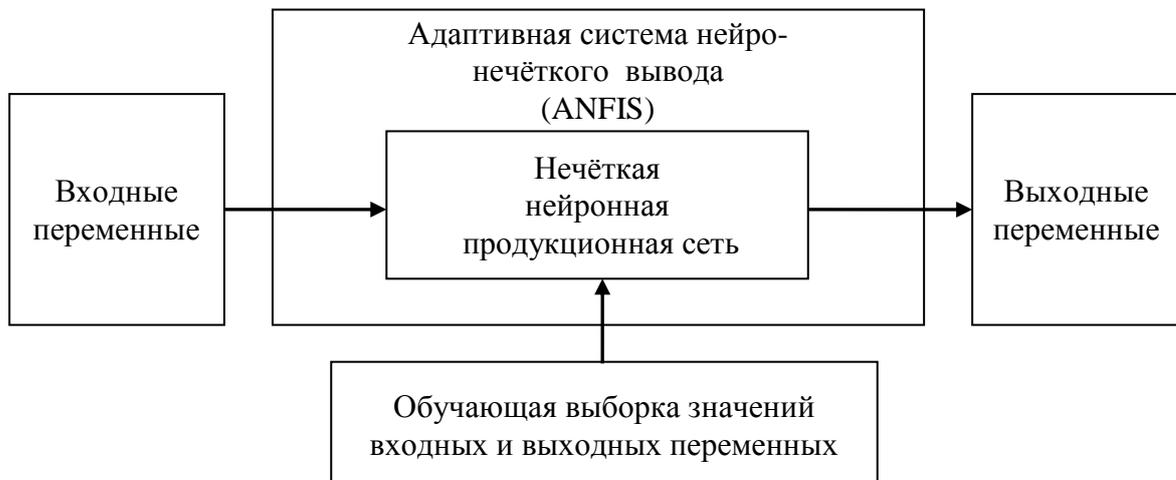


Рисунок 2.8 – Адаптивная система нейро-нечёткого вывода (ANFIS)

Для разработки и дальнейшего применения систем нечёткого вывода могут быть использованы различные программные средства. В настоящей работе в качестве среды программирования используется система MatLab с пакетом Fuzzy Logic Toolbox для разработки нечётких моделей. В состав пакета входит ряд графических средств: редактор систем нечёткого вывода (*редактор FIS*), редакторы функций принадлежности и правил системы нечёткого вывода и др. В составе пакета также имеются специальные программы: редактор адаптивных систем нейро-нечёткого вывода (*редактор ANFIS*), программа нечёткой кластеризации методом нечётких с-средних (fuzzy c-means clustering) и др. [54, сс. 343-344]. *Редактор FIS* является основным средством, которое используется для создания или редактирования систем нечёткого вывода типа Мамдани или Сугэно в графическом режиме. *Редактор ANFIS* предназначен для обучения системы нечёткого вывода типа Сугэно, он позволяет синтезировать и обучать нейро-нечёткую сеть, визуализировать её структуру, изменять и настраивать её параметры, а также использовать встроенную сеть для получения результатов нечёткого вывода. Для настройки используется алгоритм обратного распространения ошибки или его комбинация с методом наименьших квадратов.

Система нечёткого вывода типа Мамдани отличается от системы нечёткого вывода типа Сугэно главным образом типом заключения правила в базе правил нечёткой продукции: в системе типа Мамдани – это нечёткое высказывание, а в системе типа Сугэно – это чёткое значение, заданное функцией. Для задач идентификации целесообразнее использовать системы нечёткого вывода типа Сугэно, а для задач объяснения и обоснования принятого решения лучше использовать системы нечёткого вывода типа Мамдани [59, с. 66].

Структура нечёткой нейронной продукционной сети типа ANFIS, реализующая алгоритм нечёткого вывода Такаги-Сугэно для m входных переменных и одной выходной переменной приведена на рисунке 2.9. Такую сеть называют также нечёткой нейронной продукционной сетью Такаги-Сугэно-Канга [55, сс. 113-119]. Эта сеть реализует нечёткую продукционную модель, основанную на базе нечётких правил, в которых предпосылки правил являются нечёткими высказываниями, а заключения – чёткими значениями, заданными функцией; входные переменные являются чёткими, функции принадлежности всех нечётких множеств входных переменных представляются функцией Гаусса и др. Правила имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{ПРАВИЛО } \# j: & \text{ ЕСЛИ } "x_1 \text{ есть } A_{j1}" \text{ И } "x_2 \text{ есть } A_{j2}" \text{ И } \dots \text{ И } "x_m \text{ есть } A_{jm}", \\ & \text{ ТО } "y_j = b_{j0} + b_{j1}x_1 + \dots + b_{ji}x_i + \dots + b_{jm}x_m", \end{aligned}$$

где $j = 1 \div n$ – номер правила, n – количество правил, $i = 1 \div m$ – номер входной переменной, m – количество входных переменных, x_i – значение i -ой входной переменной, A_{ji} – j -ое нечёткое множество (задаётся посредством функции принадлежности $\mu_j(x_i)$, определяет терм лингвистической переменной) i -ой входной переменной, y_j – j -я линейная функция единственной выходной переменной y от входных переменных x_i , b_{ji} – i -й коэффициент линейной функции в заключении j -го правила, b_{j0} – смещение. Каждый слой сети выполняет свою функцию.

- Слой 1.* Осуществляется фаззификации входных переменных. Выходы элементов слоя представляют собой значения функций принадлежности при заданных значениях входных переменных.
- Слой 2.* Каждый узел этого слоя соответствует одному нечёткому правилу. В каждом узле выполняется агрегирование степени истинности предпосылки по одному из нечётких продукционных правил.
- Слой 3.* Каждый узел этого слоя рассчитывает вклад одного нечёткого правила в «выход» сети (вычисление заключений по каждому правилу).
- Слои 4-5.* Суммирование (активизация) заключений всех правил (аккумуляция не требуется вследствие чётких значений выходной переменной [54, с. 204]). И дефаззификация заключения выходной переменной.

Параметры сети, определяющие форму функций принадлежности, могут быть настроены с использованием алгоритмов обучения путём задания чёткого множества примеров обучающей выборки.

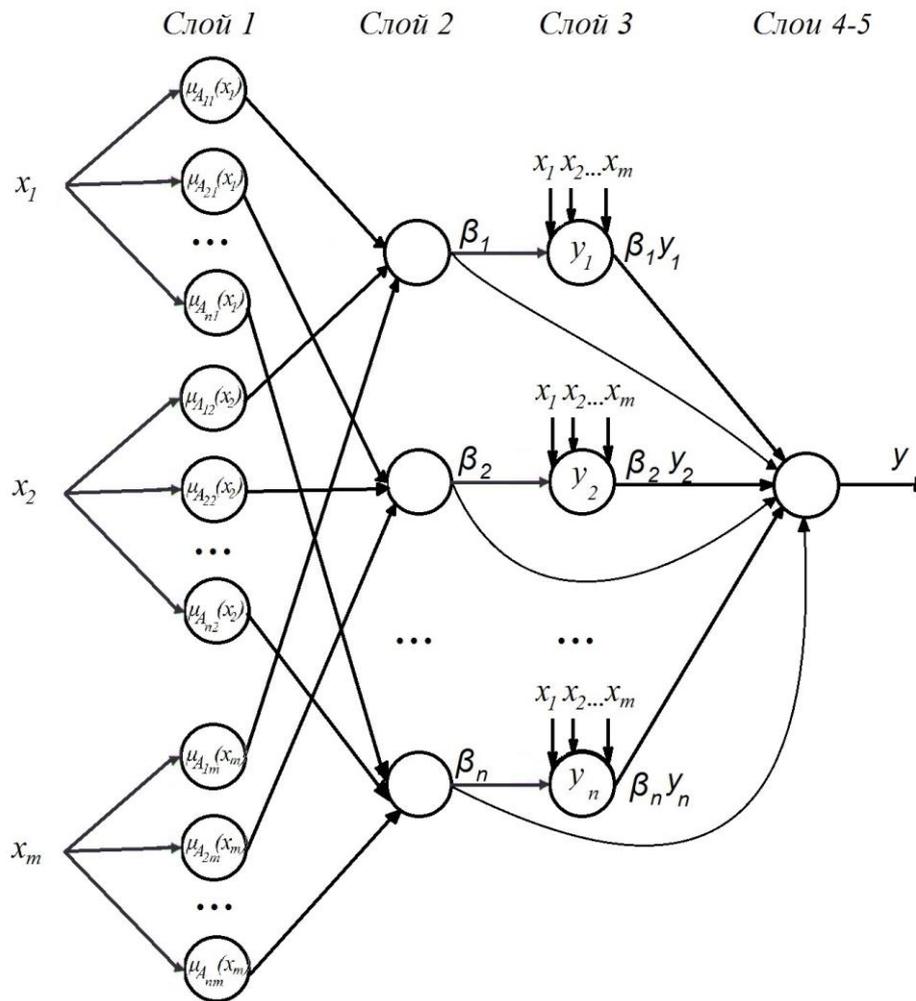


Рисунок 2.9 – Структура нечёткой нейронной продукционной сети ANFIS

Таким образом, учитывая особенности задачи, связанные с нечёткостью и неточностью исходных данных, сложностью выявления функциональной зависимости, определяющей существование прямого авиасообщения между городами, для реализации модели «условий существования» авиалинии выбрана нейронная продукционная сеть, реализующая алгоритм нечёткого вывода Такаги-Сугэно.

* * *

Решение задачи прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний позволит дать ответ на вопрос о будущем составе сети, т.е. определить те пары городов, которые в будущем будут связаны прямым авиационным сообщением (авиалинией). При этом не рассматриваются уровни пассажиропотоков на авиалиниях, а лишь решается вопрос о существовании либо отсутствии этих авиалиний в будущем. Фактически речь идёт о формировании универсальных (независящих явно от времени и не привязанных к конкретной паре городов) «условий существования» авиалинии. Предполагается, что наличие или отсутствие прямого авиационного сообщения между городами зависит от сочетания значений

ограниченного количества измеряемых параметров, характерных для данной пары городов. Это позволяет существенно упростить задачу прогнозирования развития сети и свести её к задаче прогнозирования существования прямого авиасообщения для пары городов. Центральное место в решении этой задачи занимает разработка информационной модели «условий существования» авиалинии.

С целью формирования значений выходной переменной модели УСА предложен способ формализации нечёткого понятия «авиалиния существует». Этот способ на основе данных о расписании движения ВС на внутрироссийских магистральных авиалиниях в период 2005 – 2007 годов позволяет при задании значения выходной переменной модели УСА учитывать стабильность существования, направление и темп развития авиасвязи между двумя городами.

Сформировано множество измеряемых параметров, определяющих существование прямого авиасообщения между городами РФ. На основе доступного статистического материала сформирована база значений измеряемых параметров, которая была использована при задании значений входных переменных модели УСА.

Задача формирования модели УСА характеризуется рядом аспектов неопределённости, что определяет необходимость использования технологии *нечёткого моделирования*. Неопределённость правил («условий существования» авиалинии) делает невозможным непосредственное применение процедур системы нечёткого вывода. Создание этого набора правил возможно на основе имеющихся исходных данных в процессе генерации структуры и обучения нейронной сети в рамках адаптивной системы нейро-нечёткого вывода. Для реализации модели УСА как информационной модели выбрана технология нечёткого нейросетевого программирования с использованием программных средств среды программирования MatLab: пакета Fuzzy Logic Toolbox, реализующего процесс нечёткого моделирования, и нейросетевого пакета Neural Network Toolbox.

Подход, связанный с выбором технологии нечёткого нейросетевого программирования, определяет состав компонент комплекса программ и последовательность их выполнения при решении задачи прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний: подготовка исходных данных (рассматривается в настоящей главе); создание нечёткой нейросетевой модели УСА (рассматривается в третьей главе); прогнозирование развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний (рассматривается в четвёртой главе).

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА НЕЧЁТКОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ «УСЛОВИЙ СУЩЕСТВОВАНИЯ» АВИАЛИНИИ

Последовательность процесса разработки нечёткой нейросетевой модели УСА, как и любой нейросетевой модели, включает следующие основные этапы:

1. Формирование обучающей выборки.
2. Построение нейронной сети.
3. Анализ точности и адекватности сформированной нейронной сети.

Важнейшим этапом разработки нейронной сети является этап её обучения. Сущность обучения нейронной сети [56, сс. 278-281] заключается в кодировании отображения «входа» на «выход» в синаптических весах и пороговых значениях многослойного персептрона. Обученная сеть должна обладать хорошими *обобщающими свойствами*. На рисунке 3.1 [56, с. 280] показано, как происходит обобщение в гипотетической нейронной сети. Нелинейное отображение «входа» на «выход» определяется сетью в результате обучения.

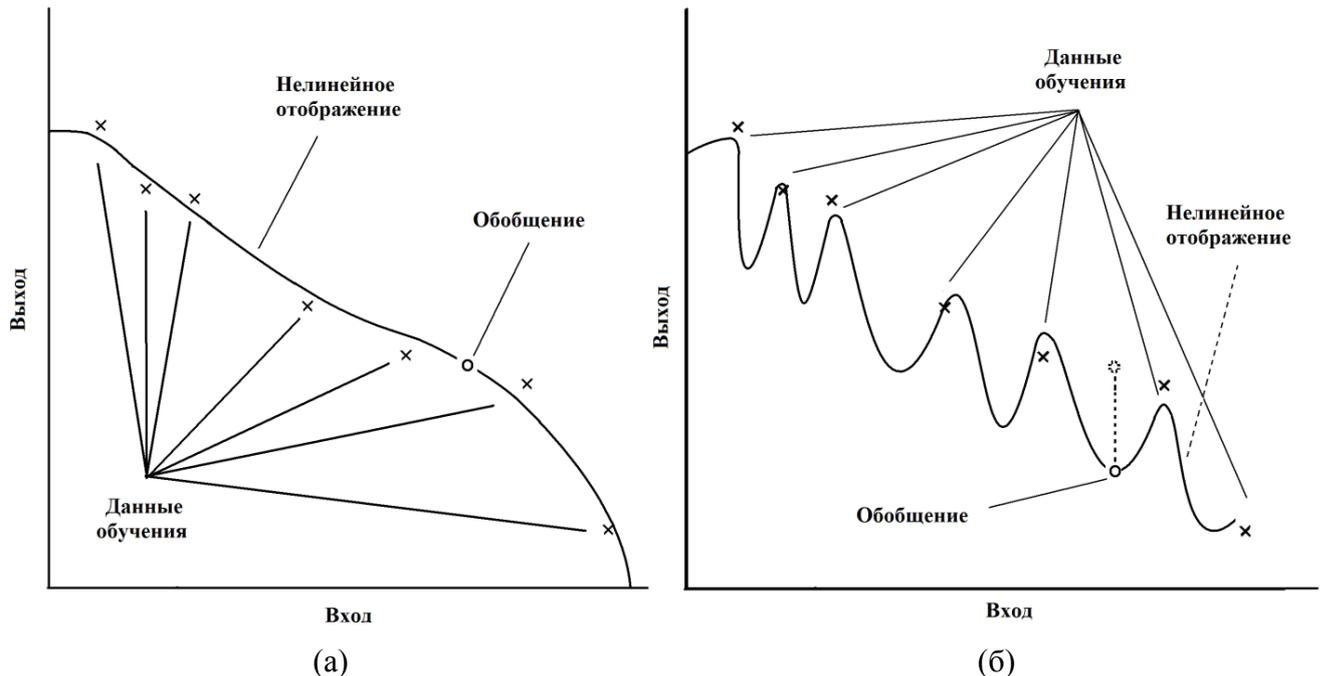


Рисунок 3.1 – Корректная аппроксимация («хорошее» обобщение) (а) и результат избыточного обучения («плохое» обобщение) (б)

Нейронная сеть, спроектированная с учётом «хорошего» обобщения, осуществляет корректное отображение «входа» на «выход» даже тогда, когда входной сигнал отличается от примеров, использованных для обучения сети (рисунок 3.1, а). Обучение сети на излишне большом количестве примеров может закончиться запоминанием данных обучения за счёт

нахождения таких признаков, которые присутствуют в примерах обучения, но не свойственны самой моделируемой функции отображения. Такое явление называют избыточным обучением или *переобучением*. Пример «плохого» обобщения вследствие простого запоминания обучающих примеров показан на рисунке 3.1 (б). Способность нейронной сети к обобщению определяется следующими факторами: размером обучающего множества, его представительностью, архитектурой нейронной сети и физической сложностью рассматриваемой задачи.

В процессе разработки нечёткой нейросетевой модели «условий существования» авиалинии:

- определён оптимальный состав входных переменных для элемента (примера) обучающих данных;
- определён набор элементов (примеров) для обучающей выборки, обладающий наибольшей информативностью;
- с использованием метода субтрактивной кластеризации сформирована оптимальная структура нейронной сети;
- в результате обучения в рамках системы нейро-нечёткого вывода создана модель УСА, и осуществлена смысловая интерпретация предпосылок нечётких правил, составляющих основу модели «условий существования» авиалинии, и результата нечёткого вывода модели;
- определены количественные и качественные показатели моделирования существования прямого авиасообщения между городами;
- уточнена область применимости созданной модели «условий существования» авиалинии.

3.1 Формирование обучающей выборки

Обучающая выборка представляет собой множество элементов (массивов-векторов), содержащих в общем случае наборы входных и выходных переменных нейронной сети. Качество процесса обучения и, следовательно, качество нейросетевой модели в значительной степени определяется информативностью обучающей выборки, которая формируется в результате целенаправленного отбора из общей совокупности исходных данных. Под *информативностью обучающей выборки* понимается совокупность следующих свойств: сохранение информации содержащейся в исходных данных посредством включения в обучающую выборку разнообразных элементов, в том числе статистически редко встречающихся в исходных данных; равномерность распределения элементов обучающей выборки в пространстве признаков, позволяющая выровнять влияние всех элементов обучающей выборки на процесс обучения.

При формировании обучающей выборки необходимо определиться как с числом и составом входных переменных модели, так и с составом элементов обучающей выборки. Число входных переменных определяет сложность архитектуры нейронной сети. Состав входных переменных в элементе, а также состав элементов обучающей выборки определяют качество обучения нейронной сети и, соответственно, её обобщающие свойства. Базовый набор исходных данных для пары городов включает в себя:

- F1: потенциал авиасвязи для двух городов;
- F2: наличие ж.-д. сообщения между двумя городами;
- F3: валовой региональный продукт, пересчитанный в соответствии с прожиточным минимумом, для первого города;
- F4: численность населения, отнесённого к первому городу;
- F5: число мест размещения, отнесённое к первому городу;
- F6: статус первого города;
- F7: валовой региональный продукт, пересчитанный в соответствии с прожиточным минимумом, для второго города;
- F8: численность населения, отнесённого ко второму городу;
- F9: число мест размещения, отнесённое ко второму городу;
- F10: статус второго города;
- E1: выходная переменная, характеризующая наличие прямого авиасообщения между городами.

В [54, сс. 432-434] указывается, что качество обучения гибридной сети зависит от объёма обучающей выборки и что возможны проблемы с работоспособностью системы MatLab, если количество входных переменных превышает 5-6. В соответствии с этим принято, что количество входных переменных не должно быть больше 6.

3.1.1 Состав переменных для элемента обучающих данных

Возможны различные подходы к формированию состава входных переменных для элемента обучающих данных на основе базового набора из 10 параметров, характеризующих пару городов. Подход, при котором используются все параметры, характеризующие пару городов, в дальнейшем будет называться «симметричным». При таком подходе предполагается, что генерационные возможности и целевой потенциал обоих городов одинаково важны для существования авиалинии и должны учитываться при формировании состава входных переменных для элемента обучающих данных. С другой стороны, учитывая безмасштабную природу авиатранспортной сети, в которой узлы играют разную роль, можно предположить, что существование авиалинии определяется генерационными возможностями или целевым

потенциалом только одного города из пары городов. Подобный подход получил наименование «несимметричный». В работе рассмотрены 4 варианта формирования состава входных переменных для элемента обучающих данных (таблица 3.1).

Таблица 3.1

Варианты формирования состава входных переменных для элемента обучающих данных

Вариант	Входные переменные, характеризующие генерационные возможности	Входные переменные, характеризующие целевой потенциал
Симметричный подход		
S	Суммы значений однотипных генерационных параметров двух городов	Суммы значений однотипных целевых параметров двух городов
P	Произведения значений однотипных генерационных параметров двух городов	Произведения значений однотипных целевых параметров двух городов
Несимметричный подход		
G	Генерационные параметры <i>главного</i> города	Целевые параметры <i>неглавного</i> города
T	Генерационные параметры <i>неглавного</i> города	Целевые параметры <i>главного</i> города

Два варианта соответствуют «симметричному» подходу и два – «несимметричному». Все варианты состава содержат по 6 входных переменных, разделённых на три группы по 2 параметра:

- параметры, характеризующие возможности транспортной инфраструктуры пары городов;
- параметры, характеризующие генерационные возможности города (или обоих городов);
- параметры, характеризующие целевой потенциал города (или обоих городов).

Рассматриваемые варианты состава входных переменных для элемента обучающих данных отличаются друг от друга только способом формирования значений входных переменных, характеризующих генерационные возможности и целевой потенциал. Входные переменные, характеризующие возможности транспортной инфраструктуры пары городов, в каждом варианте состава не изменяются. Для вариантов **S** и **P** значения входных переменных в элементах обучающих данных, характеризующих генерационные возможности и целевой потенциал пары городов, образуются как суммы (**S** от *sum* – сумма) и произведения (**P** от *product* – произведение) однотипных параметров двух городов. Эти варианты формирования значений переменных относятся к «симметричному» подходу. Такие варианты наиболее подходят для пар городов, в которых оба города генерируют близкие по величине пассажиропотоки. Общее количество пар городов, рассматриваемых в работе, образуют **OD**-матрицу связей между городами. Для вариантов **S** и **P** в качестве набора пар городов

(и, следовательно, множества элементов для обучения нейронной сети) может использоваться совокупность ячеек матрицы, расположенных по одну сторону (например, справа) относительно её диагонали. Симметричные им (относительно диагонали матрицы) ячейки исключаются из дальнейшего рассмотрения, чтобы не было дублирования элементов.

Варианты **G** и **T** состава входных переменных для элемента обучающих данных относятся к «несимметричному» подходу. «Несимметричность» этих вариантов заключается в выделении в паре городов главного города: либо города с лучшими генерационными возможностями (**G** от *generational capabilities* – генерационные возможности), либо города с лучшим целевым потенциалом (**T** от *target capability* – целевой потенциал). Такие варианты наиболее подходят для пар городов, в которых города сильно отличаются по величине генерируемого пассажиропотока. По этой причине, с точки зрения существования авиалинии, одним пассажиропотоком (меньшим) можно пренебречь.

Для варианта **G** определяющими для существования авиалинии являются генерационные возможности одного из городов в паре, поэтому в качестве главного города выбирается город с более высокими значениями генерационных параметров. В качестве значений входных переменных для элемента обучающих данных принимаются генерационные параметры главного города и целевые параметры другого (с более низкими генерационными возможностями) города в паре. В набор пар городов (и, следовательно, множество элементов обучающих данных) из двух ячеек в **OD**-матрице для каждой пары городов включается та, которая принадлежит строке главного города. При таком способе формирования множества элементов набор пар городов для варианта **G** будет выглядеть как набор строк **OD**-матрицы, соответствующих городам с более высокими генерационными возможностями.

Для варианта **T** определяющим для существования авиалинии является целевой потенциал одного из городов в паре, поэтому в качестве главного города авиалинии выбирается город с более высокими значениями целевых параметров. В качестве значений входных переменных для элемента обучающих данных принимаются целевые параметры главного города и генерационные параметры другого (с более низким целевым потенциалом) города в паре. В набор пар городов (и, следовательно, множества элементов обучающих данных) из двух ячеек в **OD**-матрице для каждой пары городов включается та, которая принадлежит столбцу главного города. При таком способе формирования множества элементов набор пар городов для варианта **T** будет выглядеть как набор столбцов **OD**-матрицы, соответствующих городам с более высоким целевым потенциалом.

Выбор варианта состава входных переменных определяется соотношением величин генерируемого пассажиропотока в обоих городах пары. Если генерируемые пассажиропотоки одинаковые, то для их описания лучше подходит симметричный вариант, а если разные, то –

несимметричный. Города РФ сильно отличаются друг от друга с точки зрения генерации пассажиропотока. Заранее для всей совокупности пар городов невозможно определить, какой из вариантов будет предпочтительнее: из расписания движения ВС этого не следует – туда и обратно по каждой авиалинии летает одинаковое количество одних и тех же самолётов.

С целью определения наилучшего варианта состава входных переменных для элемента обучающих данных разработаны предварительные нейросетевые модели «условий существования» авиалинии. Эти модели для каждого варианта (из указанных выше четырёх) получили соответствующие одноимённые названия **S**, **P**, **G**, **T**. При разработке предварительных моделей для обучения нейронных сетей использовались подготовленные соответствующим способом для каждой из этих моделей множества элементов обучающих данных. Для сравнения этих моделей результаты расчётов представлены на рисунке 3.2, где в процентном отношении приведены данные по количеству пар городов с правильно моделируемыми реально «существующими» и «отсутствующими» в 2006 г. авиалиниями.

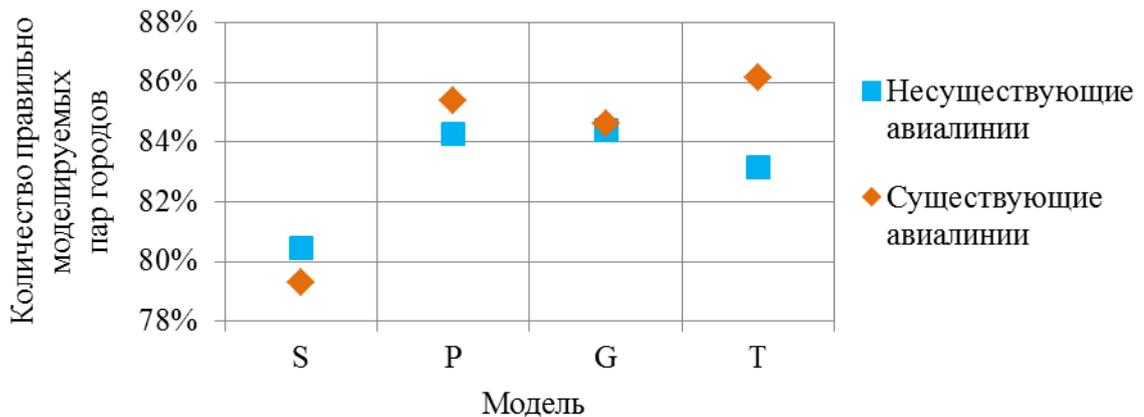


Рисунок 3.2 – Сравнение предварительных моделей УСА

Сравнение моделей **S** и **P** показывает, что при выборе «симметричного» подхода формирования состава входных переменных для элементов обучающих данных более целесообразно использовать произведение однотипных параметров, чем их сумму. Модели **P**, **G** и **T** близки по количеству пар городов, для которых правильно моделируются «существующие» в 2006 г. авиалинии. Модель **T** выглядит несколько хуже, чем модели **G** и **P**, по количеству пар городов, для которых правильно моделируются «отсутствующие» в 2006 г. авиалинии. Однако модель **T** даёт максимальный для предварительных моделей результат (86%) по количеству пар городов, для которых правильно моделируется «существующие» в 2006 г. авиалинии. При этом на правильно моделируемые авиалинии приходится более 95% годового пассажиропотока. Более важным представляется правильное моделирование существующих, а не отсутствующих авиалиний. С этой точки зрения соответствующий модели **T** вариант формирования состава входных переменных для элементов обучающих данных представляется наиболее перспективным. Для варианта **T** множество элементов обучающих

3.1.2 Состав множества элементов обучающей выборки

Множество элементов обучающих данных служит основой для формирования:

- обучающей выборки ('Train') – данных, используемых для построения (обучения) нейронной сети;
- тестовой выборки ('Test') – данных, используемых для тестирования построенной нейронной сети с целью проверки качества её функционирования;
- проверочной выборки ('Validation') – данных, используемых для проверки построенной нейронной сети с целью выявления факта её возможного переобучения.

Обобщающие свойства нейросетевой модели в значительной степени зависят от количества элементов (примеров) в обучающей выборке. Состав обучающей выборки (количество входных переменных) определяет сложность архитектуры нейронной сети. Правильно сформированная обучающая выборка не допускает переобучения нейронной сети. В [56, сс. 279-281] указывается, что для того, чтобы нейронная сеть обладала хорошими обобщающими свойствами достаточно, чтобы размер обучающего множества N удовлетворял следующему соотношению, полученному эмпирически:

$$N = O(W / \varepsilon),$$

где W – общее количество свободных параметров (синаптических весов) сети (зависит от количества входных переменных); ε – допустимая относительная ошибка (разница между желаемым сигналом и откликом нейронной сети); $O(\cdot)$ – порядок заключённой в скобки величины. Следовательно, при фиксированном количестве входных переменных допустимая относительная ошибка обратно пропорциональна количеству примеров обучения сети. В частности, для ошибки в 10% количество примеров обучения должно в 10 раз превосходить количество свободных параметров сети.

При формировании обучающей выборки необходимо следить за тем, чтобы (при наличии большого количества примеров в исходном множестве обучающих данных) количество элементов в обучающей выборке было с одной стороны достаточным для сохранения уровня информативности исходного множества обучающих данных, с другой стороны – не допускало переобучения сети. На практике при определении состава элементов обучающей выборки это сводится к оцениванию ошибок на обучающей, тестовой и проверочной выборках. В первом случае цель – получить как можно меньшую ошибку на множестве элементов обучающей выборки, во втором случае – следить за тем, чтобы при уменьшении ошибки на обучающей выборке ошибки на множествах элементов тестовой и проверочной выборок не увеличивались [56, сс. 288-294]. Желательно, чтобы ошибки на тестовой и проверочной выборках по порядку величины были близки к ошибке на обучающей

выборке. Элементы тестовой и проверочной выборок формируются в равных пропорциях из оставшихся (не вошедших в состав обучающей выборки) элементов исходного множества обучающих данных.

Исходное множество обучающих данных состоит из достаточно большого количества элементов (6963 элемента). С одной стороны, для сохранения обобщающих свойств нейросетевой модели по значению выходной переменной $E1$ как для «существующих», так и для «несуществующих» авиалиний, влияние элементов, соответствующих первым, на процесс обучения должно быть таким же, что и элементов, соответствующих вторым [60, с. 230]. Следовательно, количество элементов, соответствующих «существующим» авиалиниям, и элементов, соответствующих «несуществующим» авиалиниям, в обучающей выборке должно быть одинаковым. С другой стороны, для получения наилучших обобщающих свойств нейросетевой модели элементы (примеры) обучающей выборки должны быть разнообразными (т.е. включать наряду с остальными элементами также и элементы (примеры), редко встречающиеся в исходном множестве обучающих данных, поскольку они характеризуют диапазон возможных значений рассматриваемых параметров) и равномерно распределёнными в пространстве признаков (переменных), рассматриваемых в модели.

Для выполнения указанных условий элементы (примеры) исходного множества обучающих данных разделяются на две группы. К первой группе (условное обозначение группы « $E1 > 0$ ») отнесены элементы обучающих данных, имеющие отличное от нуля значение выходной переменной. Эта группа содержит как элементы, соответствующие «существующим» авиалиниям ($E1 > 0,4$), так и элементы, соответствующие «несуществующим» авиалиниям ($E1 = 0,4$). Ко второй группе (условное обозначение группы « $E1 = 0$ ») отнесены элементы с нулевым значением выходной переменной. Эта группа содержит только элементы, соответствующие «несуществующим» авиалиниям. Количество элементов в первой группе (501) намного меньше количества элементов во второй (6462). Обучающая выборка формируется из элементов этих двух групп, рассматриваемых по отдельности.

Сначала определяется состав элементов из группы « $E1 > 0$ » – с точки зрения сохранения информативности исходного множества обучающих данных этой группы и «не переобучения» модели. Затем, исходя из количества элементов, отобранных для обучающей выборки из группы « $E1 > 0$ », определяется необходимое количество элементов из группы « $E1 = 0$ », выравнивающее количество элементов, соответствующих «существующим» авиалиниям, и количество элементов, соответствующих «несуществующим» авиалиниям. Затем отбирается требуемое количество элементов для обучающей выборки из группы « $E1 = 0$ ».

Для формирования обучающей выборки и оценки её на предмет сохранения информативности исходной совокупности данных и «не переобучения» модели в работе был

использован программный инструмент «самоорганизующейся карты Кохонена» (англ. Self-organizing map – SOM), реализованный в системе STATISTICA [57]. Использование этого инструмента позволяет сформировать *репрезентативную* (сохраняющую информативность исходного множества обучающих данных) обучающую выборку, содержащую сравнительно небольшое количество элементов обучающих данных [60].

Самоорганизующаяся карта Кохонена (далее – карта Кохонена) – соревновательная нейросетевая архитектура, ориентированная на обучение без учителя. Она широко используется при решении многомерных, нелинейных задач, связанных с извлечением признаков, обработкой и кластеризации информации. Карта Кохонена является инструментом для проецирования многомерного пространства в пространство с более низкой размерностью (чаще всего, двумерное) [60].

Карты Кохонена рассчитаны на неуправляемое обучение [61]. При неуправляемом обучении обучающие данные содержат только значения входных переменных. Карта Кохонена учится «понимать» структуру данных, она может распознавать кластеры в данных, а также устанавливать их близость. Карта Кохонена имеет всего два слоя: входной и выходной. Выходной слой называют *слоем топологической карты*. Ячейки топологической карты располагаются в некотором пространстве, как правило, двумерном. В результате итеративной процедуры обучения сеть организуется таким образом, что ячейки, соответствующие центрам кластеров, расположенным близко друг к другу в пространстве входов, располагаются близко друг к другу и на топологической карте. Слой топологической карты можно представлять себе как двумерную решётку, которую нужно так отобразить в N-мерное пространство входов, чтобы по возможности сохранить исходную структуру данных. Хотя при любой попытке представить N-мерное пространство на плоскости теряются многие детали, такой приём позволяет визуализировать данные, которые никаким иным способом «понять» невозможно [61].

Размерность топологической карты подбирается таким образом, чтобы с одной стороны топологическая карта содержала как можно больше ячеек (следовательно, кластеров), а с другой стороны, чтобы количество пустых ячеек было невелико. В настоящей работе размерность топологической карты была выбрана равной 15x15. Было определено, что для оценки обучающей выборки на предмет сохранения информативности исходного множества обучающих данных и «не переобучения» модели достаточно трёх эпох обучения (Training cycles). По указанным выше критериям был выбран вариант формирования обучающей выборки. На рисунках 3.4 – 3.7 для групп «E1>0» и «E1=0» представлены топологические карты и сведения о количестве элементов. Рисунки 3.4 и 3.6 представляют кластерную структуру исходного множества обучающих данных для групп «E1>0» и «E1=0»

соответственно. Рисунки 3.5 и 3.7 – кластерную структуру обучающей выборки для групп «E1>0» и «E1=0» соответственно.

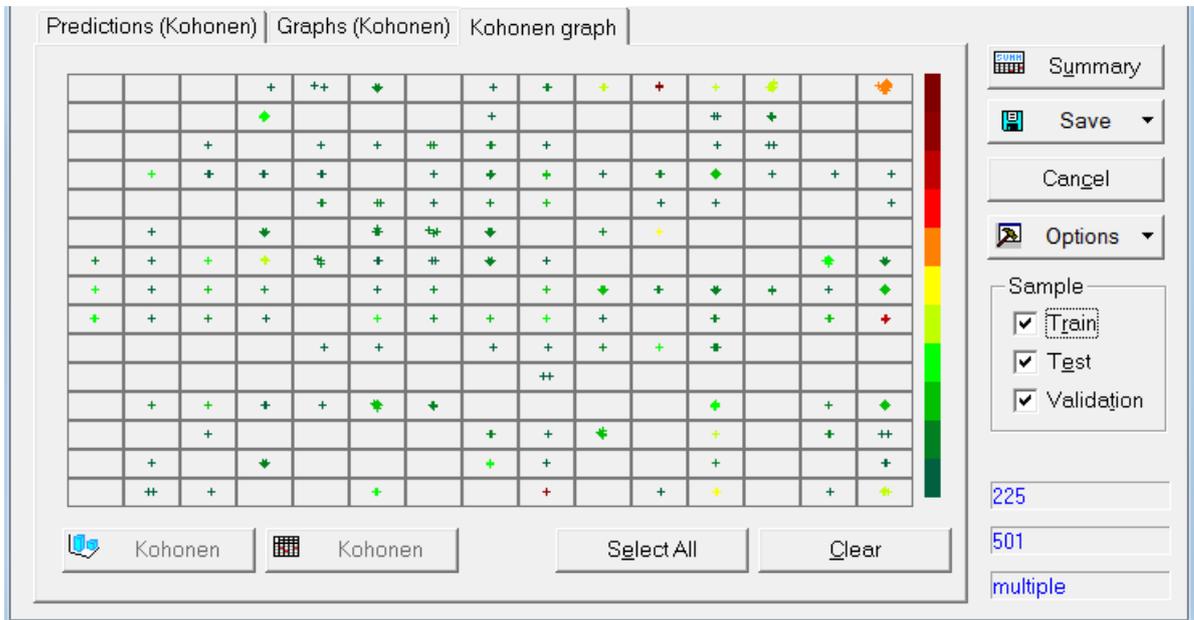


Рисунок 3.4 – Топологическая карта для группы «E1>0».

Элементы исходного множества обучающих данных (всего 501 элемент)

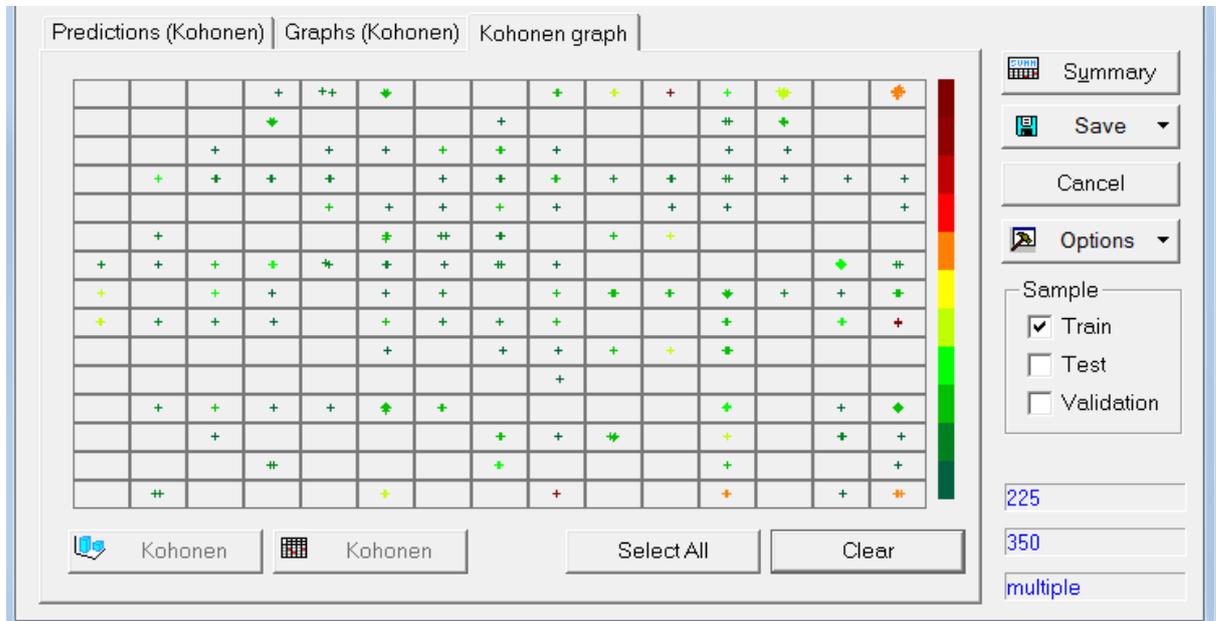


Рисунок 3.5 – Топологическая карта для группы «E1>0».

Элементы обучающей выборки (350 элементов, из них 282 соответствуют «существующим» авиалиниям и 68 – «несуществующим»)

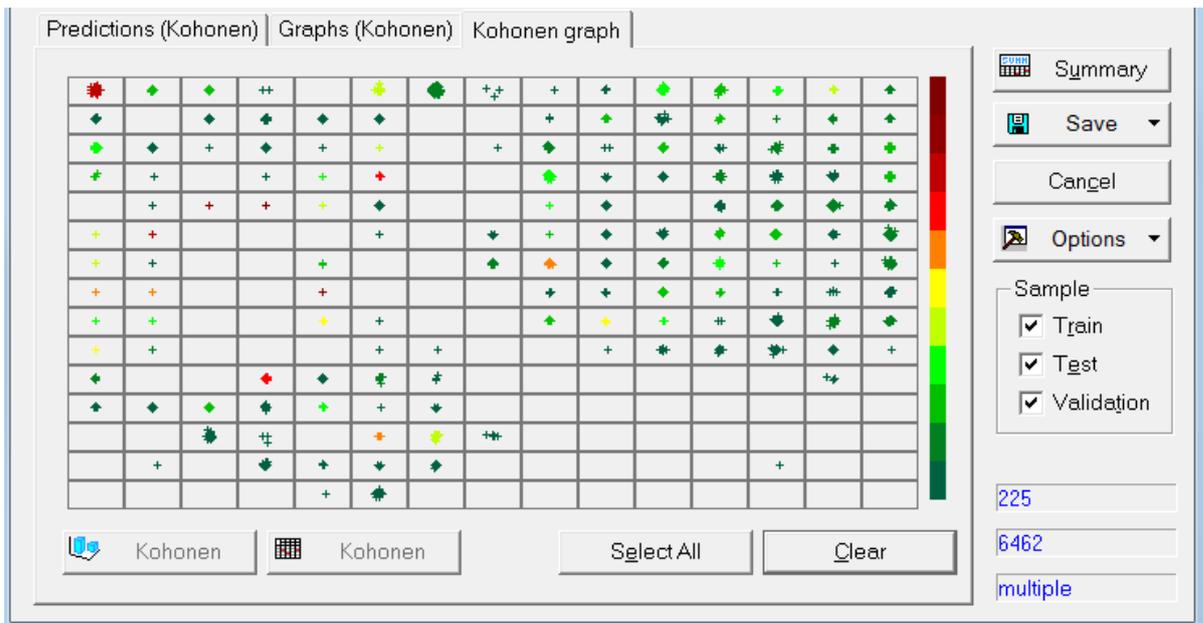


Рисунок 3.6 – Топологическая карта для группы «E1=0».

Элементы исходного множества обучающих данных (всего 6462 элемента)

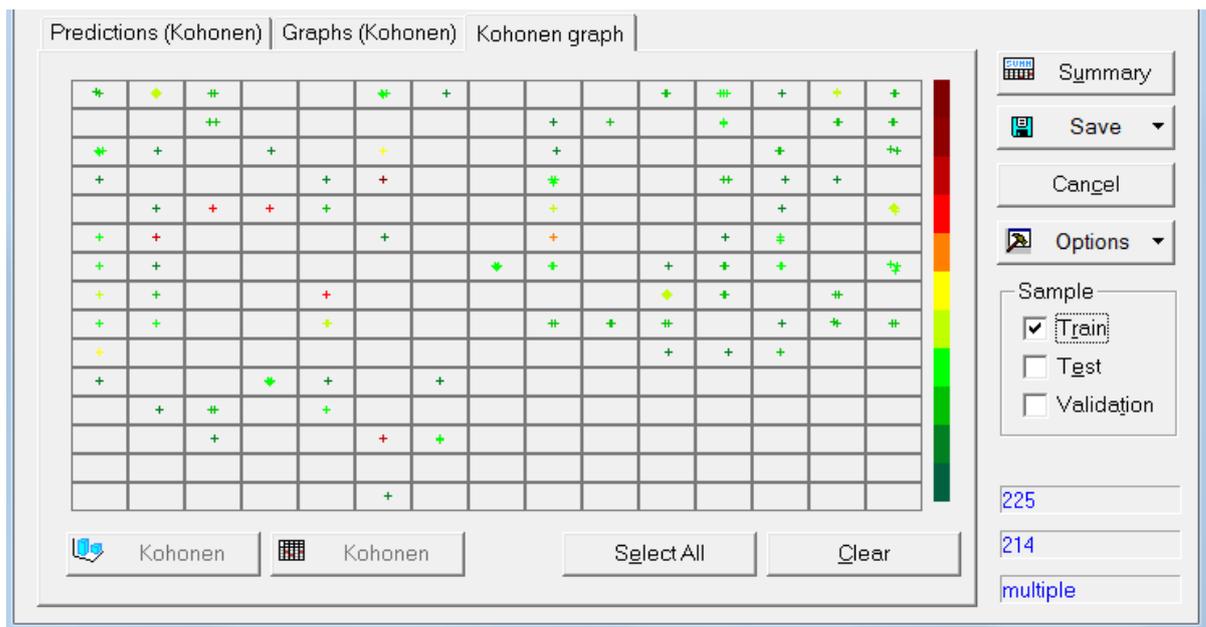


Рисунок 3.7 – Топологическая карта для группы «E1=0».

Элементы обучающей выборки (214 элементов)

Сравнение топологических карт обучающей выборки и исходного множества обучающих данных попарно внутри каждой из двух групп («E1>0» и «E1=0») показывает, что сформированные обучающие выборки в каждой группе сохраняют кластерную структуру исходного множества обучающих данных. Результаты оценки ошибок на множествах элементов сформированных обучающей, тестовой и проверочной выборок для групп «E1>0» и «E1=0» представлены на рисунках 3.8 и 3.9. Ошибки обеих групп («E1>0» и «E1=0») на

множествах элементов проверочной (0,039 и 0,034) и тестовой выборок (0,034 и 0,035) не превышают ошибки на множестве элементов обучающей выборки (0,057 и 0,043). Это позволяет утверждать, что количество элементов обучающей выборки в обеих группах не приводит к переобучению сети.

Summary of active networks (>0 in Workbook1.stw)					
Index	Net. name	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm
1	SOFM 7-225	0,057119	0,033515	0,038591	Kohonen 3

Рисунок 3.8 – Окно результатов для группы «E1>0»

Summary of active networks ("=0" in Workbook1.stw)					
Index	Net. name	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm
1	SOFM 6-225	0,042723	0,035250	0,034202	Kohonen 3

Рисунок 3.9 – Окно результатов для группы «E1=0»

В результате объединения элементов одноимённых выборок двух групп получаются репрезентативные «обучающая», «тестовая» и «проверочная» выборки, рассматриваемые в работе в дальнейшем. «Обучающая» выборка состоит из $214+68=282$ элементов, соответствующих «несуществующим» авиалиниям, и 282 элементов, – «существующим». «Тестовая» выборка содержит 3222 элемента, «проверочная» выборка – 3177 элементов.

Таким образом, определено, что сеть внутрироссийских магистральных авиалиний наилучшим образом описывается несимметричным составом входных переменных модели, когда «главный» город в паре – это город с более высоким «целевым потенциалом». С помощью карт Кохонена на основе исходного множества обучающих данных определён состав элементов компактной репрезентативной «обучающей» выборки (содержащей всего 564 элемента из 6963 элемента множества обучающих данных).

3.2 Построение нейросетевой модели

Важным этапом построения нейронной сети является выбор её структуры, наилучшим образом отражающей структуру множества обучающих данных. Структура нечёткой нейронной продукционной сети типа ANFIS, реализующая алгоритм нечёткого вывода, определяется количеством нейронов в каждом слое сети. Количество нейронов во входном слое соответствует количеству входных переменных – 6. В соответствии с алгоритмом нечёткого вывода Такаги-Сугэно, выбранным для реализации при помощи продукционной сети типа ANFIS, в выходном слое нейронной сети присутствует один нейрон. Фактически, для завершения поиска приемлемой структуры нейронной сети, необходимо определить количество нейронов в скрытом слое, которое определяет количество правил для искомой системы нечёткого вывода (модели УСА).

3.2.1 Генерация структуры и обучение нейронной сети

При создании структуры нейронной сети используется процедура субтрактивной кластеризации (Sub. clustering) [54]. Данная процедура позволяет создать достаточно компактную структуру нейронной сети, требующую приемлемых вычислительных ресурсов. В системе MatLab процедура субтрактивной кластеризации реализована функцией *subclust*. Основу алгоритма составляют идеи «горного метода» кластерного анализа. Особенностью метода является отсутствие необходимости задания количества кластеров до начала работы алгоритма.

Функция *subclust* имеет два выходных аргумента:

1. C – матрица центров найденных кластеров – каждая строка матрицы задаёт координаты центра одного кластера;
2. S – вектор радиусов кластеров.

Количество кластеров, выявленное во множестве обучающих данных, определяет необходимое количество нейронов в скрытом слое нейронной сети (соответственно – количество правил в системе нечёткого вывода). Количество кластеров зависит от параметров функции *subclust*. В работе поиск приемлемого количества кластеров осуществлялся в процессе варьирования следующих параметров функции *subclust* [62]:

- *radii* – вектора, определяющего размеры кластеров по каждой координате. Координаты вектора *radii* принимают значения в диапазоне $[0, 1]$. Как правило, при малых значениях *radii* функция *subclust* находит много мелких кластеров. Хорошие результаты кластерного анализа получаются, когда значения *radii* находятся в диапазоне $[0.2, 0.5]$. Если аргумент *radii* задан скаляром, тогда все координаты считаются одинаково важными;
- *reject ratio* – коэффициента отторжения, используемого как критерий исключения объекта из списка потенциальных центров кластеров. Чем меньше значение коэффициента отторжения, тем больше далеко расположенных друг от друга кластеров может быть найдено: коэффициент, устанавливает во сколько раз потенциал данной точки должен быть ниже потенциала центра первого кластера, чтобы рассматриваемая точка была исключена из возможных центров кластеров. Значение коэффициента отторжения должно быть меньше значения коэффициента принятия. Значение коэффициента отторжения по умолчанию равно 0.15.

Параметры алгоритма кластеризации подбираются с целью формирования нейронной сети, обладающей минимальной ошибкой на *исходном множестве обучающих данных* (совокупном множестве обучающей, тестовой и проверочной выборок). При уменьшении

значения параметра *radii* уменьшается максимальное количество возможных кластеров. Количество кластеров (правил) для каждого значения параметра *radii* определяется значением параметра *reject ratio*. Одно и то же количество кластеров (правил) для разных значений параметра *radii* определяется разными значениями параметра *reject ratio*, поэтому далее под варьированием количества кластеров (правил) подразумевается варьирование значений параметра *reject ratio*.

Для каждого варианта сочетаний значений параметров алгоритма кластеризации генерируется нечёткая нейросетевая модель УСА, которая проверяется на «обучающей» выборке – результату проверки соответствует значение *er.Tr* (*er.* – сокращение от *error* (ошибка), *Tr* – сокращение от *Train*); на «тестовой» выборке – результату проверки соответствует значение *er.Ts* (*Ts* – сокращение от *Test*); и на исходном множестве обучающих данных – результату проверки соответствует значение *er.All*. Для каждого значения параметра *radii* определяется вариант модели, соответствующий минимальной ошибке на исходном множестве обучающих данных (*er.All*). Кроме того, для дальнейшего рассмотрения отобраны варианты с несколько большей ошибкой на исходном множестве обучающих данных (*er.All*), но с существенно меньшей ошибкой на «обучающей» выборке (*er.Tr*). В итоге отобрано шесть вариантов модели УСА, для которых количество правил (кластеров) варьируется от 5 до 16. (рисунок 3.10). По минимальной ошибке на исходном множестве обучающих данных (*er.All*) определяется наиболее перспективная модель из отобранных шести. Параметры этой модели: *radii*=0.40 и 6 правил, на рисунке 3.10 она выделена голубым цветом.

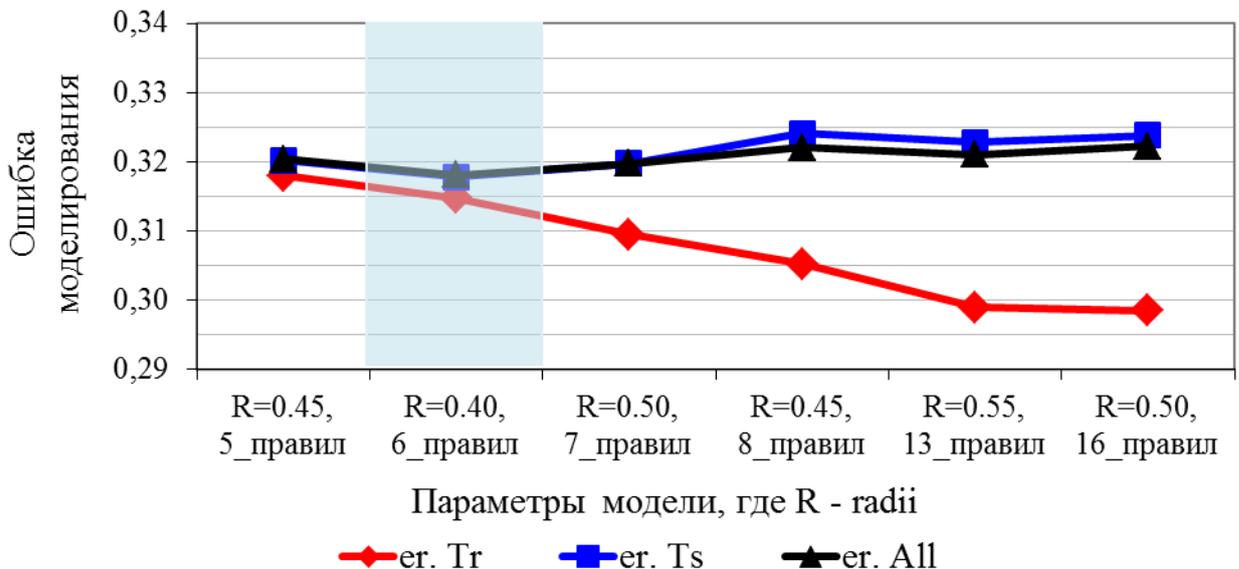


Рисунок 3.10 – Сравнение отобранных моделей для различных значений параметров ‘*radii*’ и ‘*reject ratio*’

Для модели, содержащей 6 правил, осуществляется более тонкая настройка параметра *radii*. Результаты сравнения полученных вариантов модели представлены на рисунке 3.11.

Окончательный вариант модели выделен оранжевым цветом. Эта модель имеет следующие значения параметров: ' $radii$ '=0.39 и ' $reject\ ratio$ '=0.286 (6 правил).

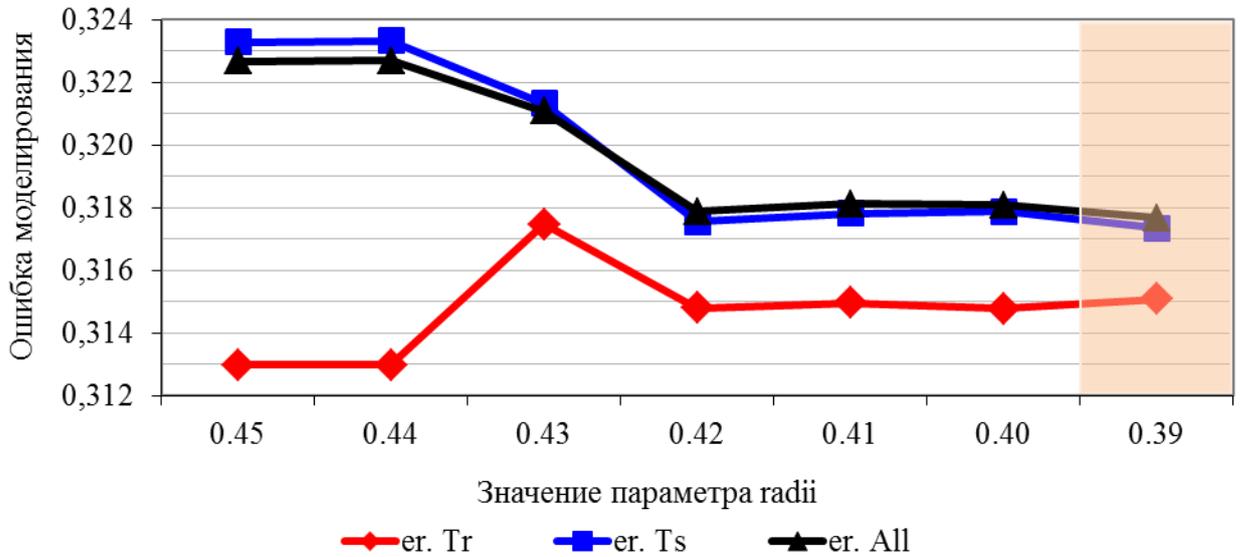


Рисунок 3.11 – Вариация параметра $radii$ для модели, содержащей 6 правил

Таким образом, структура нейронной сети для модели УСА, содержит 6 нейронов в скрытом слое, что соответствует 6 нечётким правилам (рисунок 3.12).

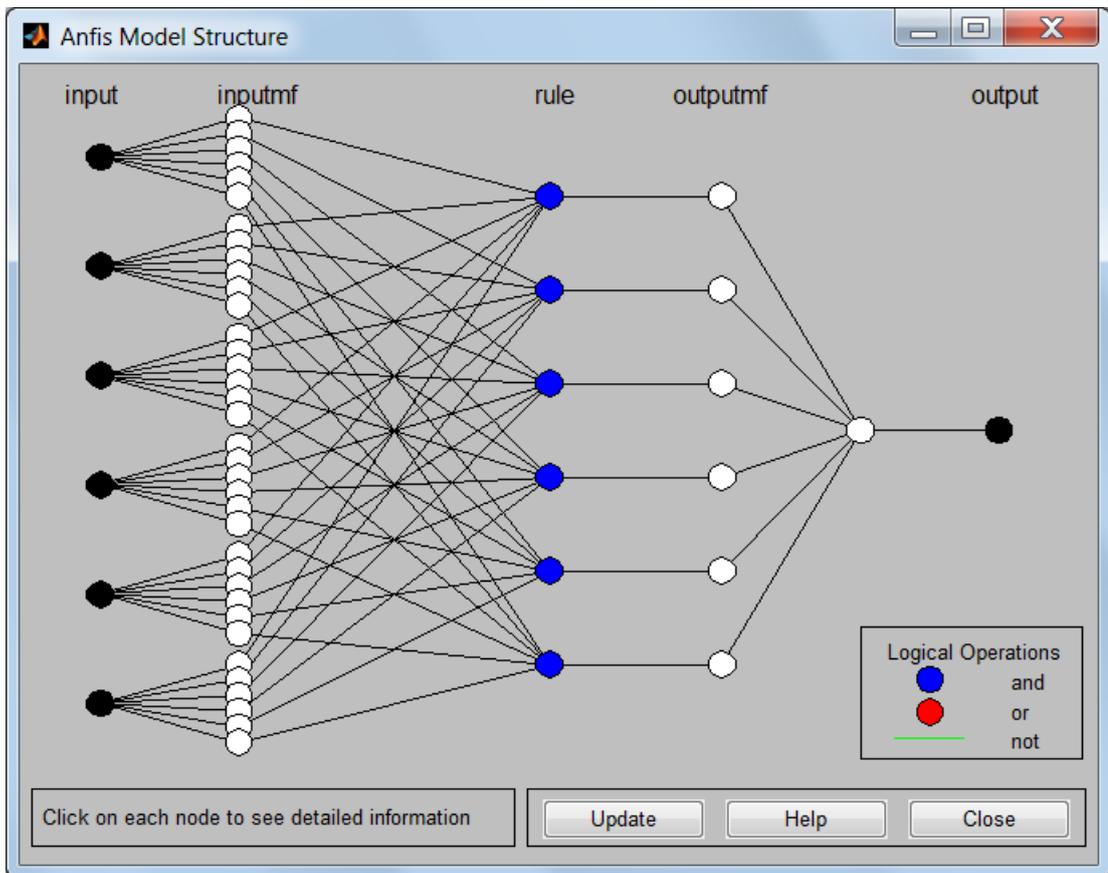


Рисунок 3.12 – Структура нейронной сети для модели УСА

Для обучения нейронной сети использован стандартный метод обратного распространения ошибки. Обучение было автоматически остановлено на второй эпохе, поскольку далее ошибка на «проверочной» выборке растёт, т.е. модель переобучается. На рисунке 3.13 представлены результаты проверки обученной нейронной сети на элементах (примерах) «обучающей» (Training) выборки. Синие точки соответствуют значениям выходных переменных, используемым при обучении нейронной сети, красные точки – значениям выходной переменной, моделируемым нейронной сетью. Значения выходной переменной, моделируемые нейронной сетью, находятся в рамках диапазона значений выходной переменной «обучающей» выборки. В данном случае ошибка моделирования на «обучающей» выборке равна 0.31509.

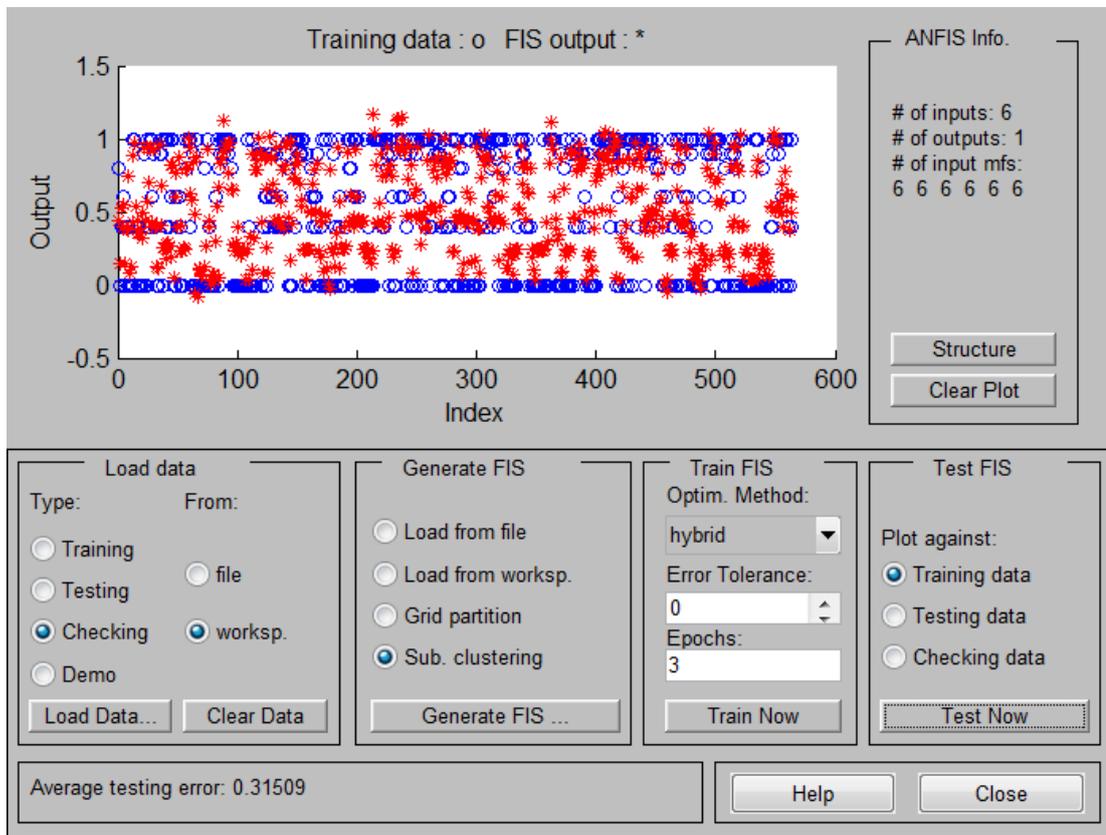


Рисунок 3.13 – Проверка обученной нейронной сети на элементах «обучающей» (Training) выборки

Результаты тестирования обученной нейронной сети на элементах «тестовой» (Testing) и «проверочной» (Checking) выборок приведены на рисунках 3.14 и 3.15. Синие точки соответствуют значениям выходной переменной «тестовой» / «проверочной» выборки, красные точки – значениям выходной переменной, моделируемым нейронной сетью на «тестовой»/ «проверочной» выборке. Ошибка моделирования на «тестовой» (Testing) выборке равна 0.31735, а на «проверочной» (Checking) выборке – 0.31849. Значения выходной переменной, моделируемые нейронной сетью на обеих выборках, находятся в рамках диапазона возможных значений выходной переменной.

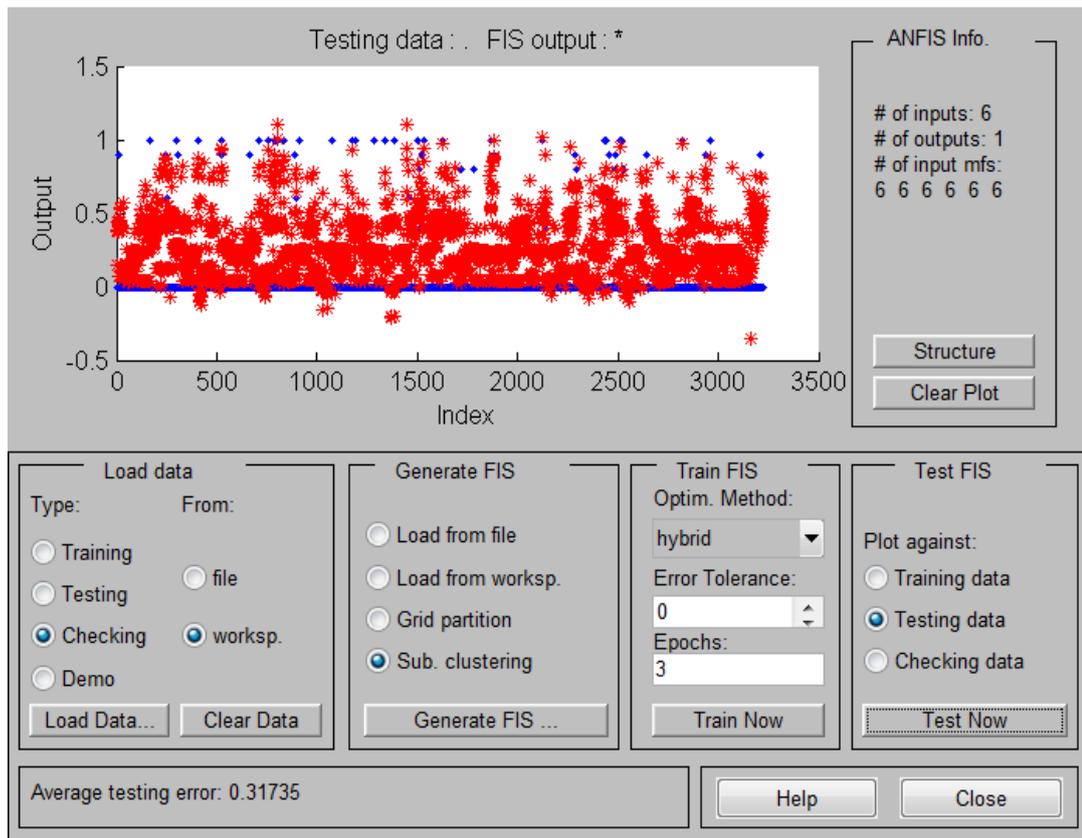


Рисунок 3.14 – Проверка обученной нейронной сети на элементах «тестовой» (Testing) выборки

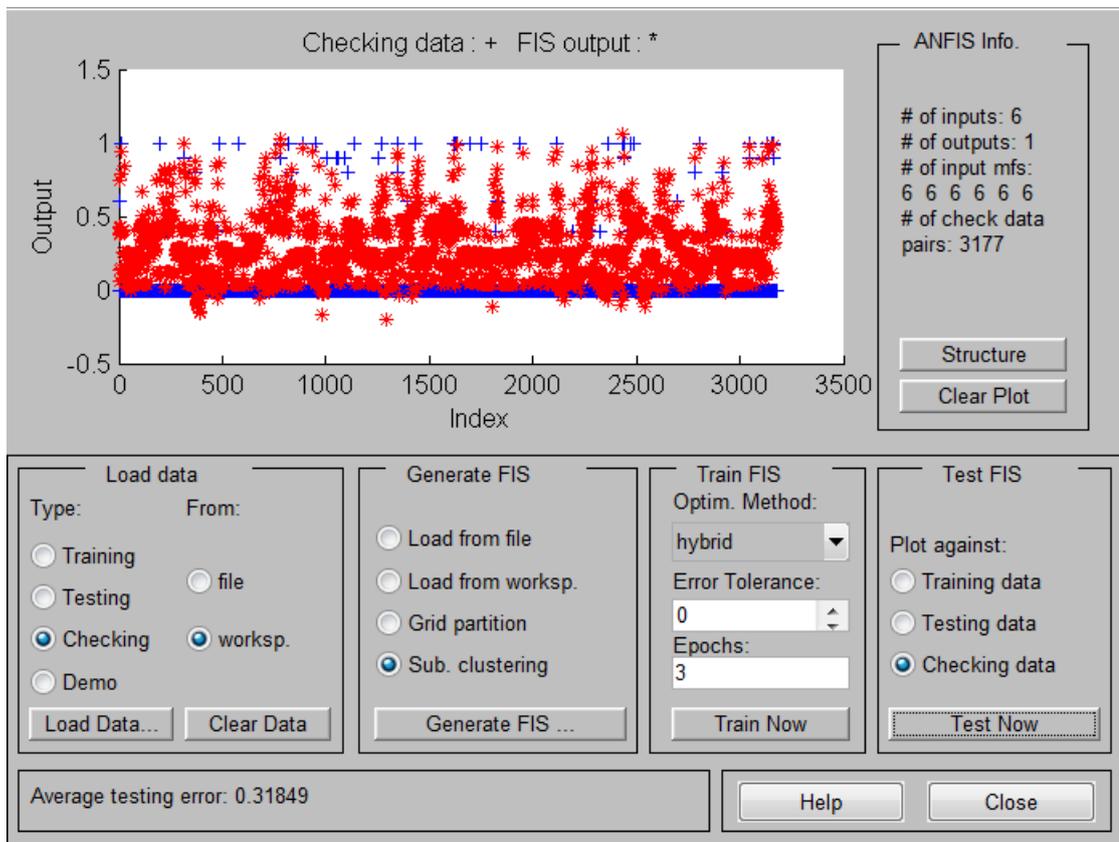


Рисунок 3.15 – Проверка обученной нейронной сети на элементах «проверочной» (Checking) выборки

Полученная нейронная сеть является реализацией модели УСА как системы нечёткого вывода, состоящей из 6 правил.

3.2.2 Математическое описание модели

Предпосылки и заключения нечётких правил модели УСА формируются в процессе обучения нейронной сети и после обучения могут быть выражены математически.

Пусть $X = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ – вектор входных нормированных переменных, x_i – значение i -ой входной переменной, y – выход модели (значение выходной переменной), $x_1 = in1, x_2 = in2, x_3 = in3, x_4 = in4, x_5 = in5, x_6 = in6$ и $y = out1$, где

$in1$: потенциал авиасвязи пары городов (F1);

$in2$: наличие ж.-д. сообщения (F3);

$in3$: ВРП субъекта РФ неглавного города (F4);

$in4$: численность населения, отнесённого к неглавному городу (F6);

$in5$: число мест коллективного размещения, отнесённое к главному городу (F9);

$in6$: статус главного города (F11);

$out1$: выходная переменная нейронной сети (E1).

Значение выходной переменной $y = f(X)$ определяется в соответствии с алгоритмом формирования системы нечёткого вывода (п.2.3) в виде лингвистических правил <ЕСЛИ – ТО> [59, сс. 36-37; 55, сс. 32-49]. Правила являются своего рода переключателями с одной функциональной зависимости «вход-выход» на другую. Одновременно могут выполняться несколько функциональных зависимостей, но в разной степени [59, с. 43].

Графический интерфейс редактора правил для модели УСА представлен на рисунке 3.16. Общий вид нечёткого правила:

ПРАВИЛО № j : ЕСЛИ «предпосылка правила j » ТО «заключение правила j ».

Предпосылка правила представляет собой утверждение типа « x_1 есть низкий и x_2 есть высокое», где «низкий» и «высокое» – это термы, заданные нечёткими множествами на универсальных множествах лингвистических переменных x_1 и x_2 . *Терм* – элемент множества всех возможных значений лингвистической переменной, задаётся нечётким множеством посредством функции принадлежности. *Лингвистическая переменная* – переменная, значениями которой могут быть слова или словосочетания естественного языка. *Функция принадлежности* – функция, позволяющая для произвольного элемента вычислить степень его принадлежности к нечёткому множеству [59, с. 9]. *Заключение правила* – это факт типа « y есть d », значение выходной переменной задаётся чёткой линейной функцией от входных переменных вида « $y = a + bx$ », где a, b – коэффициенты линейной функции [59, с. 37].

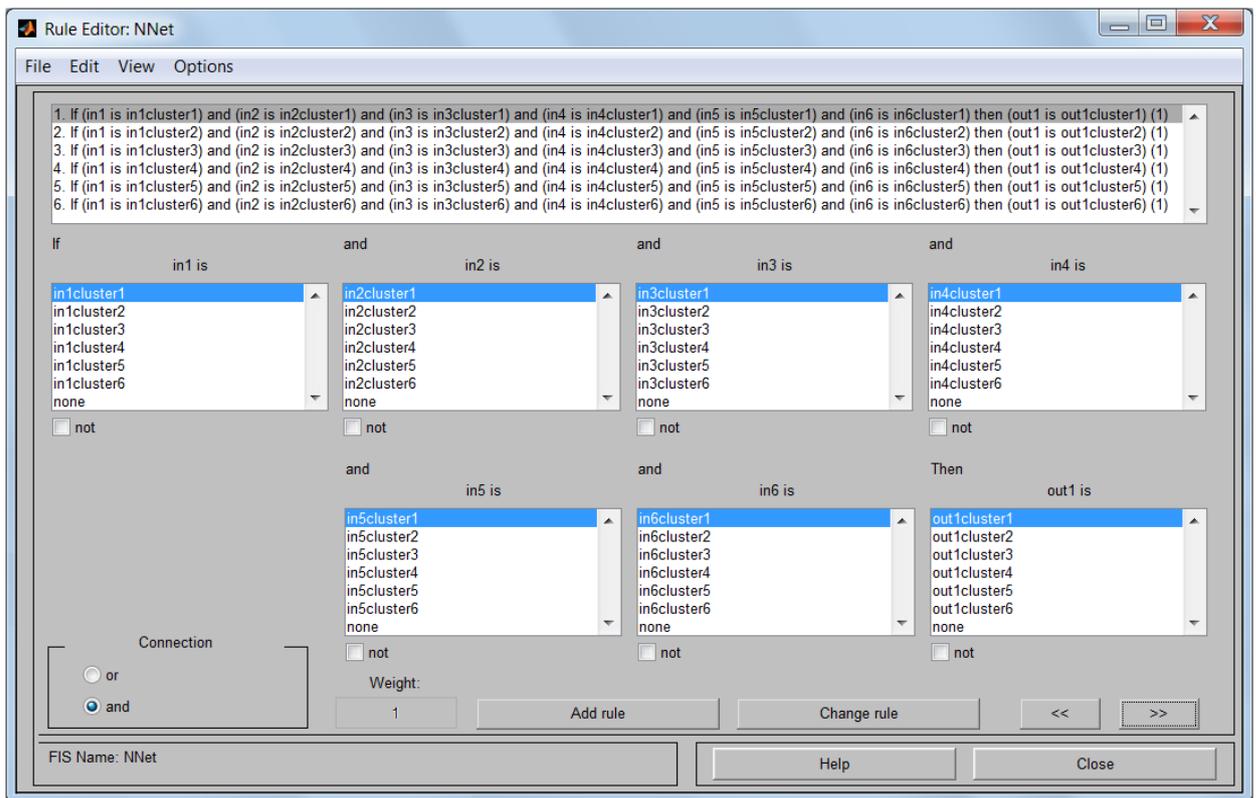


Рисунок 3.16 – Графический интерфейс редактора правил для модели УСА

Правила модели УСА имеют следующий вид:

ПРАВИЛО № j : ЕСЛИ «для всех $i=1÷6$ ini есть $iniclusterj$ » ТО «out1 есть $out1clusterj$ »,

где ini – значение i -ой входной переменной, $iniclusterj$ – j -ое нечёткое множество i -ой входной переменной (задаётся посредством функции принадлежности, определяет терм лингвистической переменной), $out1clusterj$ – j -я линейная функция 1-ой (и единственной) выходной переменной от входных переменных [54, 59]. Таким образом, в модели УСА каждое j -ое нечёткое множество i -ой входной переменной используется только в одном (j -м) правиле, эти множества могут не пересекаться, пересекаться или полностью совпадать.

Для задания термов (лингвистических значений) входных переменных в модели УСА используются гауссовы функции принадлежности [59, сс. 58-63]:

$$\mu_j(x_i) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - c_{ji}}{\sigma_{ji}}\right)^2\right),$$

где $\mu_j(x_i)$ – функция принадлежности i -ой входной переменной к j -му нечёткому множеству, параметры функции принадлежности: c_{ji} – координата максимума и σ_{ji} – коэффициент концентрации.

Агрегирование степеней истинности предпосылок по каждому из нечётких продукционных правил осуществляется в соответствии с формулой [59, сс. 58-63]:

$$\beta_j = \frac{\mu_j(x_1)\mu_j(x_2)\mu_j(x_3)\mu_j(x_4)\mu_j(x_5)\mu_j(x_6)}{\sum_{k=1}^6 \mu_k(x_1)\mu_k(x_2)\mu_k(x_3)\mu_k(x_4)\mu_k(x_5)\mu_k(x_6)},$$

где β_j – относительная степень выполнения j -го правила для входного вектора X .

Вычисление заключения y_j каждого из нечётких продукционных правил осуществляется по формуле [59, сс. 58-63]:

$$y_j = b_{j0} + b_{j1}x_1 + b_{j2}x_2 + b_{j3}x_3 + b_{j4}x_4 + b_{j5}x_5 + b_{j6}x_6,$$

где b_{ji} – i -й коэффициент линейной функции в заключении j -го правила системы нечёткого вывода типа Сугэно, b_{j0} – смещение.

Активизация заключений всех правил и дефаззификация выходной переменной y осуществляется по формуле [59, сс. 58-63]:

$$y = \sum_{j=1}^6 \beta_j y_j.$$

Суждение о значении выходной переменной y определяется в результате дефаззификации путём «взвешивания» заключений каждого j -го правила (y_j). Тогда функциональная зависимость дефаззифицированного значения выходной переменной от значений входных переменных имеет следующий вид:

$$y(X) = \sum_{j=1}^6 \left(\frac{\prod_{i=1}^6 \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - c_{ji}}{\sigma_{ji}}\right)^2\right)}{\sum_{k=1}^6 \prod_{i=1}^6 \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x_i - c_{ki}}{\sigma_{ki}}\right)^2\right)} \times (b_{j0} + \sum_{i=1}^6 b_{ji}x_i) \right).$$

Коэффициенты линейной функции b_{ji} представлены в таблице 3.2. Значения параметров c_{ji} и σ_{ji} представлены в таблице 3.3. Указанные параметры являются коэффициентами нечёткой нейронной сети, настраиваемыми в процессе её обучения (см. рисунок 2.9 в п.2.3).

Таблица 3.2

Коэффициенты линейной функции b_{ji} в заключениях системы нечёткого вывода типа Сугэно (j – номер правила, i – номер коэффициента)

j	b_{j0}	b_{j1}	b_{j2}	b_{j3}	b_{j4}	b_{j5}	b_{j6}
1	1,3681	-0,4956	0,0000	20,8651	0,7140	-1,7749	-0,8323
2	71,7126	7,0362	0,1991	70,0939	13,6425	-45,4837	-104,5814
3	0,8145	-1,2866	0,7734	-7,7423	-2,8605	-2,6993	-0,1747
4	-7,1238	-0,2421	0,0138	8,3374	-1,9450	20,0421	7,2802
5	33,7728	-14,7948	-77,0923	10,3175	-13,5229	37,5118	72,8434
6	-22,9988	-0,5531	1,3698	3,3650	-0,6177	3,2097	44,1709

Параметры функций принадлежности $\mu_j(x_i)$: c_{ji} – координата максимума и σ_{ji} – коэффициент концентрации (j – номер правила, i – номер входной переменной)

Номер правила (j)	Номер переменной (i)	c_{ji}	σ_{ji}	Номер правила (j)	Номер переменной (i)	c_{ji}	σ_{ji}
1	1	1,0002	0,1085	4	1	0,5993	0,1091
	2	0,0000	0,1379		2	1,0005	0,1340
	3	0,0003	0,0297		3	0,0062	0,0321
	4	0,0017	0,0958		4	0,0330	0,0965
	5	0,0166	0,0536		5	0,3176	0,0453
	6	0,7495	0,1056		6	0,2502	0,1040
2	1	0,5965	0,1079	5	1	0,6063	0,1074
	2	1,0000	0,1378		2	0,9998	0,1394
	3	0,0134	0,0262		3	-0,0011	0,0283
	4	0,0267	0,0989		4	0,0222	0,0953
	5	0,0289	0,0458		5	0,0300	0,0405
	6	0,7504	0,1037		6	0,7489	0,1040
3	1	0,8003	0,1107	6	1	0,5967	0,1147
	2	1,0000	0,1379		2	1,0000	0,1378
	3	0,0026	0,0296		3	0,0114	0,0298
	4	0,0221	0,0957		4	0,0371	0,0928
	5	0,0257	0,0443		5	0,0568	0,0408
	6	0,7501	0,1041		6	0,5002	0,1038

Функции y_j принимают значения в широком диапазоне. Диапазон возможных значений $y_j(X)$ при нормированных значениях $x_i \in [0; 1]$ представлен в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Диапазон возможных значений $y_j(X)$ при $x_i \in [0; 1]$

y_j	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
min	-1,7347	-78,3525	-13,9489	-9,3109	-71,6372	-24,1696
max	20,9472	162,6843	1,5879	28,5497	154,4455	29,1166

3.2.3 Содержательная интерпретация предпосылок нечётких правил и результата нечёткого вывода модели

Анализ функций принадлежности (рисунки 3.17 – 3.19) позволяет определить терм-множества лингвистических входных переменных (таблица 3.5). Терм-множество – множество всех возможных значений (термов) лингвистической переменной.

Таблица 3.5

Терм-множества входных переменных

Переменная	Название переменной	Терм-множество переменной
x_1	«Потенциал авиасвязи»	<i>высокий, средний и низкий</i>
x_2	«Наличие ж.-д. сообщения»	<i>да и нет</i>
x_3	«ВРП субъекта РФ города»	<i>низкий и высокий</i>
x_4	«Численность населения, отнесённого к городу»	<i>низкая, средняя, высокая и очень высокая</i>
x_5	«Число мест коллективного размещения, отнесённое к городу»	<i>малое, большое и очень большое</i>
x_6	«Статус города»	<i>очень высокий, высокий и невысокий</i>

В таблицах 3.6 – 3.11 даны определения терм-множеств всех шести входных переменных. Наслоение термов – переменные x_3 , x_4 (рисунок 3.18) и x_5 (рисунок 3.19, а) – связано с отличием диапазона значений входных переменных (x_3 , x_4 и x_5) в обучающей выборке от диапазона допустимых значений $[0; 1]$. Отличие диапазонов обусловлено тем, что при нормировании переменных x_3 , x_4 и x_5 предполагалось сохранить «запас» их значений в диапазоне от 0 до 1 с учётом их дальнейшего роста.

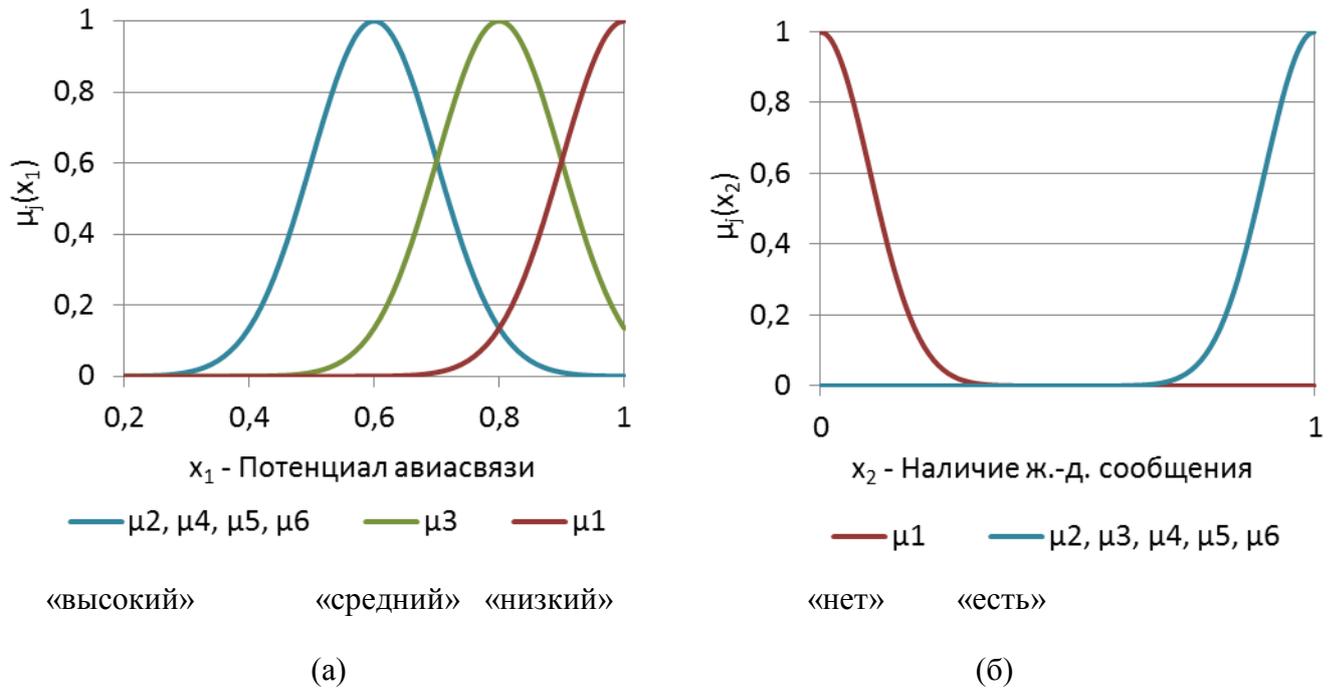


Рисунок 3.17 – Функции принадлежности 1-й (а) и 2-й (б) входных переменных

Таблица 3.6

Терм-множество лингвистической переменной «Потенциал авиасвязи»

(рисунок 3.17, а)

Терм	«Высокий»	«Средний»	«Низкий»
Значение x_1	[0; 0,7]	(0,7; 0,9]	(0,9; 1]
Соответствие $\mu_j(x_1)$ термам	$\mu_2, \mu_4, \mu_5, \mu_6$	μ_3	μ_1
Потенциал авиасвязи пары городов	1÷3	4	5

Таблица 3.7

Терм-множество лингвистической переменной «Наличие ж.-д. сообщения»

(рисунок 3.17, б)

Терм	«Нет»	«Есть»
Значение x_2	[0; 0,5)	[0,5; 1]
Соответствие $\mu_j(x_2)$ термам	μ_1	$\mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5, \mu_6$
Наличие ж.-д. сообщения	0	1

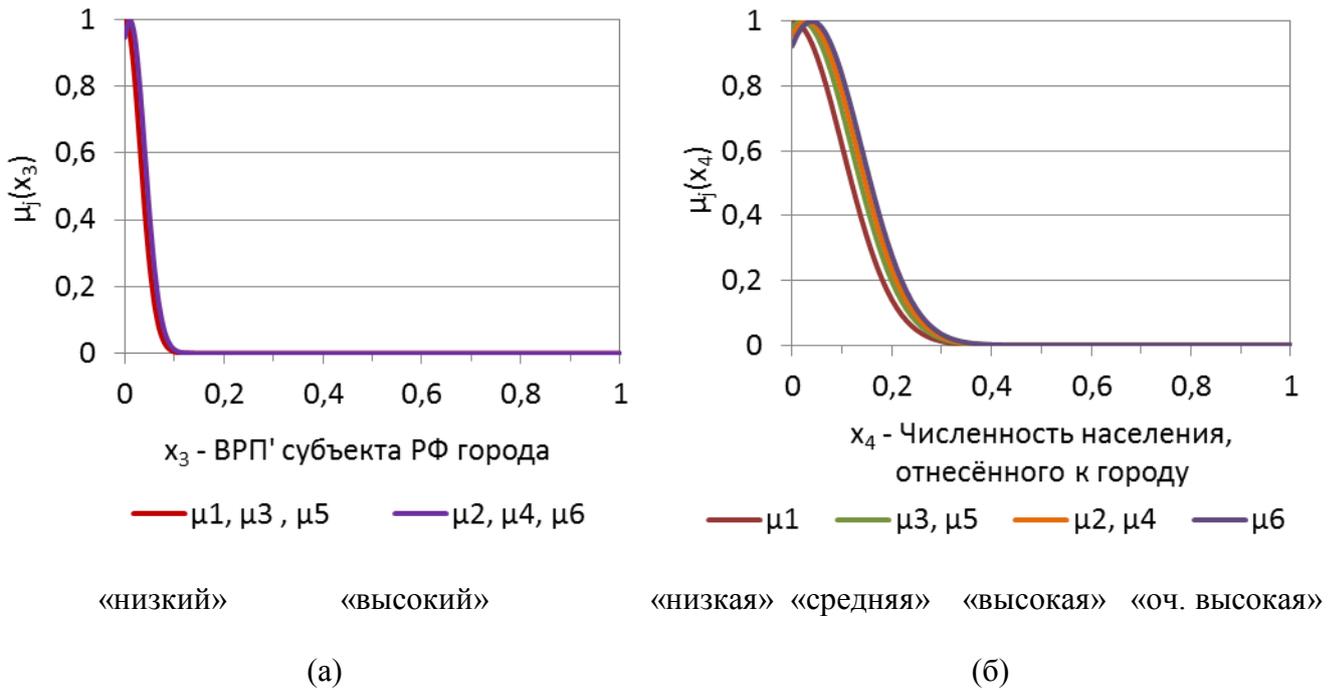


Рисунок 3.18 – Функции принадлежности 3-й (а) и 4-й (б) входных переменных

Таблица 3.8

Терм-множество лингвистической переменной «ВРП' субъекта РФ города»
(рисунок 3.18, а)

Терм	«Низкий»	«Высокий»
Значение x_3	$[0; 0,0045)$	$[0,0045; 1]$
Соответствие $\mu_j(x_3)$ термам	μ_1, μ_3, μ_5	μ_2, μ_4, μ_6
ВРП' субъекта РФ города, млрд. руб.	< 90	≥ 90

Таблица 3.9

Терм-множество лингвистической переменной «Численность населения,
отнесённого к городу» (рисунок 3.18, б)

Терм	«Низкая»	«Средняя»	«Высокая»	«Очень высокая»
Значение x_4	$[0; 0,010]$	$(0,010; 0,025]$	$(0,025; 0,035]$	$(0,035; 1]$
Соответствие $\mu_j(x_4)$ термам	μ_1	μ_3, μ_5	μ_2, μ_4	μ_6
Численность населения, отнесённого к городу, млн. человек	$< 0,4$	от 0,4 до 1,0	от 1,0 до 1,4	$> 1,4$

В таблице 3.12 представлена содержательная интерпретация предпосылок каждого правила через лингвистические оценки (термы) входных переменных. Также указаны соответствующие им диапазоны численных значений нормированных входных переменных.

Таблица 3.12

Предпосылки нечётких правил (*j* – номер правила)

<i>j</i>	«Потенциал авиасвязи»	«Наличие ж.-д. сообщения»	«ВРП субъекта РФ неглавного города»	«Числ. населения, отнесённого к неглавному городу»	«Число мест коллективного размещения, отнесённое к главному городу»	«Статус главного города»
1	«Низкий» 1	«Нет» 0	«Низкий» < 0,0045	«Низкая» ≤ 0,010	«Малое» < 0,05	«Невысокий» > 0,5
2	«Высокий» < 0,8	«Есть» 1	«Высокий» ≥ 0,0045	«Высокая» (0,025; 0,035]	«Малое» < 0,05	«Невысокий» > 0,5
3	«Средний» 0,8	«Есть» 1	«Низкий» < 0,0045	«Средняя» (0,010; 0,025]	«Малое» < 0,05	«Невысокий» > 0,5
4	«Высокий» < 0,8	«Есть» 1	«Высокий» ≥ 0,0045	«Высокая» (0,025; 0,035]	«Оч. большое» > 0,18	«Оч. высокий» 0,25
5	«Высокий» < 0,8	«Есть» 1	«Низкий» < 0,0045	«Средняя» (0,010; 0,025]	«Малое» < 0,05	«Невысокий» > 0,5
6	«Высокий» < 0,8	«Есть» 1	«Высокий» ≥ 0,0045	«Оч. высокая» > 0,035	«Большое» [0,05; 0,18]	«Высокий» 0,5

Сочетаниям значений пар параметров, характеризующих факторы, определяющие «условия существования» авиалинии, может быть дана лингвистическая оценка (таблицы 3.13 – 3.15). Так, например, в таблице 3.12 встречается три возможных сочетания лингвистических значений параметров, характеризующих «возможности транспортной инфраструктуры пары городов»: для правила № 1 это «нет» наличия ж.-д. сообщения и «низкий» потенциал авиасвязи, для правила № 3 это «есть» наличие ж.-д. сообщения и «средний» потенциал авиасвязи, для остальных правил – это «есть» наличие ж.-д. сообщения и «высокий» потенциал авиасвязи. Исходя из сочетания значений этих параметров, определены три лингвистических значения фактора «возможности транспортной инфраструктуры пары городов» – «малые», «средние» и «большие». Аналогично с лингвистическими значениями других факторов (таблица 3.13).

Таблица 3.13

Лингвистическая оценка «Возможностей транспортной инфраструктуры пары городов»

«Возможности транспортной инфраструктуры пары городов»	«Потенциал авиасвязи»	«Наличие ж.-д. сообщения»
«Малые»	«Низкий»	«Нет»
«Средние»	«Средний»	«Есть»
«Большие»	«Высокий»	«Есть»

Таблица 3.14

Лингвистическая оценка «Генерационных возможностей города»

«Генерационные возможности города»	«ВРП' субъекта РФ города»	«Числ. населения, отнесённого к городу»
«Малые»	«Низкий»	«Низкая»
«Средние»	«Низкий»	«Средняя»
«Большие»	«Высокий»	«Высокая»
«Оч. большие»	«Высокий»	«Очень высокая»

Таблица 3.15

Лингвистическая оценка «Целевого потенциала города»

«Целевой потенциал города»	«Число мест коллективного размещения, отнесённое к городу»	«Статус города»
«Невысокий»	«Малое»	«Невысокий»
«Высокий»	«Большое»	«Высокий»
«Оч. высокий»	«Оч. большое»	«Оч. высокий»

Содержательная интерпретация предпосылок нечётких правил по лингвистическим значениям факторов представлена на рисунке 3.20. Цифрой указан номер правила, стрелкой указано направление авиасвязи из *неглавного* (с более низким целевым потенциалом) города в *главный* (с более высоким целевым потенциалом) город пары. Например, содержательная интерпретация предпосылки правила №1 – «*малые* генерационные возможности неглавного города, *малые* возможности транспортной инфраструктуры пары городов и *невысокий* целевой потенциал главного города». Интерпретация предпосылок правил может рассматриваться также как характеристика соответствующих этим правилам кластеров пар городов.

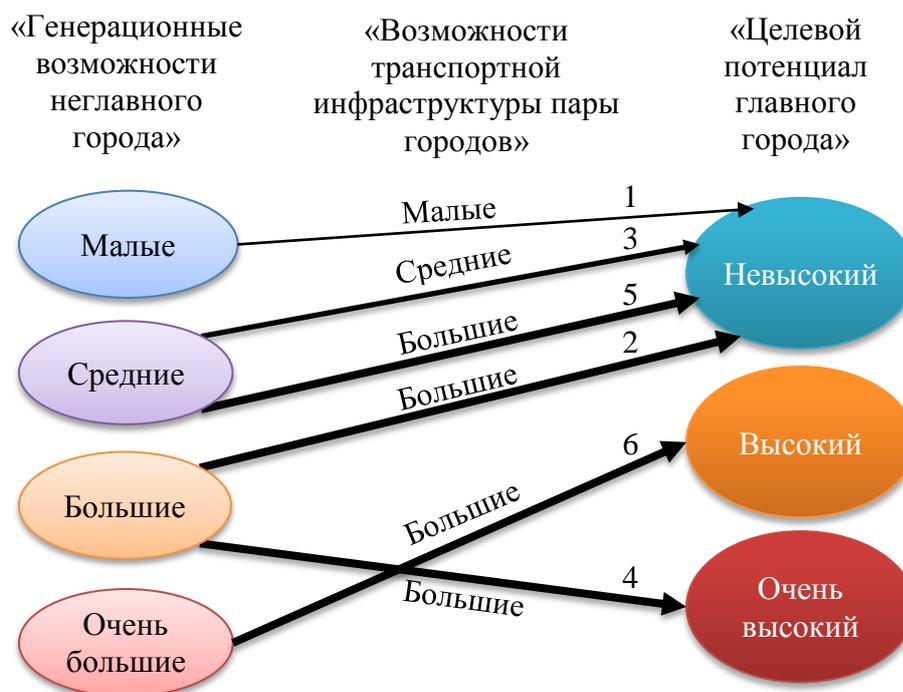


Рисунок 3.20 – Содержательная интерпретация предпосылок нечётких правил

Анализ элементов обучающих данных на предмет удовлетворения предпосылок нечётких правил модели УСА по значениям входных переменных показал, что полностью предпосылке одного из правил удовлетворяют только 43% элементов обучающих данных, остальные удовлетворяют предпосылке какого-либо правила только частично (таблица 3.16).

Таблица 3.16

Количество элементов (примеров) обучающих данных, удовлетворяющих максимум N условиям (из шести) предпосылки хотя бы одного из правил

N	6	5	4	3	2
Количество пар городов	3002	2826	958	174	3
Доля в общем, %	43%	41%	14%	2%	0%

Ниже для каждого из правил приведены примеры пар городов, которые полностью удовлетворяют предпосылке этого правила (на втором месте в паре указан главный город – город с наибольшим целевым потенциалом):

- №1: Амдерма и Архангельск; Ленск и Иркутск; Хатанга и Красноярск;
- №2: Тюмень и Красноярск; Новокузнецк и Архангельск; Хабаровск и Иркутск;
- №3: Абакан и Липецк; Братск и Ижевск; Сыктывкар и Воронеж;
- №4: Новокузнецк и Москва; Тюмень и Москва; Хабаровск и Москва;
- №5: Абакан и Красноярск; Братск и Иркутск; Сыктывкар и Архангельск;
- №6: Екатеринбург и Санкт-Петербург; Новосибирск и Самара; Уфа и Санкт-Петербург.

Анализ результата нечёткого вывода (значений выходной переменной модели УСА) по каждому из правил имеет смысл проводить только на примере тех пар городов, которые полностью удовлетворяют предпосылке данного правила. Проанализировано расположение пар городов полностью удовлетворяющих предпосылке какого-либо правила в проекции факторного пространства (значения выходной переменной модели УСА в зависимости от «генерационных возможностей неглавного города» и «целевого потенциала главного города» пары). Отмечено, что в факторном пространстве пары городов сгруппированы, соответствующие им значения выходной переменной располагаются в некотором диапазоне. Эти диапазоны у разных правил могут пересекаться (рисунок 3.21).

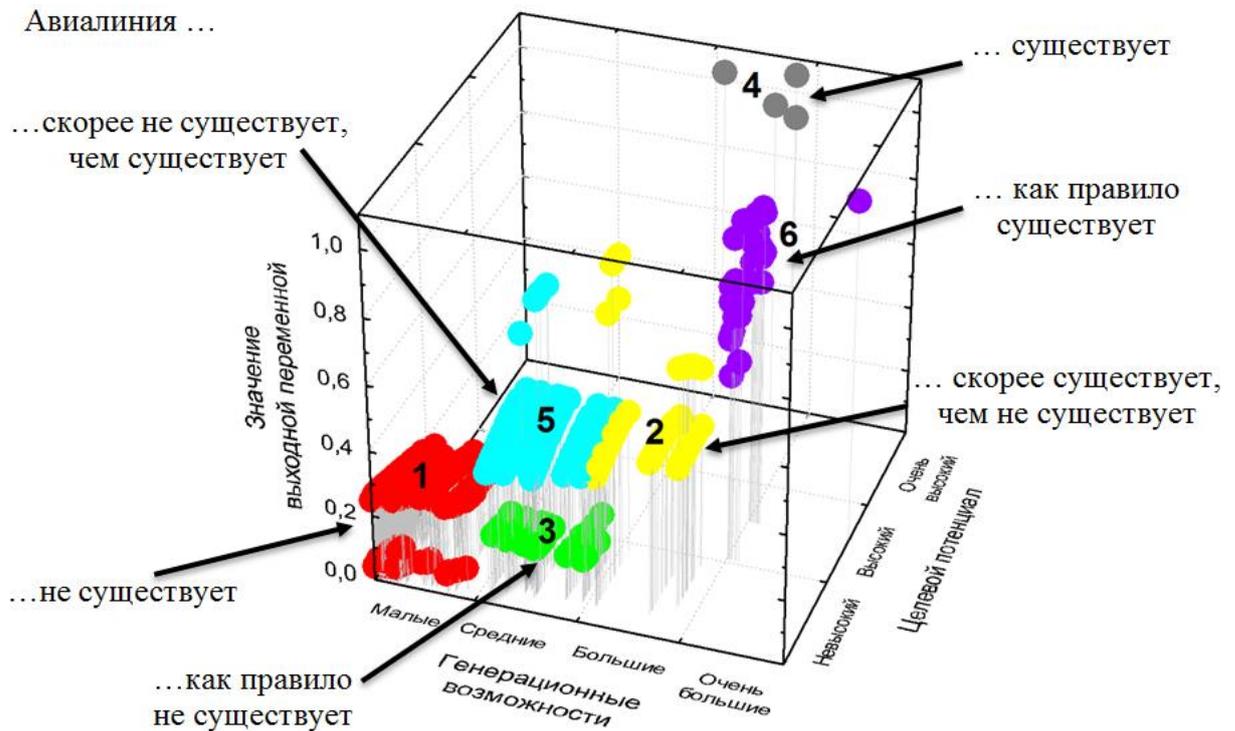


Рисунок 3.21 – Содержательная интерпретация результата нечёткого вывода

Для правил №1 и №4 результат нечёткого вывода определяется заключением только одного из этих правил. Центры кластеров, соответствующие предпосылкам правил №1 и №4, достаточно удалены в многомерном пространстве друг от друга и от остальных центров кластеров пар городов. Более того, если полностью удовлетворяются предпосылки правила №1, то заключение этого правила однозначно указывает на отсутствие прямой авиасвязи для данной пары городов. Если полностью удовлетворяются предпосылки правила №4, то заключение этого правила однозначно указывает на существование прямой авиасвязи для данной пары городов.

Результат нечёткого вывода правил №2, 3, 5 и 6 формируется на основе взвешивания заключений этих правил, поскольку кластеры, соответствующие предпосылкам этих правил, пересекаются – их центры находятся близко друг к другу в многомерном пространстве.

Значение выходной переменной зависит от конкретного сочетания значений входных переменных. Фактически результат нечёткого вывода отражает степень существования авиалинии и может быть интерпретирован представленным на рисунке 3.21 образом.

Таким образом, с использованием нейросетевых технологий и специальным образом подготовленного множества обучающих данных построена модель «условий существования» авиалинии (УСА) как система нечёткого вывода. Основу модели составляют 6 правил. С использованием лингвистических значений факторов («возможности транспортной инфраструктуры пары городов», «генерационные возможности неглавного города» и «целевой потенциал главного города»), определяющих существование прямого авиасообщения между городами, дана содержательная интерпретация предпосылок нечётких правил. Определена система из 6 лингвистических значений, описывающих результат нечёткого вывода. Для окончательного вывода о существовании прямого сообщения между городами необходимо использование всех правил модели УСА.

3.3 Точность и адекватность модели

Анализ качества сформированной модели УСА осуществляется посредством исследования её точности и адекватности. Точность модели оценивается количественными показателями. Адекватность модели определяется границами её применимости.

С целью оценки количественных показателей качества модели «условий существования» авиалинии проводится моделирование сети внутрироссийских магистральных авиалиний для 2006 года. Моделирование авиалинии осуществляется по направлению в город с лучшим «целевым потенциалом». Если моделируемое значение «выходной» переменной ≥ 0.5 , то считается, что авиалиния моделируется как «существующая», в противном случае (< 0.5) считается, что авиалиния моделируется как «несуществующая».

Для сопоставления расчётных и фактических данных результаты моделирования представляются в виде модельной **OD**-матрицы. Модельная матрица поэлементно сравнивается с исходной **OD**-матрицей (рисунок 3.3), содержащей авиалинии, реально существующие в 2006 г. По результатам этого сравнения выделяются 4 класса авиалиний. Для обозначения этих классов в рассмотрение вводится двузначный индекс, в котором первая цифра относится к реальной авиалинии, а вторая – к моделируемой: 11 – авиалиния существует и *моделируется* (моделируется как «существующая»); 00 – авиалиния не существует и *не моделируется* (моделируется как «несуществующая»); 01 – авиалиния не существует, но моделируется; 10 – авиалиния существует, но не моделируется. Первые два класса соответствуют совпадению результатов моделирования с реальной сетью. Третий и четвёртый классы свидетельствуют об отличии моделируемой сети от реальной.

Анализ результатов моделирования авиалиний 2006 г. (таблица 3.17 – центральный столбец) показывает, что моделью неудовлетворительно моделируется 27% существующих в 2006 г. авиалиний и 9% несуществующих. Количественные показатели качества модели могут быть улучшены при условии более точного определения границ применимости модели.

Таблица 3.17

Результаты моделирования 2006 г. без учёта и с учётом зоны «нечувствительности»

Класс моделируемой авиалинии		Без учёта зоны «нечувствительности»		С учётом зоны «нечувствительности»	
		Кол-во авиалиний	Процентное соотношение	Кол-во авиалиний	Процентное соотношение
Авиалиния существует и моделируется	11	291	73 % от «существующих»	221	83% от «существующих»
Авиалиния не существует и не моделируется	00	5950	91 % от «несуществующих»	4291	96% от «несуществующих»
Суммарное число правильно моделируемых авиалиний		6241	90 % от общего числа	4512	65% от общего числа
Авиалиния существует, но не моделируется	10	105	27 % от «существующих»	44	17% от «существующих»
Авиалиния не существует, но моделируется	01	617	9 % от «несуществующих»	168	4% от «несуществующих»
Суммарное число неправильно моделируемых авиалиний		722	10 % от общего числа	212	3% от общего числа
Авиалиния моделируется неоднозначно		---	-----	2239	32% от общего числа
Пассажиропоток, проходящий на правильно моделируемые авиалинии (класс 11)			94%		90%

Распределение существующих и несуществующих авиалиний по моделируемым значениям выходной переменной для элементов обучающей выборки и элементов обучающих данных представлено на рисунках 3.22 и 3.23 соответственно. Множества существующих и несуществующих авиалиний пересекаются. Можно предположить, что имеется диапазон значений моделируемой выходной переменной (*зона нечувствительности модели*), при которых нельзя однозначно судить, существует ли данная авиалиния или нет. В этот диапазон значений моделируемой выходной переменной попадает значительное количество как существующих, так и несуществующих авиалиний. Зона нечувствительности модели располагается в окрестности значения выходной переменной равно 0.5.

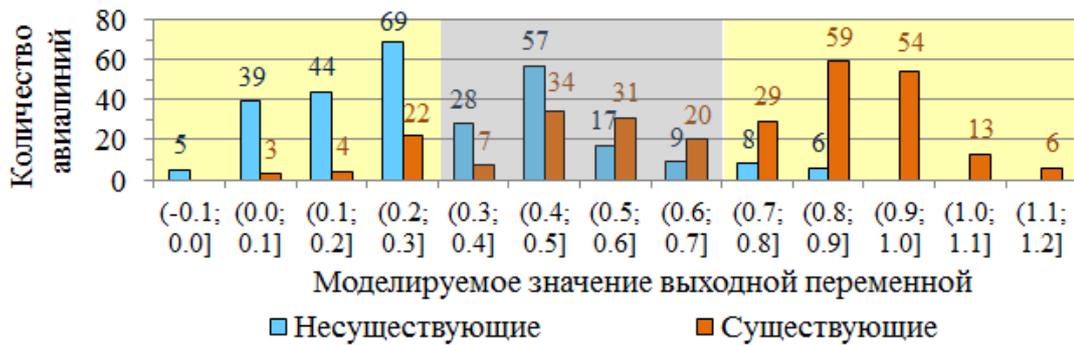


Рисунок 3.22 – Распределение авиалиний по моделируемым значениям выходной переменной (обучающая выборка)

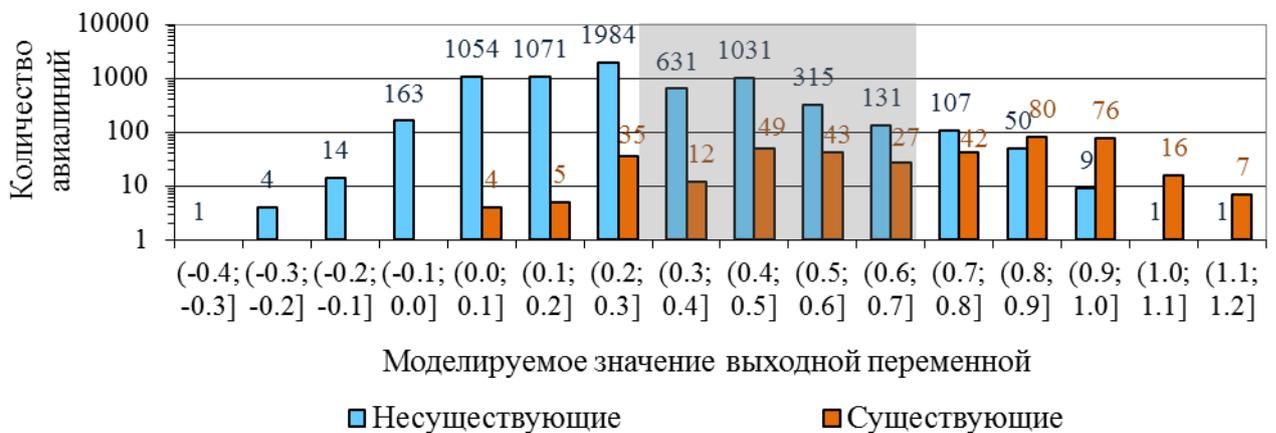


Рисунок 3.23 – Распределение авиалиний по моделируемым значениям выходной переменной (обучающие данные)

Анализ результатов моделирования для различных диапазонов зоны «нечувствительности» модели представлен на рисунках 3.24 и 3.25. Авиалинии, попадающие в зону «нечувствительности» модели, исключаются из рассмотрения. Введение зоны «нечувствительности» модели устанавливает границы применимости модели УСА и значительно повышает качество моделирования. В точке, соответствующей диапазону (0.3; 0.7], происходит преломление графиков: изменение характера зависимости количества авиалиний каждого класса и доли годового пассажиропотока, приходящейся на правильно моделируемые

авиалинии, от диапазона зоны «нечувствительности» модели. При дальнейшем расширении диапазона качество модели значительно ухудшается. На рисунках 3.22 – 3.25 эта зона выделена серым цветом. Результаты моделирования без учёта и с учётом зоны «нечувствительности», соответствующей диапазону $(0.3; 0.7]$, представлены в таблице 3.17. Учитывая долю пассажиропотока, приходящегося на авиалинии (рисунок 3.25), находящиеся вне зоны «нечувствительности», можно предположить, что сформированная модель УСА хорошо описывает структуру коммуникационного ядра сети внутрироссийских магистральных авиалиний.

«Коммуникационное ядро» сети развивается в соответствии с определёнными законами, демонстрируя устойчивое развитие. На авиалинии коммуникационного ядра приходится основная часть объёма авиаперевозок. Понятие универсальных (не зависящих явно от времени и конкретной пары городов) «условий существования» авиалинии корректно применительно как раз к авиалиниям, входящим в состав коммуникационного ядра сети.

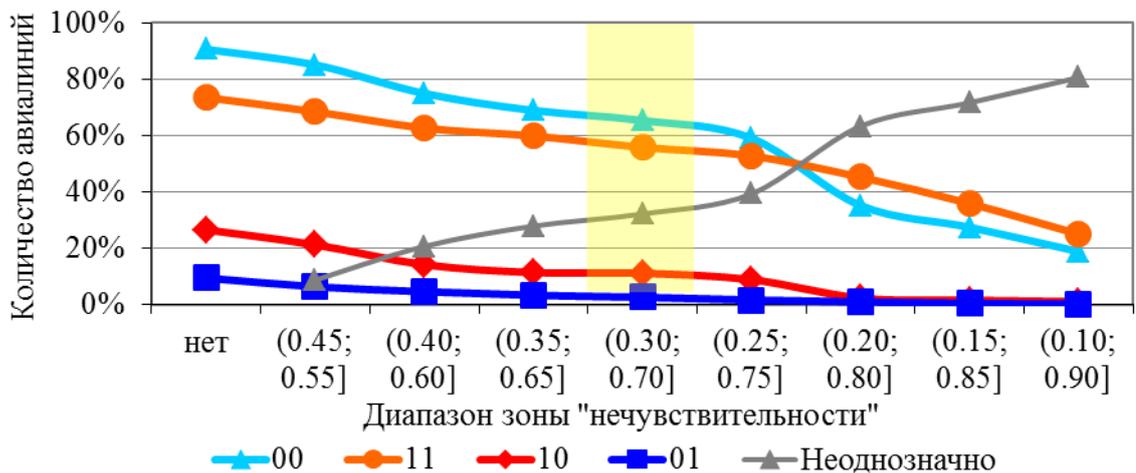


Рисунок 3.24 – Результаты моделирования для различных диапазонов значений зоны «нечувствительности»

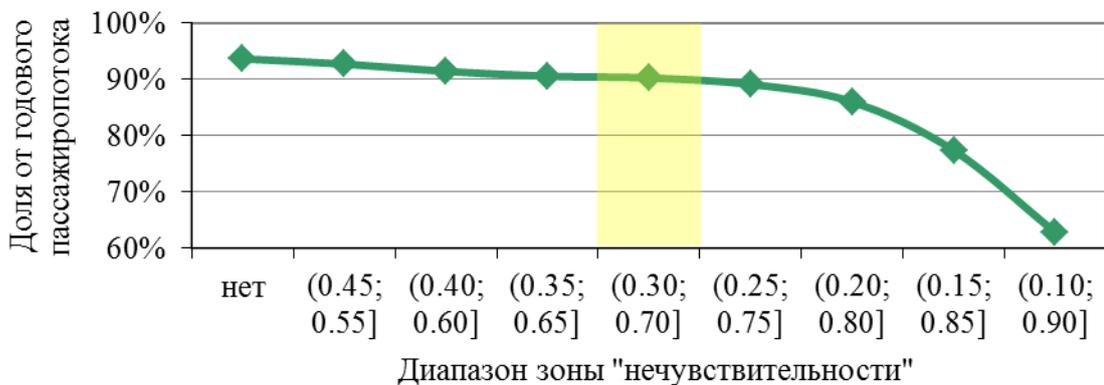


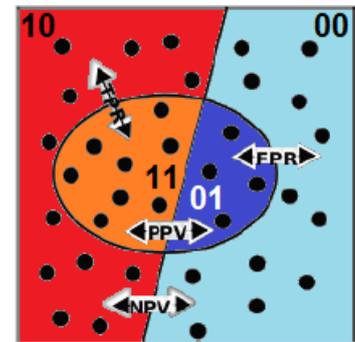
Рисунок 3.25 – Доля годового пассажиропотока, приходящаяся на правильно моделируемые авиалинии (класс 11), для различных диапазонов значений зоны «нечувствительности»

Таблица сопряженности (confusion matrix) модели УСА, рассчитанная на данных обучающей выборки (сбалансированной по числу существующих и несуществующих авиалиний) с учётом зоны «нечувствительности» модели в диапазоне значений (0.30; 0.70], представлена в таблице 3.18. Столбцы таблицы соответствуют реальному состоянию авиалинии («1» – авиалиния существует, «0» – авиалиния не существует), строки – состоянию авиалинии, моделируемому моделью («1» – авиалиния моделируется как существующая, «0» – авиалиния моделируется как несуществующая).

Таблица 3.18

Матрица неточностей (confusion matrix) модели УСА с учётом зоны «нечувствительности» в диапазоне значений (0.30; 0.70] (количество авиалиний)

		Авиалиния		
		«1»	«0»	
Авиалиния моделируется как	«1»	Истинно-существующая 161	Ложно-существующая 14	Прогностическая ценность «существования» (PPV) 92%
	«0»	Ложно-несуществующая 29	Истинно-несуществующая 157	Прогностическая ценность «несуществования» (NPV) 84%
		Чувствительность (TPR) 85%	Специфичность (1-FPR) 92%	Точность 88%



В ячейках таблицы обозначено количество авиалиний, которые: существуют и моделируются как существующие (истинно-существующие), не существуют и моделируются как несуществующие (истинно-несуществующие), существуют, но моделируются как несуществующие (ложно-несуществующие), не существуют, но моделируются как существующие (ложно-существующие). Также в таблице приведены показатели *точности* (accuracy, доля верно моделируемых авиалиний), *чувствительности* (sensitivity, доля истинно-существующих авиалиний) и *специфичности* (specificity, доля истинно-несуществующих

авиалиний) модели УСА. А также определены *прогностическая ценность* моделирования «существования» авиалинии (precision или positive predictive value) и *прогностическая ценность* моделирования «несуществования» авиалинии (negative predictive value) [63, 64].

Модель УСА как бинарный классификатор обладает 88% точностью, она практически одинаково хорошо выявляет как существующие (85%), так и несуществующие авиалинии (92%). При этом модель обладает высокой прогностической ценностью (не создаёт большого количества ложно-существующих и ложно несуществующих авиалиний): авиалинии, моделируемые как «существующие», реально существуют в 92% случаев; авиалинии, моделируемые как «несуществующие», реально не существуют в 84% случаев.

На рисунке 3.26 приведена ROC-кривая [64, 65] иллюстрирующая качество работы модели УСА. Кривая построена по данным тестовой и проверочной выборок с учётом зоны «нечувствительности» модели в диапазоне значений (0.30; 0.70]. ROC-кривая показывает зависимость количества истинно-существующих авиалиний от количества ложно-существующих авиалиний при варьировании порога отсечения (cut-off value). Чем больше площадь под ROC-кривой, тем большей предсказательной способностью обладает модель. Для модели УСА площадь под кривой составляет 0,84. Это свидетельствует о хорошем качестве моделирования, высокой предсказательной способности модели [63].

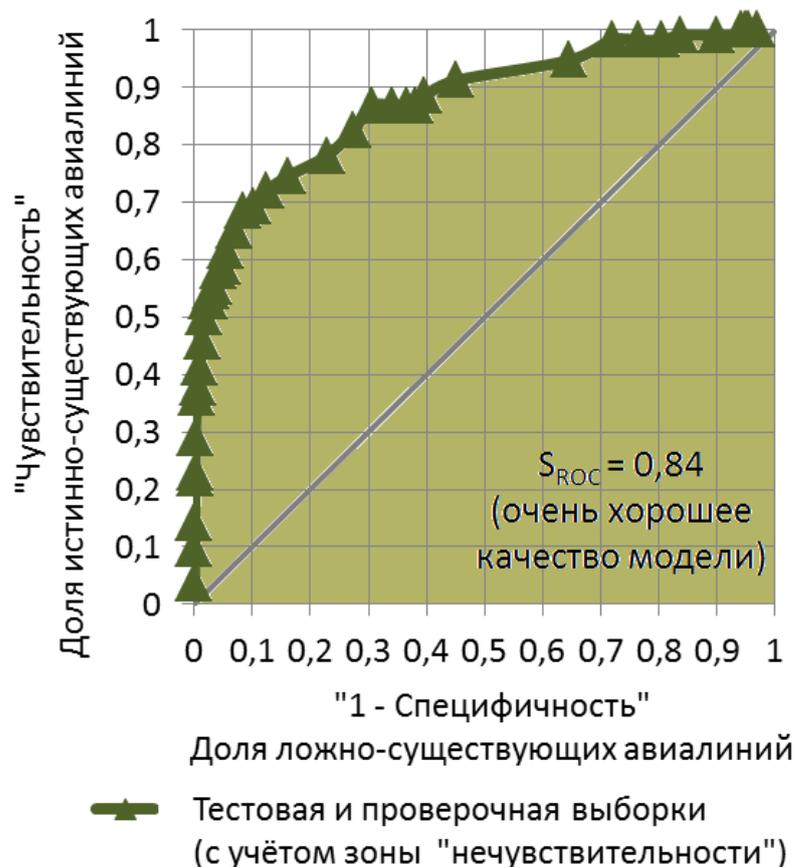


Рисунок 3.26 – ROC-кривая модели УСА

Модельная OD-матрица авиалиний 2006 г. с учётом зоны «нечувствительности» модели в диапазоне значений (0.30; 0.70] представлена на рисунке 3.27.

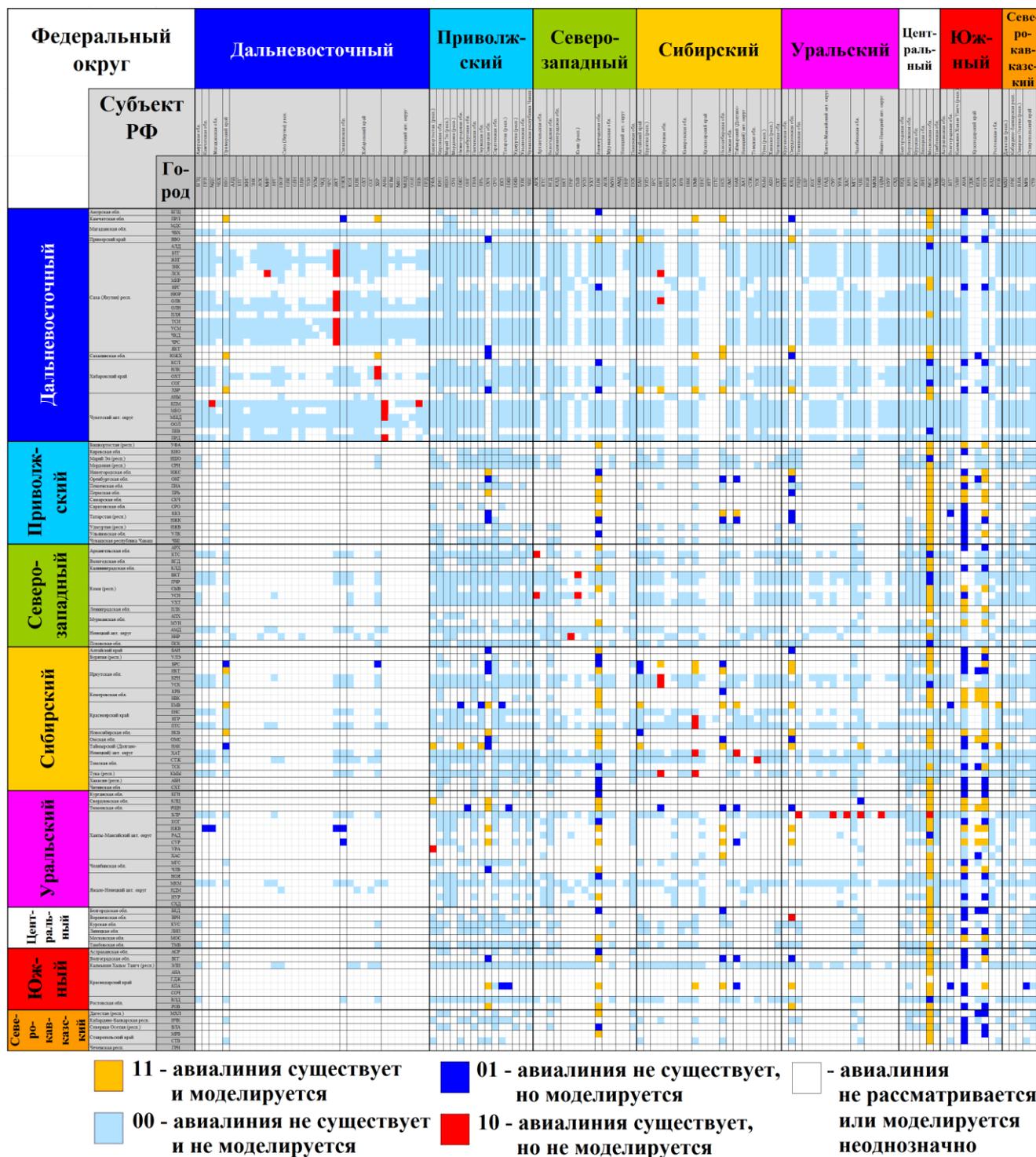


Рисунок 3.27 – Модельная OD-матрица

(с учётом зоны «нечувствительности» в диапазоне значений (0.30; 0.70])

Распределение по классам однозначно моделируемых авиалиний, агрегированных по федеральным округам РФ, представлено на рисунке 3.28. Авиалинии, относящиеся к классу 10 (красный цвет маркера), располагаются главным образом внутри субъектов Федерации

(по диагонали матрицы) (рисунки 3.27 и 3.28) и являются местными авиалиниями. Авиалинии, относящиеся к классу 01 (синий цвет маркера), можно отнести к перспективным авиалиниям, которые могут появиться в ближайшее к рассматриваемому году время. В частности, часть этих авиалиний (34 из 168) появилась в расписании 2010 г.

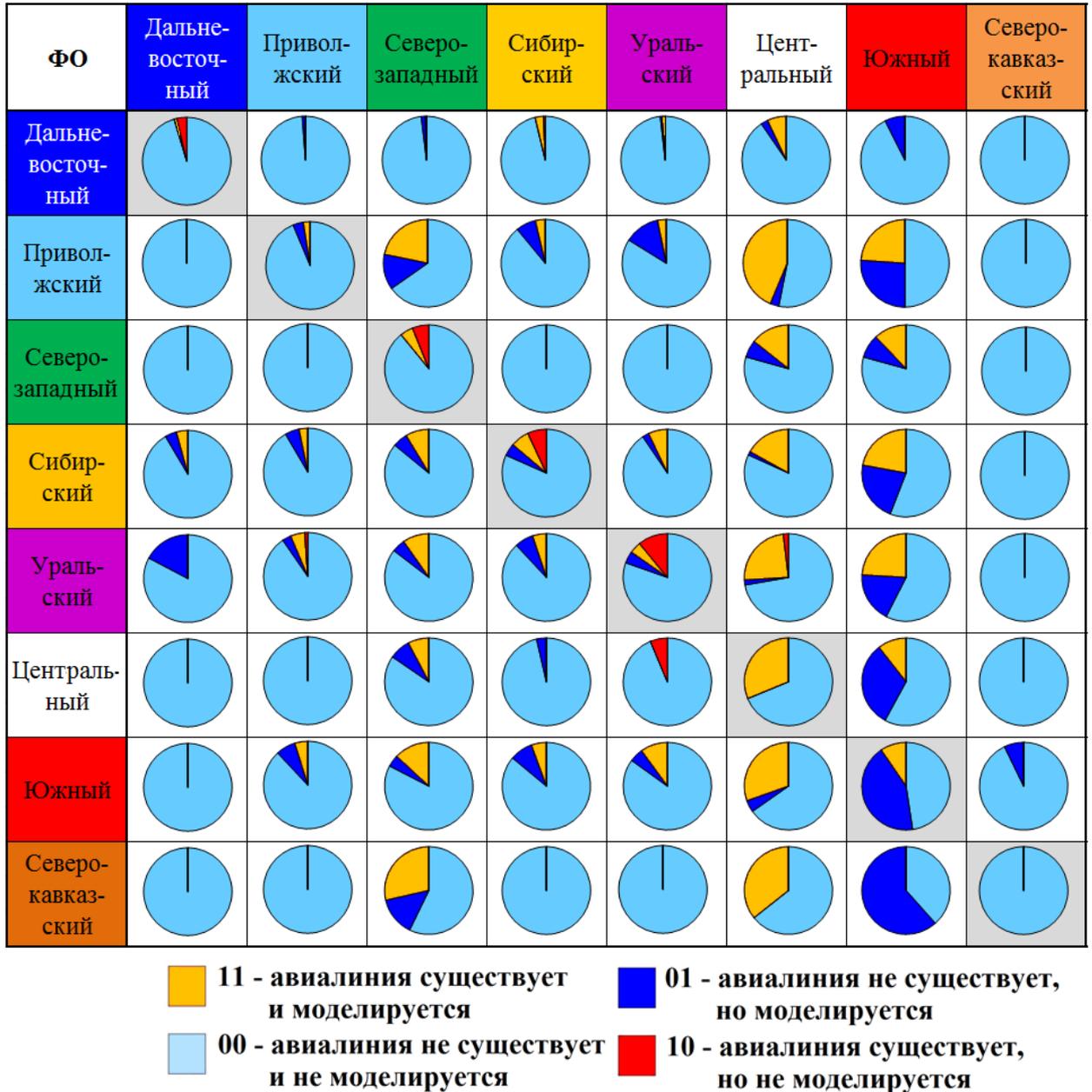


Рисунок 3.28 – Однозначно моделируемые авиалинии, агрегированные по федеральным округам РФ (с учётом зоны «нечувствительности» в диапазоне значений (0.30; 0.70])

Таким образом, введение зоны «нечувствительности» для выходной переменной в диапазоне значений (0.30; 0.70] позволило повысить количественные показатели качества модели УСА. Модель адекватно отражает структуру *коммуникационного ядра* сети внутрироссийских магистральных авиалиний, на которых выполняется более 90% годового пассажиропотока.

Определено, что в рассматриваемой сети внутрироссийских магистральных авиалиний существование авиалинии определяется главным образом целевым потенциалом одного из городов в паре, поскольку города в паре, как правило, сильно отличаются друг от друга с точки зрения генерации пассажиропотока. На этом основании определён состав входных переменных модели УСА: это 6 переменных, характеризующих возможности транспортной инфраструктуры пары городов, целевой потенциал главного города и генерационные возможности другого (с более низким целевым потенциалом) города в паре.

В рамках системы нечёткого вывода сформирована модель УСА. Основу системы составляют 6 нечётких правил. Дана содержательная интерпретация предпосылок нечётких правил. Определена система из 6 лингвистических значений, описывающих результат нечёткого вывода. Построенная модель УСА обладает высокой точностью и очень хорошим качеством, модель предназначена для долгосрочного прогнозирования развития не всей сети, а только её коммуникационного ядра. Нейронная сеть модели УСА может быть усовершенствована: дообучена на дополнительных данных, например, на данных пар городов, для которых авиалинии существуют в другие годы (а не только в рассматриваемом 2006 г.).

ГЛАВА 4. ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ СЕТИ ВНУТРИРОССИЙСКИХ МАГИСТРАЛЬНЫХ АВИАЛИНИЙ

Прогноз развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний опирается на прогнозы более высокого уровня – макроэкономические, социально-экономические, демографические прогнозы, параметры которых содержатся в следующих документах государственного стратегического планирования:

1. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 17 ноября 2008 г. № 1662-р) [66].
2. Концепция демографической политики Российской Федерации на период до 2025 года (утв. указом Президента РФ от 9 октября 2007 г. № 1351) [67].
3. Федеральная целевая программа «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации (2011 – 2018 годы)» (утв. постановлением Правительства РФ от 2 августа 2011 г. № 644-п) [68].
4. Федеральная целевая программа «Развитие транспортной системы России (2010 – 2015 годы)» (утв. распоряжением Правительства РФ от 20 мая 2008 года № 377-р) [69].
5. Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р) [70].
6. Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 22 ноября 2008 г. № 1734-р) [71].

В соответствии с Концепцией [66] рассматриваются три основных сценария долгосрочного социально-экономического развития страны: инерционный, энерго-сырьевой и инновационный. Они представляют собой описания различных стратегий Правительства РФ, целевых результатов, которые могут быть достигнуты, и рисков, с которыми Правительство может столкнуться при выборе той или иной стратегии. Рассматриваемые сценарии различаются степенью реализации ряда ключевых факторов, в том числе – степенью развития и реализации сравнительных преимуществ российской экономики и модернизацией транспортной и энергетической инфраструктуры [72]. Несмотря на то, что сценарии содержат самые общие представления о развитии экономики и социальной сферы регионов, на их основе министерствами и ведомствами разрабатываются федеральные целевые программы, которые содержат более детальную информацию [67 – 70] о развитии регионов и отраслей экономики. На основе данных, содержащихся в указанных выше документах государственного

стратегического планирования, может быть сформирован прогноз развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 году.

В процессе разработки прогноза развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний для каждого сценария долгосрочного социально-экономического развития страны:

- определены прогнозные значения входных переменных модели УСА;
- с использованием модели УСА сформирован вариант развития коммуникационного ядра сети внутрироссийских магистральных авиалиний.

В заключении главы проведён анализ полученных вариантов развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний.

4.1 Формирование вариантов развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний

Метод прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний на основе нейросетевой модели «условий существования» авиалинии предполагает ряд последовательных действий (рисунок 4.1):

- анализ документов государственного стратегического планирования с целью выявления общих целевых ориентиров государства и оценки влияния реализации того или иного сценария социально-экономического развития страны на численность населения, уровень его доходов, развитие транспортной системы страны в целом и воздушного транспорта в частности;
- выявление общих целевых ориентиров государства;
- оценка влияния реализации каждого сценария на показатели социально-экономического развития страны;
- выявление возможных изменений в списках регионов и городов, участвующих в магистральных авиаперевозках;
- анализ изменений значений параметров городов и пар городов, участвующих в магистральных авиаперевозках;
- формирование массива векторов значений входных переменных модели УСА для всех пар городов, участвующих в магистральных авиаперевозках;
- построение прогнозной сети внутрироссийских магистральных авиалиний на основании заключений модели УСА о существовании прямого авиасообщения для каждой пары городов, участвующих в магистральных авиаперевозках.



Рисунок 4.1 – Последовательность действий при прогнозировании развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний

Анализ документов государственного стратегического планирования.

Рассматриваемые сценарии социально-экономического развития качественно отличаются друг от друга как по целям, так и способам их достижения. Реализация того или иного сценария в значительной степени зависит от внешних факторов, в частности развития мировой экономики. Инновационный сценарий соответствует умеренно-оптимистичному варианту прогноза и отвечает основным задачам Концепции [66]. Энерго-сырьевой сценарий соответствует консервативному варианту прогноза, инерционный – пессимистичному.

Инерционный сценарий характеризуется сохранением доминирования энерго-сырьевого комплекса в экономике при замедлении роста добычи и экспорта углеводородов и отставании в развитии транспортной и энергетической инфраструктуры. В его основе лежит консервация экспортно-сырьевой модели развития при сужении её потенциала в связи с замедлением роста экспорта углеводородов, открытием внутренних рынков страны для товаров зарубежного производства, снижением ценовой конкурентоспособности перерабатывающих производств.

Энерго-сырьевой сценарий характеризуется умеренными долгосрочными темпами роста экономики. В его основе лежит наиболее полное использование конкурентных преимуществ России в энергетическом секторе, устойчивое наращивание экспорта сырья и увеличение глубины его переработки, реализация крупномасштабных инвестиционных проектов в этой сфере, модернизация транспортной системы при сохранении относительного отставания в гражданских высокотехнологичных секторах.

Инновационный сценарий характеризуется усилением инвестиционной направленности экономического роста. Он опирается на создание современной транспортной инфраструктуры и конкурентоспособного сектора высокотехнологичных производств наряду с модернизацией энерго-сырьевого комплекса. Сценарий предполагает превращение инновационных факторов в ведущий источник экономического роста и, как следствие, улучшение социальных параметров развития. В начале периода прогнозирования инновационный сценарий подразумевает ухудшение социальных параметров развития, поскольку в отличие от энерго-сырьевого сценария предполагается тратить бюджетные средства не на социальное развитие, а на инновации. Улучшение параметров социального развития предполагается к концу периода прогнозирования за счёт ускорения отдачи экономики от инноваций.

Энерго-сырьевой сценарий отражает доминирующие в настоящее время интересы в российской экономике и характеризуется более высокой вероятностью реализации, чем инновационный сценарий. Инновационный сценарий предполагает значительно более сложную модель управления. Он связан с инвестированием в высокотехнологичные проекты с параметрами, далеко выходящими за сложившиеся на рынке среднесрочные пределы окупаемости. Инновационный сценарий обеспечивает значительное продвижение к целевым параметрам и качественным приоритетам, обозначенным в Концепции [66]. Основное преимущество инновационного сценария – положительная динамика экономического роста и доходов населения по сравнению с энерго-сырьевым сценарием – проявится после 2015-2018 годов. Инновационный сценарий отличается повышенной устойчивостью к возможному падению мировых цен на нефть и сырьевые товары, а также к усилению глобальных торговых и финансовых дисбалансов. Инновационный сценарий предполагает сокращение различий в развитии регионов, формирование новых центров инновационного развития, в том числе в Поволжье, на Урале и в Сибири. Инновационный сценарий представляется более рискованным, но, в конечном счёте, и более выигрышным. Следование энерго-сырьевому сценарию может привести к *увеличению регионального неравенства* при формировании новых энерго-сырьевых кластеров на Урале, в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке [72].

Для каждого из сценариев в таблице 4.1 приведены данные о прогнозируемых изменениях значений ряда параметров социально-экономического развития страны к 2020 г.,

полученные из анализа документов [66 – 68]. Наличие пустых ячеек (н/д) объясняется отсутствием соответствующей информации.

Таблица 4.1

Данные о прогнозируемых изменениях значений ряда параметров социально-экономического развития страны к 2018-2020 гг. по сравнению с 2006-2010 гг.

Сценарий социально-экономического развития	ВВП 2020 г. по сравнению с ВВП 2006 г.	Численность населения в 2020 г. по сравнению с 2010 г.	Число мест коллективного размещения в 2018 г. по сравнению с 2010 г.
Инерционный	н/д	Уменьшится до 137,0 млн.чел.	н/д
Энерго-сырьевой	н/д	Увеличится до 145,3 млн.чел.	Увеличится на 48 %
Инновационный	Увеличится в 2.44 раза	Не изменится (141,9 млн.чел.)	н/д

Расширение списка городов и состава федеральных округов. При добавлении нового города в список городов, участвующих в магистральных авиационных перевозках, необходимо выделение для этого города прилегающей территории. Удаление города из списка, влечёт за собой присоединение его территории к другим городам. И в том, и в другом случае требуется пересмотр принятых в работе для каждого Субъекта Федерации допущений о распределении прилегающих территорий между городами, и, следовательно, изменение значений параметра «численность населения» для этих городов (см. п.2.2 (а)). Кроме того, в тех Субъектах Федерации, где в результате расширения или сокращения списка городов, участвующих в магистральных авиационных перевозках, изменяется их количество, также требуется пересмотр принятых в работе допущений о распределении между городами значений таких параметров как валовый региональный продукт (см. п.2.2 (в)) и число мест коллективного размещения (см. п.2.2 (г)), известных, как правило, для Субъекта Федерации в целом.

При разработке прогноза в рассмотрение были введены два города: Грозный (ГРН) и Геленджик (ГДЖ), отсутствующие в списке городов, участвующих в магистральных авиационных перевозках в 2006 г. Аэропорт в г. Грозный был вновь введён в эксплуатацию в 2007 г., а аэропорт в г. Геленджик – в 2010 г. В связи с этим необходимо по новому распределить население Краснодарского края между г. Геленджик, г. Анапа (АНА) и г. Краснодар (КПА), а также ограничить численность населения г. Махачкала (МХЛ)

численностью населения Республики Дагестан. Численность населения г. Грозный соответствует численности населения Чеченской Республики (см. Приложение В п.В.3). Также для Краснодарского края перераспределяется *число мест коллективного размещения* и *ВРП'*, т.к. в этом регионе появляется аэропорт в г. Геленджик (см. Приложение Б).

Изменение состава федеральных округов или состава Субъектов Федерации является значительно более редким явлением, чем изменение списка городов, участвующих в магистральных авиационных перевозках. Такие изменения требуют корректировки параметра *статус города* для столиц новых или прекративших своё существование федеральных округов, а также Субъектов Федерации. В связи с выделением в 2010 г. из состава Южного ФО Северо-Кавказского ФО изменяется статус (с 3 на 2) г. Минеральные Воды (МРВ), находящегося в 23 км от административного центра Северо-Кавказского ФО (г. Пятигорск) (см. Приложение Б).

Анализ изменений значений параметров городов и пар городов к 2020 году. Среди рассматриваемых параметров городов и пар городов имеются как дискретные параметры (*Статус города*, *Потенциал авиасвязи* (определяемый через *Потенциалы аэропортов*), *Наличие ж.-д. сообщения* (определяемое через *Наличие ж.-д. станций*)), так и непрерывные (*ВРП'*, *Численности населения*, *Число мест коллективного размещения*). Для каждого сценария развития страны на основании анализа документов государственного стратегического планирования [66 – 71] и данных государственной статистики [73 – 76] определяются прогнозные значения рассматриваемых параметров на год прогнозирования. Для дискретных параметров определяются конкретные вектора изменений их значений по событиям, запланированным в этих документах. Для непрерывных параметров возможно дифференцированное задание изменений значений (по регионам) при наличии соответствующих исходных данных. Если такая информация недоступна, по целевым ориентирам сценариев развития определяются коэффициенты изменения непрерывных параметров к году прогноза относительно данных года, для которого информация о региональном распределении значений непрерывных параметров имеется. В случае отсутствия точных указаний об изменении того или иного параметра для какого-то сценария, коэффициент изменения этого параметра для данного сценария определяется экспертным путём на основании имеющейся информации по этому параметру для других сценариев и трактовки различий между рассматриваемыми сценариями.

Поскольку формирование прогноза развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний осуществляется с целью демонстрации возможностей построенной модели УСА, дифференцирование изменений непрерывных параметров по регионам не проводится. Для получения прогнозных значений непрерывных параметров к 2020 г. по каждому сценарию

определяются коэффициенты пересчёта, применяемые равномерно по всем Субъектам РФ к использованным при построении модели УСА значениям этих параметров (соответствующим 2006 г.). В качестве целевых ориентиров для непрерывных параметров используются данные, указанные в таблице 4.1.

Рассмотрим более детально процесс определения коэффициентов пересчёта непрерывных параметров городов (таблица 4.2) и прогнозных значений дискретных параметров городов и, следовательно, пар городов (таблица 4.3) для рассматриваемых сценариев социально-экономического развития страны.

Таблица 4.2

Коэффициенты пересчёта непрерывных параметров городов к 2020 г. по сравнению с данными «базового» 2006 года

Сценарий социально-экономического развития	Коэффициент пересчёта параметра		
	ВРП'	Численность населения	Число мест коллективного размещения (относительно 2003 г.)
Инерционный	1.60	0.963	1.332
Энерго-сырьевой	2.00	1.022	1.665
Инновационный	2.44	0.998	1.443

ВРП'. Прогнозные значения ВВП на 2020 г. по трём сценариям развития определяются исходя из Концепции [66]. Согласно [66]: «Инновационное развитие российской экономики в 2008 – 2020 годах будет проходить в 2 этапа, различающиеся по условиям, факторам и рискам социально-экономического развития и приоритетам экономической политики государства». На первом этапе будут достигнуты следующие целевые макроэкономические индикаторы (2012 год к 2007 году): «рост валового внутреннего продукта – 137÷138 процентов». На втором этапе будут достигнуты следующие целевые макроэкономические индикаторы (2020 год к 2012 году): «рост валового внутреннего продукта – 164÷166 процентов». Согласно данным Федеральной службы государственной статистики [73] реальный объём ВВП в 2007 г. увеличился на 8,1% по сравнению с 2006 г. При указанных темпах рост ВВП (2020 год к 2006 году) составит 244,36% ($1,081 \cdot 1,37 \cdot 1,65 = 2,4436$), т.е. ВВП увеличится в 2,44 раза к 2020 году по сравнению с 2006 годом (таблица 4.1).

В работе принято, что объём ВВП к 2020 г. по сравнению с 2006 г. увеличится в 1.60 раз по инерционному сценарию, в 2.00 раза по энерго-сырьевому сценарию, в 2.44 раза по инновационному сценарию. Указанные коэффициенты используются при расчёте прогнозных значений *ВРП'* к 2020 г. (таблица 4.2).

Численность населения. Прогноз численности населения на 2020 г. для трёх сценариев развития основан на данных Демографического ежегодника России [74] и Концепции демографической политики РФ на период до 2025 года [67]. Согласно [67] «Целями демографической политики РФ на период до 2025 года являются стабилизация численности населения к 2015 году на уровне 142-143 млн. человек и создание условий для её роста к 2025 году до 145 млн. человек». Согласно данным демографического прогноза численности населения России на 2020 г. для трёх вариантов демографического прогноза [74, сс. 499-500] численность населения России в 2020 г. составит: 137,0 млн. чел. для «низкого» варианта прогноза (соответствует инерционному сценарию); 145,3 млн. чел. для «высокого» варианта прогноза (соответствует энерго-сырьевому сценарию); 141,9 млн. чел. для «среднего» варианта прогноза (соответствует инновационному сценарию) (таблица 4.1).

В 2006 г. численность населения России составляла 142,2 млн. человек, таким образом, к 2020 г. по сравнению с 2006 г. численность населения России изменится в 0.963 раз по инерционному сценарию, в 1.022 раз по энерго-сырьевому сценарию, в 0.998 раз по инновационному сценарию. Указанные коэффициенты используются при расчёте прогнозных значений *Численности населения* к 2020 г. (таблица 4.2).

Число мест коллективного размещения. Для инерционного сценария развития принимается, что число мест коллективного размещения изменится таким же образом, как оно менялось за период с 2002 по 2010 гг. (имеются данные только для этих лет). С 2002 по 2010 гг. число мест коллективного размещения увеличилось в среднем на 2% за год [75, 76]. Исходя из этого, предполагается, что для *инерционного сценария* развития с 2010 по 2020 гг. число мест коллективного размещения увеличится на 20%. Для энерго-сырьевого сценария развития согласно [68] прогнозное значение числа мест коллективного размещения к 2018 г. по сравнению с 2010 г. увеличится на 48% (таблица 4.1). Исходя из этого, предполагается, что для *энерго-сырьевого сценария* развития с 2010 по 2020 гг. число мест коллективного размещения увеличится на 50%. Инновационный сценарий предполагает, что часть средств Федерального бюджета направляется на развитие науки, промышленности и технологий; в течение 2010-2020 гг. эффект этих вложений только начнёт проявляться. Поэтому в работе предполагается, что для *инновационного сценария* развития число мест коллективного размещения с 2010 по 2020 гг. увеличится на 30%.

При создании модели в качестве значений числа мест коллективного размещения в базовом 2006 году использованы данные за 2003 г. (в момент сбора данных данные за 2006 г. были недоступны). С 2003 по 2010 гг. согласно [75, 76] число мест коллективного размещения увеличилось в 1.11 раз. Тогда число мест коллективного размещения к 2020 г. по сравнению с 2003 г. увеличится в 1.332 раз по инерционному сценарию, в 1.665 раз по энерго-сырьевому

сценарию, в 1.443 раз по инновационному сценарию. Указанные коэффициенты используются при расчёте прогнозных значений *Числа мест коллективного размещения* к 2020 г. (таблица 4.2).

Таблица 4.3

Изменение значений дискретных параметров городов к 2020 г. по сравнению с данными «базового» 2006 года

Сценарий социально-экономического развития	Изменение значений параметра		
	Статус города	Потенциал аэропорта (определяет «Потенциал авиасвязи»)	Наличие ж.-д. станции (определяет «Наличие ж.-д. сообщения»)
Инерционный	Анапа: с «2» на «3»	Без изменений	Без изменений
Энерго-сырьевой	Анапа: с «2» на «3» Хабаровск: с «3» на «2»	Уменьшение значения (т.е. увеличение потенциала аэропорта)	Появится ж.-д. в городах: Якутск, Кызыл, Надым и Салехард
Инновационный	Анапа: с «2» на «3»	на 1 для городов: Воронеж, Элиста, Пенза и Николаевск-на-Амуре	

Статус города. Изменение *Статуса городов* к 2020 г. по сравнению с 2010 г. (во всех трёх сценариях) определяется экспертным путём. Во всех трёх сценариях расширяется количество городов за счёт появления аэропортов Геленджик (ГДЖ) и Грозный (ГРН) с одинаковым статусом города равным 3. Также во всех трёх сценариях статус города Анапа понижается с 2 до 3. Это связано с появлением аэропорта в г. Геленджик, который находится недалеко от г. Анапа, и перераспределением пассажиропотока между ними. Кроме того, в энерго-сырьевой сценарии предполагается повышение статуса г. Хабаровск с 3 до 2 (таблица 4.3).

Потенциал авиасвязи (Потенциал аэропорта). Как было определено в п.2.2 параметр «потенциал авиасвязи» определяется по результатам сравнения значений «потенциал аэропорта» пары городов. Изменение *Потенциала аэропортов* в 2020 г. по сравнению с 2010 г. определяется на основании анализа федеральной целевой программы «Развитие транспортной системы России (2010-2015 годы)» [69]. При анализе программы оцениваются запланированные программы развития и модернизации аэропортов и объём средств, выделяемых на них. В результате анализа определено, что во всех трёх сценариях аэропорты Геленджик и Грозный будут иметь одинаковый потенциал равный 3. В энерго-сырьевой и инновационном сценариях потенциал аэропортов Воронеж, Элиста, Пенза и Николаевск-на-Амуре увеличится на 1

(т.е. значение потенциала аэропорта уменьшится на 1) (таблица 4.3). Соответственно значение параметра *Потенциал авиасвязи* изменится для тех пар городов, в которых имеются города с изменившимся «потенциалом аэропорта».

Наличие ж.-д. сообщения (Наличие ж.-д. станции). Как было определено в п.2.2 параметр «наличие ж.-д. сообщения» определяется по результатам сравнения параметров «наличие ж.-д. станции» в обоих городах пары. Изменение параметра «наличие ж.-д. станции» определяется в соответствии со Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года [70]. В [71] представлена карта развития транспортной инфраструктуры России в 2010-2030 гг. Во всех трёх сценариях г. Геленджик не имеет ж.-д. станции, а г. Грозный имеет ж.-д. станцию. Предполагается, что в инерционном сценарии список городов, имеющих ж.-д. станцию, не изменится. В энерго-сырьевом и инновационном сценариях развития предполагается появление ж.-д. станции в городах Якутск, Кызыл, Надым и Салехард (рисунок 4.2, таблица 4.3). Соответственно значение параметра *Наличие ж.-д. сообщения* изменится для тех пар городов, в которых имеются города с изменившимся значением параметра «наличие ж.-д. станции».

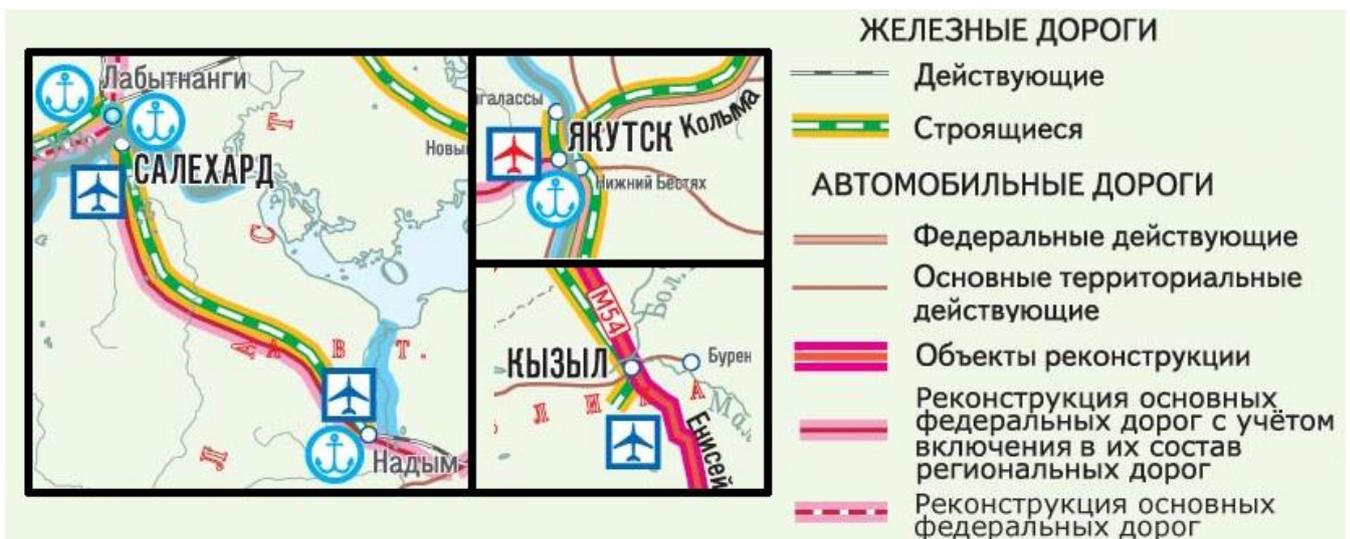


Рисунок 4.2 – Фрагменты карты «Транспортная инфраструктура России 2010-2030 гг.» для городов Якутск, Кызыл, Надым и Салехард

На основе проведённого анализа сформированы массивы прогнозных значений параметров городов и пар городов для каждого из трёх сценариев социально-экономического развития страны. Значения непрерывных параметров формируются пересчётом на 2020 год соответствующего массива статистических данных для 2006 года (использованного для построения модели УСА с учётом изменений, связанных с расширением списка городов) по коэффициентам пересчёта (таблица 4.2) равномерно по всем Субъектам РФ. Значения

дискретных параметров формируются путём внесения конкретных изменений, указанных в таблице 4.3, в параметры городов для 2006 года.

Формирование векторов значений входных переменных модели УСА для всех пар городов. В каждой паре городов определяется *главный* город – город с более высоким «целевым потенциалом». Для подавляющего большинства пар городов в 2020 г. главным городом сохраняется тот же город, что и в 2006 г. Из рассмотрения исключаются те же пары городов, что и при формировании обучающих данных модели УСА (см. п.2.1).

На основе значений параметров городов и пар городов (2 параметра, характеризующих возможности транспортной инфраструктуры пары городов, 2 параметра, характеризующих генерационные возможные неглавного города, и 2 параметра, характеризующих целевой потенциал главного города) для каждой пары городов формируются векторы входных переменных, соответствующие одному направлению – в сторону главного города в паре. В связи с расширением списка городов по сравнению с 2006 г., количество векторов значений входных переменных для 2020 г. увеличивается на 246. Суммарное количество пар городов, для которых проводится оценка возможности существования между ними прямого воздушного сообщения в 2020 г., составляет 7209 пар городов.

Для ряда векторов значения некоторых переменных выходят за границы диапазона возможных значений, определённого для этих переменных в модели УСА. В случае, когда прогнозное значение переменной выходит за верхнюю/нижнюю границу диапазона возможных значений, данное значение заменяется значением, соответствующим верхней/нижней границе диапазона. Значения входных переменных нормируются. В перспективе диапазоны возможных значений входных переменных могут быть расширены при дообучении модели УСА на более современных статистических данных.

Массивы векторов входных нормированных переменных сформированы для каждого сценария социально-экономического развития страны.

Построение прогнозной сети внутрироссийских магистральных авиалиний. Для каждого сценария социально-экономического развития страны формируется одноимённый вариант развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 г. Построение сети происходит в процессе последовательного перебора векторов входных нормированных переменных и подачи их на вход модели УСА. Модель УСА, как система нечёткого вывода, для каждого вектора по соответствующим значениям входных переменных формирует значение выходной переменной. Значение выходной переменной интерпретируется следующим образом. Если значение выходной переменной > 0.7 , то делается вывод, что для данной пары городов авиалиния «будет существовать», если значение «выходной» переменной ≤ 0.3 , то делается

вывод, что для данной пары городов авиалиния «не будет существовать», в остальных случаях делается вывод о том, что для данной пары городов авиалиния «прогнозируется неоднозначно». Построенные варианты прогнозных сетей отображаются в виде прогнозных **OD**-матриц.

Проверка метода на данных 2010 г. Метод, применённый для прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 г., был аналогично применён для прогнозирования развития этой сети к 2010 г. Информация об изменениях значений входных переменных для 2010 г. относительно значений 2006 г. получена на основании анализа данных государственной статистики. С помощью модели УСА для 2010 г. сформирована сеть внутрироссийских магистральных авиалиний. Сравнение с реальной сетью 2010 г. показало, что 32% пар городов моделируется неоднозначно; среди однозначно моделируемых пар городов (рисунок 4.3): моделью УСА верно моделируется 97% несуществующих и 76% существующих в 2010 г. авиалиний, остальные (24%) существующие в 2010 г. авиалинии моделируемые как отсутствующие (класс 10), располагаются главным образом внутри субъектов Федерации и являются местными авиалиниями. Следовательно, проверка метода, применяемого для прогнозирования развития сети к 2020 г., на аналогичных данных для 2010 г. показала, что этот метод позволяет адекватно моделировать коммуникационное ядро сети 2010 г.

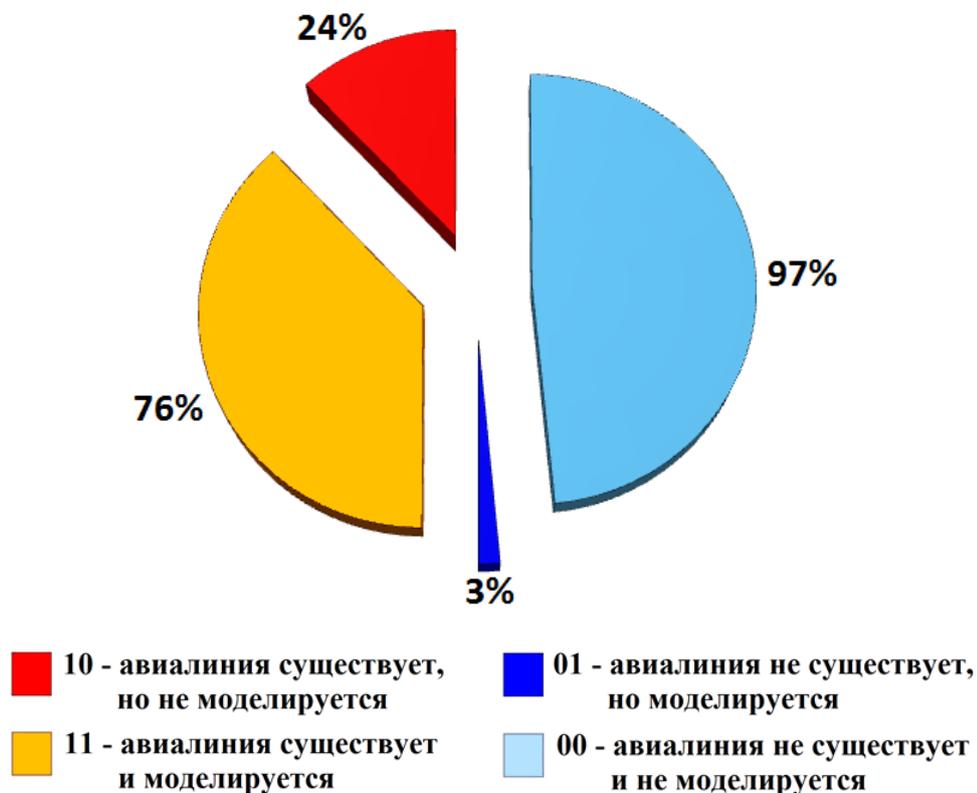


Рисунок 4.3 – Анализ однозначно моделируемых пар городов сети 2010 г.

Таким образом, в соответствии с предложенным методом прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний на основе анализа данных документов государственного стратегического планирования определены прогнозные значения параметров городов и пар городов для трёх сценариев социально-экономического развития страны. Сформированы три варианта развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 г.

4.2 Анализ результатов прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний

Сводные данные о числе авиалиний, которые «будут существовать», «не будут существовать» и «прогнозируются неоднозначно», для трёх вариантов сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 г. представлены в таблице 4.4 и на рисунке 4.4.

Таблица 4.4

Результаты моделирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 г. (количество авиалиний)

Вариант сети	Авиалиния «будет существовать»	Авиалиния «не будет существовать»	Авиалиния «прогнозируется неоднозначно»
Инерционный	509	4533	2167
Энерго-сырьевой	609	4435	2165
Инновационный	784	4302	2123

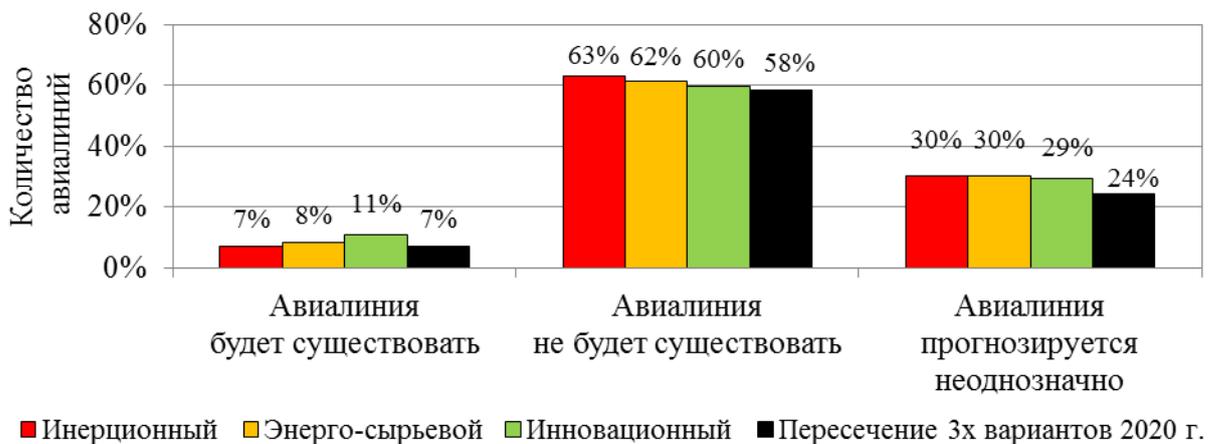


Рисунок 4.4 – Сравнение вариантов развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 г.

Прогнозная сеть 2020 г. содержит 509 (7% от суммарного количества рассмотренных пар городов) авиалиний при инерционном, 609 (8%) авиалиний при энерго-сырьевом и 784 (11%) авиалиний при инновационном вариантах развития сети. Для всех трёх рассмотренных сценариев социально-экономического развития страны прогнозируется расширение сети внутрироссийских магистральных авиалиний (по сравнению с 2006 г.): на 30% для инерционного, на 56% для энерго-сырьевого и на 100% для инновационного сценариев. При этом 494 одни и те же авиалинии (7% от суммарного количества рассмотренных пар городов) будут существовать во всех трёх вариантах развития сети к 2020 г.

Количество неоднозначно прогнозируемых авиалиний практически не зависит от варианта развития сети и составляет около 30% от суммарного количества рассмотренных пар городов. При этом 24% одних и тех же авиалиний неоднозначно прогнозируются в каждом из вариантов развития сети, и только 6% неоднозначно прогнозируемых авиалиний меняются от варианта к варианту.

На рисунке 4.5 приведено распределение количества прогнозируемых (которые «будут существовать») авиалиний для трёх вариантов развития сети по дальности авиалинии в сравнении с количеством авиалиний моделируемых для 2006 г. Во всех трёх вариантах прогнозируется заметное увеличение количества авиалиний дальностью до 4000 км. Количество прогнозируемых авиалиний дальностью более 4000 км в каждом варианте составляет около 13 % от общего числа прогнозируемых авиалиний. Около 75% (общего числа) прогнозных авиалиний во всех трёх вариантах имеют дальность до 3000 км.

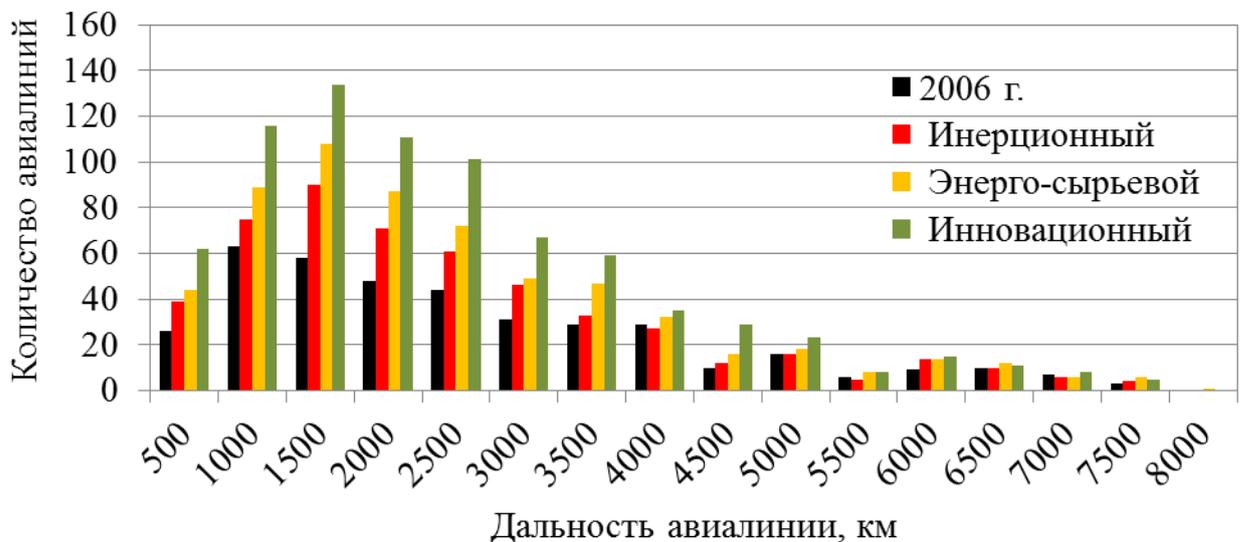


Рисунок 4.5 – Распределение количества прогнозируемых авиалиний по дальности

OD-матрицы авиалиний прогнозируемых к 2020 г. для трёх вариантов развития сети приведены на рисунках 4.6 – 4.8. В этих прогнозных **OD**-матрицах: ячейки чёрного цвета

соответствуют парам городов, для которых авиалиния «будет существовать»; ячейки серого цвета соответствуют парам городов, для которых авиалиния «не будет существовать»; ячейки белого цвета соответствуют тем парам городов, которые либо не рассматриваются, либо авиалинии для них «прогнозируются неоднозначно». Анализ прогнозных **OD**-матриц показывает, что, несмотря на значительный прогнозируемый рост количества авиалиний в сети (таблица 4.4), в целом структура сети внутрироссийских магистральных авиалиний не претерпит существенных изменений. **OD**-матрицы имеют «линейчатую» структуру – авиалинии сосредоточены в небольшом количестве столбцов **OD**-матрицы. Это говорит о том, что варианты сети 2020 г. образованы на основе ярко выраженных концентраторов авиалиний – городов, являющихся крупными административными (такие города как Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск и др.) или курортными центрами (такие города как Сочи и Анапа) и обладающих высоким целевым потенциалом.

По сравнению с сетью, моделируемой для 2006 г. (389 существующих авиалиний), 142 одни и те же новые авиалинии появятся во всех трёх вариантах сети 2020 г. Главным образом это авиалинии в направлении из Приволжского и из Уральского ФО, а также авиалинии в направлении Южного ФО. Сеть по количеству авиалиний вырастет в 1,3÷2 раза (рисунок 4.9): в инерционном варианте из 509 авиалиний 182 авиалинии – новые; в энерго-сырьевом из 609 авиалиний – 290 новых; в инновационном из 784 авиалиний – 460 новых.

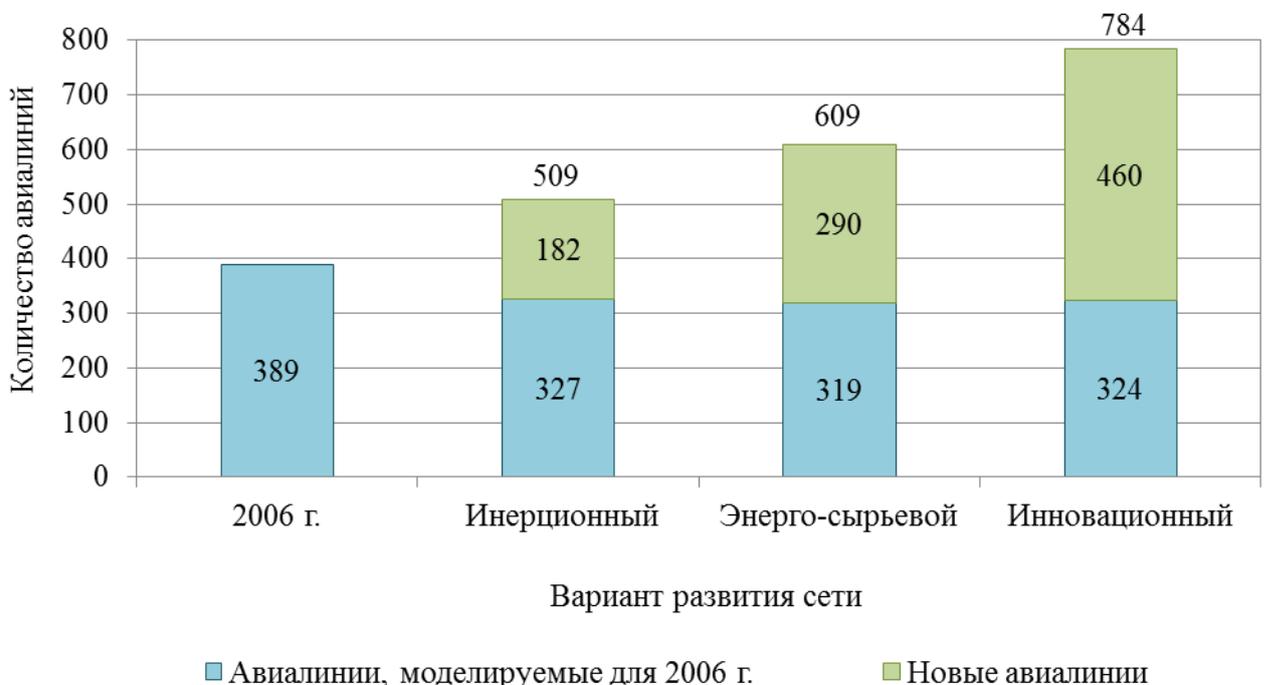


Рисунок 4.9 – Сравнение вариантов развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний по количеству авиалиний моделируемых как «существующие» с сетью, моделируемой для 2006 г.

Появление новых авиалиний соответствует механизмам предпочтительного присоединения и ассортативности. В сети по-прежнему будет доминировать ядро сильносвязанных концентраторов авиалиний с высоким целевым потенциалом (им соответствуют столбцы **OD**-матрицы). Однако помимо них в прогнозных сетях появляются концентраторы другого типа. Это города (например, Сургут, Нижневартовск), генерационные возможности которых могут значительно вырасти при сравнительно невысоких уровнях целевого потенциала. Этому типу концентраторов авиалиний соответствуют строки **OD**-матрицы. В наибольшей степени наличие таких концентраторов характерно для инновационного варианта развития сети (рисунок 4.8).

* * *

Предложен метод прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний. В основе метода лежит модель «условий существования» авиалинии. Вариант сети авиалиний формируется на основании заключений модели УСА о существовании прямого авиасообщения для каждой пары городов, участвующих в магистральных авиаперевозках. Для каждого из трёх (инерционного, энерго-сырьевого и инновационного) сценариев социально-экономического развития страны построен вариант сети внутрироссийских магистральных авиалиний, который будет существовать в 2020 г. Каждый из вариантов предполагает расширение сети. Согласно прогнозу расширение будет происходить в основном за счёт увеличения концентрации новых авиалиний в городах с высоким уровнем целевого потенциала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых исследований и разработок можно сделать следующие выводы:

1. Методология долгосрочного прогнозирования авиаперевозок предполагает формирование прогнозных сценариев авиаперевозок с учётом изменений в структуре авиалиний – структуре прямого авиасообщения между городами. Предложен новый подход к решению задачи прогнозирования развития сети магистральных авиалиний, основанный на гипотезе о том, что существование прямого авиасообщения между городами определяется набором универсальных правил, не зависящих явно от времени и не привязанных к конкретной паре городов. Традиционные подходы, использующие трендовые, регрессионные или эмпирические методы, предполагают построение модели на основе заранее известных классов функций. Применение методов нечёткой логики и технологий нейросетевого программирования позволяет определить систему правил, основываясь только на статистических данных об измеряемых параметрах городов, пар городов и информации о наличии между ними прямого авиасообщения. [20, 23, 24, 27].

2. Анализ современного состояния и особенностей развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний позволил выявить этапы развития авиалиний. Показано, что авиалинии в сети находятся на разных этапах развития, и, следовательно, их присутствие в структуре авиатранспортной сети страны не может быть определено однозначно. Предложен способ формализации понятия «авиалиния существует», позволяющий учитывать стабильность существования авиалинии и темп её развития. Также показано, что сеть внутрироссийских магистральных авиалиний имеет безмасштабную природу. Процесс её развития подчиняется законам развития безмасштабных графов: для сети характерны механизмы предпочтительного присоединения и ассортативности при образовании новых связей. В процессе своего развития сеть будет оставаться безмасштабной. [19, 22, 26, 29, 31].

3. Разработана модель «условий существования» авиалинии (модель УСА) на базе имеющихся статистических данных о движении воздушных судов на внутрироссийских магистральных авиалиниях и данных о социально-экономическом развитии регионов страны. Как система нечёткого вывода модель состоит из 6 нечётких правил. Дана содержательная интерпретация предпосылок нечётких правил. Определена система из 6 лингвистических значений, описывающих результат нечёткого вывода. Для окончательного вывода о существовании прямого сообщения между городами необходимо использование всех правил модели. Как бинарный классификатор модель УСА одинаково хорошо выявляет как

существующие, так и несуществующие авиалинии (точность моделирования более 85%), не создаёт большого количества ложно-существующих и ложно-несуществующих авиалиний (прогностическая ценность около 90%). Модель УСА предназначена для долгосрочного прогнозирования развития коммуникационного ядра сети внутрироссийских магистральных авиалиний (авиалиний, на которые приходится основная часть объёма авиаперевозок). [18, 20 – 22, 25, 29, 32].

4. Разработан метод долгосрочного прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний. Он позволяет учитывать возможные изменения социально-экономических параметров регионов страны и целевые параметры развития инфраструктуры наземного и воздушного транспорта. Осуществлено прогнозирование развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний к 2020 году на основе социально-экономических и демографических прогнозов развития страны по трём сценариям. Моделирование прямого авиасообщения между городами страны в 2020 г. показало значительное расширение сети (по сравнению с 2006 г.): на 30% для инерционного, на 56% – энерго-сырьевого и на 100% – инновационного сценариев. Согласно сделанным прогнозам расширение сети будет происходить в основном за счёт увеличения концентрации новых авиалиний в городах с высоким уровнем целевого потенциала (т.е. в соответствии с механизмами развития безмасштабных сетей). [21, 28, 30, 31].

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВРП	– валовой региональный продукт
ВРП'	– валовой региональный продукт, пересчитанный в соответствии с прожиточным минимумом
ВС	– воздушное судно
ЛА	– летательный аппарат
модель УСА	– модель «условий существования» авиалинии
УСА	– «условия существования» авиалинии
ФО	– федеральный округ
ANFIS	– адаптивная система нейро-нечёткого вывода (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)
FIS	– система нечёткого вывода (Fuzzy Inference System)
OD-матрица	– origin/destination matrix

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Соколов А.А., Кондрахина Г.Е., Вахмистрова Т.А. Влияние ограничений провозной способности парка на величину неудовлетворённого спроса // Труды ГосНИИ ГА. – 1980. – вып. 195. – С.50-54.
- [2] Курилец М. А. Прогнозирование пассажирских авиаперевозок методом факторного анализа с учетом социально – экономических факторов // Труды ГосНИИ ГА. – 1985. – вып.245. – С.32-36.
- [3] Самойлов И.А., Синюкова Н.С. Исследование влияния характеристик сети авиалиний на выбор параметров самолёта заданного типажа // Труды ГосНИИ ГА. – 1983. – вып. 224. – С.30-35.
- [4] Самойлов И.А. Алгоритм формирования требований к характеристикам перспективных магистральных самолётов на базе комплекса прогностических моделей // Труды ГосНИИ ГА. – 1984. – вып. 232. – С.10-19.
- [5] Bania N., Bauer P. W., Zlatoper T. J. U.S. Air Passenger Service: a Taxonomy of Route Networks, Hub Locations, and Competition // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 1998. – V. 31. – № 1. – P. 53-74. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1366-5545\(97\)00037-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1366-5545(97)00037-9)
- [6] Alderighi M., Cento A., Nijkamp P., Rietveld P. Assessment of New Hub-and-Spoke and Point-to-Point Airline Network Configurations // Transport Reviews. – 2007. – V. 27. – № 5. – P. 529-549. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/01441640701322552>
- [7] Jin F., Wang F., Liu Y. Geographic Patterns of Air Passenger Transport in China 1980–1998: Imprints of Economic Growth, Regional Inequality, and Network Development // The Professional Geographer. – 2004. – V. 56. – № 4. – P. 471-487. DOI: [10.1111/j.0033-0124.2004.00442.x](https://doi.org/10.1111/j.0033-0124.2004.00442.x)
- [8] Wang J., Jin F. China's air passenger transport: An analysis of recent trends // Eurasian Geography and Economics. – 2007. – V. 48. – № 4. – P. 469-480. DOI: [10.2747/1538-7216.48.4.469](https://doi.org/10.2747/1538-7216.48.4.469)
- [9] Ma X., Timberlake M. F. Identifying China's leading world city: a network approach // GeoJournal. – 2008. – V. 71. – № 1. – P. 19-35.
- [10] Zhang J., Cao X.-B., Du W.-B., Cai K.-Q. Evolution of Chinese airport network // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2010. – V. 389. – № 18. – P. 3922-3931.
- [11] Rocha L. E. C. Structural evolution of the Brazilian airport network // Journal of Statistical Mechanics. – 2009. – P04020. DOI:[10.1088/1742-5468/2009/04/P04020](https://doi.org/10.1088/1742-5468/2009/04/P04020)

- [12] Goetz A.R., Sutton C. J. The geography of deregulation in the US airline industry // *Annals of the Association of American Geographers*. – 1997. – V. 87. – № 2. – P. 238-263.
- [13] Burghouwt G., Hakfoort J. The evolution of the European aviation network, 1990-1998 // *Journal of Air Transport Management*. – 2001. – V.7. – № 5. – P. 311-318. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0969-6997\(01\)00024-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0969-6997(01)00024-2)
- [14] Button K. Debunking some common myths about airport hubs // *Journal of Air Transport Management*. – 2002. – V. 8. – № 3. – P. 177-188. DOI: 10.1016/S0969-6997(02)00002-9
- [15] Global market forecast 2006-2025.– Airbus, 2006.
- [16] Current Market Outlook 2003. – Boeing Commercial Airplane, June 2003.
- [17] Руководство по прогнозированию воздушных перевозок (второе издание – 1985 год) // ICAO, Doc 8991 – AT/722/2.
- [18] Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О. Моделирование сети магистральных авиалиний // *Мир транспорта*. – 2012. – № 3. – С. 14-23.
- [19] Балашов В. В., Смирнов А. В., Цейтлина Т. О. Исследование сети магистральных авиалиний России // *Научный Вестник МГТУ ГА*. – 2013. – № 190 (4). – С. 16-21.
- [20] Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О. Формирование нечёткой нейросетевой модели «условий существования» внутрироссийских магистральных авиалиний // *Научный Вестник МГТУ ГА*. – 2013. – № 190 (4). – С. 10-15.
- [21] Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О. Прогнозирование развития сети магистральных авиалиний России // *Вестник КГТУ им. А.Н.Туполева*. – 2013. – № 3. – С. 146-152.
- [22] Tseytlina T., Balashov V., Smirnov A. The Problem of Modelling a Trunk Air Route Network // *Aviation, Vilnius: Technika*. – 2013. – Vol. XVII. – №1. – P.1-8.
- [23] Цейтлина Т. О. Прогнозирование пассажирских перевозок на магистральных авиалиниях России // *Материалы Международной молодёжной научной конференции «XVII Туполевские чтения», 26-28 мая 2009 г.: Том V*. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. – С. 222-223.
- [24] Tseytlina T., Smirnov A., Balashov V. Analysis and Development Forecast of Russian Trunk Airline Network // *Материалы международной конференции «Research and Education in Aircraft Design (READ'2010)», Польша, Варшава, 2010 г.* – Warsaw: Warsaw University of Technology, 2010. – Volume 2010. – ISSN 1425-2104. [Электронный ресурс]. – опт. диск (CD-ROM), 5 с.
- [25] Цейтлина Т. О. Проблемы исследования и прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний // *Материалы Международной молодёжной научной конференции «XVIII Туполевские чтения», 26-28 мая 2010 г.: Том IV*. – Казань:

Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. – С. 414-416.

- [26] Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О. Рассмотрение сети внутрироссийских магистральных авиалиний в качестве безмасштабного графа // *Материалы XLV Научных чтений памяти К.Э. Циолковского.* – Калуга: ИП Кошелев А.Б. (Издательство «Эйдос»), 2010. – С. 210-211.
- [27] Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О. Моделирование пассажирских перевозок на магистральных авиалиниях России // *Материалы XLVI Научных чтений памяти К.Э. Циолковского.* – Калуга: Издательство «Эйдос», 2011. – С. 157-159.
- [28] Tseytlina T., Smirnov A., Balashov V. Problem of Forecasting the Development of Russia's Trunk Air Routes // *Материалы международной конференции «Research and Education in Aircraft Design (READ'2012)»*, Чешская Республика, Брно, 2012 г. – Brno: Brno University of Technology, 2012. – Volume 2012. – ISSN 1425-2104. – С. 22.
- [29] Цейтлина Т. О. Моделирование сети внутрироссийских магистральных авиалиний // *Сб. материалов IV Международной молодёжной научной конференции «Гражданская авиация: XXI век»*, 12-13 апреля 2012 г. – Ульяновск: УВАУ ГА (И), 2012. – С.125-126.
- [30] Балашов В. В., Смирнов А. В., Цейтлина Т. О. Исследование и прогнозирование развития сети магистральных авиалиний России // *Материалы XLVII Научных чтений памяти К.Э. Циолковского.* – Калуга: Издательство «Эйдос», 2012. – С. 216-218.
- [31] Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О. Предсказательное моделирование развития сети магистральных авиалиний России // *Тр. VII Московской международной конференции по исследованию операций (ORM'2013)*. Москва, 15-19 октября 2013 г. Том II. – М.: Вычислит. центр им. А.А. Дородницына РАН, 2013. – С. 196,197. – ISBN 978-5-91601081-7.
- [32] Балашов В. В., Смирнов А. В., Цейтлина Т. О. Нейросетевые технологии в задачах исследования и прогнозирования развития сети внутрироссийских магистральных авиалиний // *Материалы XLIX Научных чтений памяти К.Э. Циолковского.* – Калуга: Авторы докладов, 2014.
- [33] Балашов В. В., Свириденко Е. А., Смирнов А. В., Титоренко Л. П. Трансформация сети магистральных авиалиний России // *Тез. докл. на XXXVIII Научных чтениях К.Э.Циолковского. Секция «Авиация и воздухоплавание».* – Калуга: 2003. – С.46-59.
- [34] Балашов В. В., Свириденко Е. А., Смирнов А. В., Титоренко Л. П. Исследование тенденций развития авиатранспортной системы России // *сб. «Проблемы создания перспективной авиационно-космической техники».* – М.: Физматлит, 2005. – С.46-59.
- [35] Смирнов А. В., Балашов В. В., Свириденко Е. А., Титоренко Л. П. Тенденции развития авиатранспортной сети России // *Научно-технический отчет ЦАГИ 2003г.* – Жуковский: ЦАГИ, 2004. – С.76-79.

- [36] Смирнов А. В., Балашов В. В., Свириденко Е. А., Титоренко Л. П. Анализ показателей пассажирских авиаперевозок российских авиакомпаний в 1992...2002гг. // Научно-технический отчет ЦАГИ 2003г. – Жуковский: ЦАГИ, 2004. – С.73-76.
- [37] Балашов В. В., Смирнов А. В. Использование расписания полётов авиакомпаний мира для формирования мировой сети авиалиний и анализа интенсивности движения магистральных воздушных судов, // Сб. материалов XVI Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. Часть II. Секция 8: «Вопросы конверсии, экологии, экономики». – Казань: изд-во «Отечество», 2004. – С.74-76.
- [38] Erdős P., Rényi A. On Random Graphs I // Publ. Math. Debrecen. – 1959. – V.6. – P. 290-297. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.renyi.hu/~p_erdos/1959-11.pdf (дата обращения 14.07.2013).
- [39] Erdős P., Rényi A. On the Evolution of Random Graphs// Publ. Math. Inst. Hungar. Acad. Sci. – 1960. – V.5. – P. 17-61. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.math-inst.hu/~p_erdos/1960-10.pdf (дата обращения 14.07.2013).
- [40] Erdős P., Rényi A. On the Evolution of Random Graphs // Bull. Inst. Internat. Statist. Tokyo. – 1961. – V.38. – P. 343-347. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.renyi.hu/~p_erdos/1961-15.pdf (дата обращения 14.07.2013).
- [41] Barabási A.-L., Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks // Science. – 1999. – V. 286. – P. 509-512. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.barabasilab.com/pubs/CCNR-ALB_Publications/199910-15_Science-Emergence/199910-15_Science-Emergence.pdf (дата обращения 14.07.2013).
- [42] Albert R., Barabási A.-L. Statistical Mechanics of Complex Networks // Reviews of Modern Physics. – 2002. – V. 74. – № 1. – P. 47-97. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.barabasilab.com/pubs/CCNR-ALB_Publications/200201-30_RevModernPhys-StatisticalMech/200201-30_RevModernPhys-StatisticalMech.pdf (дата обращения 14.07.2013).
- [43] Барабаш А.-Л., Бонабо Э. Безмасштабные сети // В мире науки. – 2003. – № 8. – С. 54-63.
- [44] Li L., Alderson D., Tanaka R., Doyle J.C., Willinger W. Towards a Theory of Scale-Free Graphs: Definition, Properties, and Implications (Extended Version) // CoRR. – 2005. – 44 p. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/pdf/cond-mat/0501169v2.pdf> (дата обращения 14.07.2013).
- [45] Gephi, an open source graph visualization and manipulation software. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gephi.org/> (дата обращения: 14.07.2013).
- [46] Соколов А. А., Кондрахина Т. Е., Курилец М. А. Распределение спроса на авиаперевозки по зонам дальности // Труды ГосНИИ ГА. – 1982. – вып. 215. – С. 57-62.
- [47] Вахмистрова Т. А., Псалмова Г. А. Влияние развития наземных видов транспорта в

междугороднем сообщении на распределение спроса на авиаперевозки по зонам дальности // Труды ГосНИИ ГА. – 1982. – вып. 215. – С. 63-67.

- [48] Иберла К. Факторный анализ. – М.: Статистика, 1980. – 398 с.
- [49] Социальное положение и уровень жизни населения России, 2007. – М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2007. – 505 с.
- [50] Численность населения Российской Федерации по городам, поселкам городского типа и районам на 1 января 2007 года. – М.: Росстат, 2007. – 194 с.
- [51] Социальное положение и уровень жизни населения России, 2008. – М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2008. – 502 с.
- [52] Туризм и туристские ресурсы в России. 2004: Стат. сб. – М.: Росстат, 2004. – 267 с.
- [53] Терехов С. А. Нейросетевые информационные модели сложных инженерных систем // Нейроинформатика / А. Н. Горбань, В. Л. Дунин-Барковский, А. Н. Кирдин и др. – Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 296 с.
- [54] Леоненков А.В. Нечёткое моделирование в среде MatLab и fuzzy TECH. – СПб.: БХВ – Петербург, 2005. – 736 с.
- [55] Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечёткие модели и сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.
- [56] Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс. Второе издание: Пер. с англ. – М.; СПб.; Киев: Изд. Дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.
- [57] Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных / Под ред. В.П. Боровикова. – 2-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 392 с.
- [58] Jang J.-S.R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1993. – Vol. 23. – P. 663-685.
- [59] Штовба С. Д. Проектирование нечётких систем средствами MatLab. – М. Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.
- [60] Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты / Под ред. Ю. В. Тюменцева. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. – 655 с.
- [61] Электронный учебник StatSoft. Нейронные сети // StatSoft Russia. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.statsoft.ru/HOME/TEXTBOOK/modules/stneunet.html> (дата обращения: 28.07.2013).
- [62] Проектирование систем управления \ Fuzzy Logic Toolbox. Функции Fuzzy Logic Toolbox // MathWorks. Материалы по продуктам MATLAB & Toolboxes. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book2/index.php> (дата обращения: 31.07.2013).

- [63] Binary classification // Wikipedia, the free encyclopedia. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Binary_classification (дата обращения: 12.02.2014).
- [64] Паклин Н. Логистическая регрессия и ROC-анализ - математический аппарат // BaseGroup Labs. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.basegroup.ru/library/analysis/regression/logistic/> (дата обращения: 12.02.2014).
- [65] Receiver operating characteristic // Wikipedia, the free encyclopedia. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Receiver_operating_characteristic (дата обращения: 12.02.2014).
- [66] Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года (утв. распоряжением Правительства РФ № 1662-р. от 17 ноября 2008г.) // Минэкономразвития России. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/fcp/rasp_2008_N1662_red_08.08.2009 (дата обращения: 19.11.2013).
- [67] Концепция демографической политики Российской Федерации на период до 2025 года (утв. Указом Президента РФ от 9 октября 2007 г. № 1351) // Демоскоп Weekly. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://demoscope.ru/weekly/knigi/koncersiya/koncersiya25.html> (дата обращения: 19.11.2013).
- [68] Федеральная целевая программа «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации (2011 - 2018 годы)» (утв. постановлением Правительства РФ от 2 августа 2011г. № 644-п) // «Российская газета». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.rg.ru/pril/60/73/76/644_fcp.pdf (дата обращения: 19.11.2013).
- [69] Федеральная целевая программа «Развитие транспортной системы России (2010-2015 годы)» (утв. распоряжением Правительства РФ от 20 мая 2008 года № 377-р) // ФЦП. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fcp.economy.gov.ru/cgi-bin/cis/fcp.cgi/Fcp/ViewFcp/View/2012/264/> (дата обращения: 19.11.2013).
- [70] Стратегия развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 17 июня 2008 г. № 877-р) // Министерство транспорта Российской Федерации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mintrans.ru:8080/prensa/TransStrateg_VV.htm (дата обращения: 19.11.2013).
- [71] Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 22 ноября 2008 г. № 1734-р).
- [72] Сценарные условия долгосрочного прогноза социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года // Минэкономразвития России. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.economy.gov.ru/minec/activity/sections/macro/prognoz/doc20120428_0010 (дата обращения: 19.11.2013).

- [73] Динамика реального объёма элементов использованного ВВП (1996-2008 гг.) // Федеральная служба государственной статистики. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gks.ru/bgd/free/b01_19/IssWWW.exe/Stg/d000/i000230r.htm (дата обращения: 19.11.2013).
- [74] Демографический ежегодник России. 2010: Стат. сб. – М.: Росстат, 2010. – 525 с. – ISBN 978-5-89476-295-1.
- [75] Федеральная служба государственной статистики. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.gks.ru
- [76] Число мест в коллективных средствах размещения (Российская Федерация) // Единая межведомственная информационно-статистическая система. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fedstat.ru/indicators/org.do?id=1&expandId=1292829> (дата обращения: 19.11.2013).
- [77] Транспорт в России, 2007. – М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2007. – 198 с.
- [78] Транспорт в России, 2009. – М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2009. – 215 с.
- [79] Транспорт и связь в России, 2001. – М.: Госкомстат России, 2001. – 222 с.
- [80] Транспорт и связь в России, 2012. – М.: Федеральная служба государственной статистики (Росстат), 2012. – 303 с.
- [81] Транспорт и связь России. Статистический сборник (официальное издание). – М.: Госкомстат России, 1996.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

Список аэропортов РФ

№ п/п	Код аэропорта	Код города ⁷	Аэропорт	Населённый пункт (город, посёлок городского типа, село или др.)	Субъект РФ	Федеральный округ
1	АБН	АБН	Абакан	Абакан	Хакасия (респ.)	Сибирский
2	АЛД	АЛД	Алдан	Алдан	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
3	АМД	АМД	Амдерма	Амдерма	Ненецкий авт. округ	Северо-Западный
4	АНА	АНА	Витязево	Анапа	Краснодарский край	Южный
5	АНЫ	АНЫ	Угольный	Анадырь	Чукотский авт. округ	Дальневосточный
6	АПХ	АПХ	Кировск	Кировск	Мурманская обл.	Северо-Западный
7	АСР	АСР	Нариманово	Астрахань	Астраханская обл.	Южный
8	АХГ	АРХ	Талаги	Архангельск	Архангельская обл.	Северо-Западный
9	АЧН	АЧН*	Ачинск	Ачинск	Красноярский край	Сибирский
10	БАН	БАН	Михайловка	Барнаул	Алтайский край	Сибирский
11	БАО	БАО*	Балаково	Балаково	Саратовская обл.	Приволжский
12	БГЦ	БГЦ	Игнатьево	Благовещенск	Амурская обл.	Дальневосточный
13	БЕД	БЕД	Белгород	Белгород	Белгородская обл.	Центральный
14	БКВ	МОС	Быково	Москва	Московская обл.	Центральный
15	БЛР	БЛР	Белоярский	Белоярский	Ханты-Мансийский авт. округ	Уральский
16	БРС	БРС	Братск	Братск	Иркутская обл.	Сибирский
17	БРЯ	БРЯ*	Брянск	Брянск	Брянская обл.	Центральный
18	БТГ	БТГ	Батагай	Батагай	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
19	ВВО	ВВО	Кневичи	Владивосток	Приморский край	Дальневосточный
20	ВГГ	ВГГ	Гумрак	Волгоград	Волгоградская обл.	Южный
21	ВГД	ВГД	Вологда	Вологда	Вологодская обл.	Северо-Западный
22	ВЕК	ВЕК*	Великие Луки	Великие Луки	Псковская обл.	Северо-Западный
23	ВКТ	ВКТ	Воркута	Воркута	Коми (респ.)	Северо-Западный
24	ВЛА	ВЛА	Беслан	Владикавказ	Северная	Южный (Северо-

⁷ Знаком * обозначены аэропорты, исключённые из рассмотрения (см. Гл.2 п. 2.1)

№ п/п	Код аэропорта	Код города ⁷	Аэропорт	Населённый пункт (город, посёлок городского типа, село или др.)	Субъект РФ	Федеральный округ
					Осетия (респ.)	Кавказский)
25	ВЛД	ВЛД	Волгодонск	Волгодонск	Ростовская обл.	Южный
26	ВНК	МОС	Внуково	Москва	Московская обл.	Центральный
27	ВОЗ	ВОЗ*	Воздвиженка	Воздвиженка	Хабаровский край	Дальневосточный
28	ВРН	ВРН	Чертовицкое	Воронеж	Воронежская обл.	Центральный
29	ВСЬ	АРХ	Васьково	Архангельск	Архангельская обл.	Северо-Западный
30	ГРН	ГРН	Грозный	Грозный	Чеченская респ.	Южный (Северо-Кавказский)
31	ГДЖ	ГДЖ	Геленджик	Геленджик	Краснодарский край	Южный
32	ДИК	ДИК*	Диксон	Диксон	Таймырский (Долгано-Ненецкий) авт. округ	Сибирский
33	ДМД	МОС	Домодедово	Москва	Московская обл.	Центральный
34	ЕМВ	ЕМВ	Красноярск	Красноярск	Красноярский край	Сибирский
35	ЕНС	ЕНС	Енисейск	Енисейск	Красноярский край	Сибирский
36	ЖИГ	ЖИГ	Жиганск	Жиганск	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
37	ЗВТ	ЗВТ*	Завитинск	Завитинск	Амурская обл.	Дальневосточный
38	ЗНК	ЗНК	Зырянкa	Зырянкa	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
39	ИВВ	ИВВ*	Южный	Иваново	Ивановская обл.	Центральный
40	ИГР	ИГР	Игарка	Игарка	Красноярский край	Сибирский
41	ИЖВ	ИЖВ	Ижевск	Ижевск	Удмуртия (респ.)	Приволжский
42	ИКТ	ИКТ	Иркутск	Иркутск	Иркутская обл.	Сибирский
43	ИШО	ИШО	Павловский	Йошкар-Ола	Марий Эл (респ.)	Приволжский
44	КАЛ	КАЛ*	Калуга	Калуга	Калужская обл.	Центральный
45	КГН	КГН	Курган	Курган	Курганская обл.	Уральский
46	КИО	КИО	Киров	Киров	Кировская обл.	Приволжский
47	ККЗ	ККЗ	Основной	Казань	Татарстан (респ.)	Приволжский
48	КЛД	КЛД	Храброво	Калининград	Калининградская обл.	Северо-Западный
49	КЛЦ	КЛЦ	Кольцово	Екатеринбург	Свердловская обл.	Уральский
50	КЛШ	КЛШ*	Колпашево	Колпашево	Томская обл.	Сибирский
51	КОГ	КОГ	Когалым	Когалым	Ханты-	Уральский

№ п/п	Код аэропорта	Код города ⁷	Аэропорт	Населённый пункт (город, посёлок городского типа, село или др.)	Субъект РФ	Федеральный округ
					Мансийский авт. округ	
52	КПА	КПА	Пашковский	Краснодар	Краснодарский край	Южный
53	КПМ	КПМ	Кепервеем	Кепервеем	Чукотский авт. округ	Дальневосточный
54	КРВ	КРВ	Кемерово	Кемерово	Кемеровская обл.	Сибирский
55	КРН	КРН	Киренск	Киренск	Иркутская обл.	Сибирский
56	КСЛ	КСЛ	Хурба	Комсомольск-на-Амуре	Хабаровский край	Дальневосточный
57	КТС	КТС	Котлас	Котлас	Архангельская обл.	Северо-Западный
58	КУС	КУС	Восточный	Курск	Курская обл.	Центральный
59	КЫЫ	КЫЫ	Кызыл	Кызыл	Тува (респ.)	Сибирский
60	ЛЕН	ЛЕН*	Ленино	Ленино	Камчатская обл.	Дальневосточный
61	ЛИП	ЛИП	Липецк	Липецк	Липецкая обл.	Центральный
62	ЛСК	ЛСК	Ленск	Ленск	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
63	МГН	МГН*	Маган	Маган	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
64	МГС	МГС	Магнитогорск	Магнитогорск	Челябинская обл.	Уральский
65	МДС	МДС	Сокол	Магадан	Магаданская обл.	Дальневосточный
66	МИР	МИР	Мирный	Мирный	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
67	МКМ	МКМ	Каменный мыс	Каменный мыс	Ямало-Ненецкий авт. округ	Уральский
68	МКО	МКО	Марково	Марково	Чукотский авт. округ	Дальневосточный
69	МРВ	МРВ	Минеральные Воды	Минеральные Воды	Ставропольский край	Южный (Северо-Кавказский)
70	МУН	МУН	Мурманск	Мурманск	Мурманская обл.	Северо-Западный
71	МХЛ	МХЛ	Уйташ	Махачкала	Дагестан (респ.)	Южный (Северо-Кавказский)
72	МШД	МШД	Мыс Шмидта	Мыс Шмидта	Чукотский авт. округ	Дальневосточный
73	НАК	НАК	Алыкель	Норильск	Таймырский (Долгано-Ненецкий) авт. округ	Сибирский
74	НВК	НВК	Спиченково	Новокузнецк	Кемеровская обл.	Сибирский
75	НДМ	НДМ	Надым	Надым	Ямало-Ненецкий	Уральский

№ п/п	Код аэропорта	Код города ⁷	Аэропорт	Населённый пункт (город, посёлок городского типа, село или др.)	Субъект РФ	Федеральный округ
					авт. округ	
76	НЖВ	НЖВ	Нижневартовск	Нижневартовск	Ханты-Мансийский авт. округ	Уральский
77	НЖК	НЖК	Бегишево	Нижнекамск	Татарстан (респ.)	Приволжский
78	НЖС	НЖС	Стригино	Нижний Новгород	Нижегородская обл.	Приволжский
79	НЛК	НЛК	Николаевск-на-Амуре	Николаевск-на-Амуре	Хабаровский край	Дальневосточный
80	ННР	ННР	Нарьян-Мар	Нарьян-Мар	Ненецкий авт. округ	Северо-Западный
81	НОЯ	НОЯ	Ноябрьск	Ноябрьск	Ямало-Ненецкий авт. округ	Уральский
82	НРГ	НРГ	Чульман	Нерюнгри	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
83	НУР	НУР	Новый Уренгой	Новый Уренгой	Ямало-Ненецкий авт. округ	Уральский
84	НЧК	НЧК	Нальчик	Нальчик	Кабардино-Балкарская респ.	Южный (Северо-Кавказский)
85	НЮГ	НЮГ*	Нефтеюганск	Нефтеюганск	Ханты-Мансийский авт. округ	Уральский
86	НЮР	НЮР	Нюрба	Нюрба	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
87	ОЛК	ОЛК	Олекминск	Олекминск	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
88	ОЛН	ОЛН	Оленек	Оленек	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
89	ОМС	ОМС	Центральный	Омск	Омская обл.	Сибирский
90	ОНГ	ОНГ	Центральный	Оренбург	Оренбургская обл.	Приволжский
91	ООЛ	ООЛ	Омолон	Омолон	Чукотский авт. округ	Дальневосточный
92	ОХТ	ОХТ	Охотск	Охотск	Хабаровский край	Дальневосточный
93	ПЕВ	ПЕВ	Апальгино	Певек	Чукотский авт. округ	Дальневосточный
94	ПЛК	ПЛК	Пулково	Санкт-Петербург	Ленинградская обл.	Северо-Западный
95	ПЛЯ	ПЛЯ	Полярный	Полярный	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
96	ПНА	ПНА	Терновка	Пенза	Пензенская обл.	Приволжский
97	ПРД	ПРД	Провидения	Провидения бухта	Чукотский авт. округ	Дальневосточный

№ п/п	Код аэропорта	Код города ⁷	Аэропорт	Населённый пункт (город, посёлок городского типа, село или др.)	Субъект РФ	Федеральный округ
98	ПРЛ	ПРЛ	Елизово	Петропавловск-Камчатский	Камчатская обл.	Дальневосточный
99	ПРЬ	ПРЬ	Большое Савино	Пермь	Пермская обл.	Приволжский
100	ПСК	ПСК	Псков	Псков	Псковская обл.	Северо-Западный
101	ПТС	ПТС	Подкаменная Тунгуска	Подкаменная Тунгуска	Красноярский край	Сибирский
102	ПЧР	ПЧР	Печора	Печора	Коми (респ.)	Северо-Западный
103	РАД	РАД	Радужный	Радужный	Ханты-Мансийский авт. округ	Уральский
104	РОВ	РОВ	Ростов-на-Дону	Ростов-на-Дону	Ростовская обл.	Южный
105	РЦН	РЦН	Рощино	Тюмень	Тюменская обл.	Уральский
106	СВР	НСБ	Северный	Новосибирск	Новосибирская обл.	Сибирский
107	СКЧ	СКЧ	Курумоч	Самара	Самарская обл.	Приволжский
108	СМЧ	СМЧ*	Сеймчан	Сеймчан	Магаданская обл.	Дальневосточный
109	СОГ	СОГ	Май-Гатка	Советская Гавань	Хабаровский край	Дальневосточный
110	СОЧ	СОЧ	Адлер	Сочи	Краснодарский край	Южный
111	СРН	СРН	Саранск	Саранск	Мордовия (респ.)	Приволжский
112	СРО	СРО	Центральный	Саратов	Саратовская обл.	Приволжский
113	СТВ	СТВ	Шпаковское	Ставрополь	Ставропольский край	Южный (Северо-Кавказский)
114	СТЖ	СТЖ	Стрежевой	Стрежевой	Томская обл.	Сибирский
115	СУР	СУР	Сургут	Сургут	Ямало-Ненецкий авт. округ	Уральский
116	СХД	СХД	Салехард	Салехард	Ямало-Ненецкий авт. округ	Уральский
117	СХТ	СХТ	Кадала	Чита	Читинская обл.	Сибирский
118	СЫВ	СЫВ	Сыктывкар	Сыктывкар	Коми (респ.)	Северо-Западный
119	ТЕК	ТЕК*	Теплый ключ	Теплый ключ	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
120	ТЛЧ	НСБ	Толмачево	Новосибирск	Новосибирская обл.	Сибирский
121	ТМБ	ТМБ	Донское	Тамбов	Тамбовская обл.	Центральный
122	ТСИ	ТСИ	Тикси	Тикси	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
123	ТСК	ТСК	Богашево	Томск	Томская обл.	Сибирский
124	ТУЛ	ТУЛ*	Клоково	Тула	Тульская обл.	Центральный

№ п/п	Код аэропорта	Код города ⁷	Аэропорт	Населённый пункт (город, посёлок городского типа, село или др.)	Субъект РФ	Федеральный округ
125	УЛК	УЛК	Баратаевка	Ульяновск	Ульяновская обл.	Приволжский
126	УЛЭ	УЛЭ	Улан-Удэ	Улан-Удэ	Бурятия (респ.)	Сибирский
127	УРА	УРА	Урай	Урай	Ханты-Мансийский авт. округ	Уральский
128	УСК	УСК	Усть-Кут	Усть-Кут	Иркутская обл.	Сибирский
129	УСМ	УСМ	Усть-Мая	Усть-Мая	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
130	УСН	УСН	Усинск	Усинск	Коми (респ.)	Северо-Западный
131	УТК	УТК*	Усть-Илимск	Усть-Илимск	Иркутская обл.	Сибирский
132	УФА	УФА	Уфа	Уфа	Башкортостан (респ.)	Приволжский
133	УХТ	УХТ	Ухта	Ухта	Коми (респ.)	Северо-Западный
134	ХАС	ХАС	Ханты-Мансийск	Ханты-Мансийск	Ханты-Мансийский авт. округ	Уральский
135	ХАТ	ХАТ	Хатанга	Хатанга	Таймырский (Долгано-Ненецкий) авт. округ	Сибирский
136	ХБР	ХБР	Новый	Хабаровск	Хабаровский край	Дальневосточный
137	ЧБЕ	ЧБЕ	Чебоксары	Чебоксары	Чувашская республика Чаваш	Приволжский
138	ЧБХ	ЧБХ	Чайбуха	Чайбуха	Магаданская обл.	Дальневосточный
139	ЧКД	ЧКД	Чокурдах	Чокурдах	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
140	ЧЛБ	ЧЛБ	Баландино	Челябинск	Челябинская обл.	Уральский
141	ЧРС	ЧРС	Черский	Черский	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный
142	ШРМ	МОС	Шереметьево	Москва	Московская обл.	Центральный
143	ЭЛИ	ЭЛИ	Элиста	Элиста	Калмыкия Хальм Тангч (респ.)	Южный
144	ЮЖХ	ЮЖХ	Хомутово	Южно-Сахалинск	Сахалинская обл.	Дальневосточный
145	ЯКТ	ЯКТ	Якутск	Якутск	Саха (Якутия) респ.	Дальневосточный

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Значения используемых параметров городов РФ

Города отсортированы по *статусу города*. В скобках указаны значения, используемые при получении прогнозных значений параметров к 2020 г., если они отличаются от значений, используемых при моделировании сети 2006 г. (см. п. 4.1)

№ п/п	Код города	Аэропорт/ код аэропорта	Населённый пункт (город, посёлок городского типа, село или др.)	Ста- тус горо- да	Потен- циал аэро- порта по ВС	Нали- чие ж.-д. стан- ции	Численность населения, относящаяся к городу, тыс. человек	Число мест коллективного размещения (тыс. коек), относящееся к городу, пропорциональное численности населения	ВРП' субъекта РФ, пропор- циональное численности населения, млрд. руб.
1	МОС	ШРМ/ ДМД/ ВНК/ БКВ	Москва	1	1	1	27804	159,1	4308,1
2	АНА	Витязево	Анапа	2	4	1	664,0 (382,9)	109,6 (54,8)	58,1 (33,7)
3	КЛЦ	Кольцово	Екатеринбург	2	1	1	4399,8	24,8	677,3
4	КПА	Пашковский	Краснодар	2	3	1	4365,9 (4278,0)	12,7	383,5 (375,7)
5	НСБ	ТЛЧ/ СВР	Новосибирск	2	1	1	2640,7	17,5	268,4
6	ПЛК	Пулково	Санкт-Петербург	2	1	1	7559,6	59,8	1061,9
7	СКЧ	Курумоч	Самара	2	2	1	3178,6	28,3	452,1
8	СОЧ	Адлер	Сочи	2	2	1	533,1	98	46,9
9	АБН	Абакан	Абакан	3	3	1	536,6	3,5	53,5
10	АНЫ	Угольный	Анадырь	3	2	0	18,4	0,2	2,2
11	АПХ	Апатиты	Кировск	3	4	1	189,4	1,6	22,5
12	АРХ	АХГ/ ВСЬ	Архангельск	3	3	1	996,1	6,1	100,8
13	АСР	Нариманово	Астрахань	3	3	1	994,1	5	101
14	БАН	Михайловка	Барнаул	3	2	1	2728,7	18,2	199,2
15	БГЦ	Игнатьево	Благовещенск	3	3	1	874,6	5,4	72,1

№ п/п	Код города	Аэропорт/ код аэропорта	Населённый пункт (город, посёлок городского типа, село или др.)	Ста- тус горо- да	Потен- циал аэро- порта по ВС	Нали- чие ж.-д. стан- ции	Численность населения, относящаяся к городу, тыс. человек	Число мест коллективного размещения (тыс. коек), относящееся к городу, пропорциональное численности населения	ВРП' субъекта РФ, пропор- циональное численности населения, млрд. руб.
16	БЕД	Белгород	Белгород	3	3	1	1513,6	5,4	214,4
17	БРС	Братск	Братск	3	2	1	635,7	4,9	83,7
18	ВВО	Кневичи	Владивосток	3	1	1	2005,9	18,1	162,3
19	ВГГ	Гумрак	Волгоград	3	3	1	2620	15,5	310,1
20	ВГД	Вологда	Вологда	3	5	1	1227,8	7,5	207,1
21	ВКТ	Воркута	Воркута	3	5	1	116,9	0,5	19,5
22	ВЛА	Беслан	Владикавказ	3	3	1	701,4	3,9	55,8
23	ВРН	Чертовицкое	Воронеж	3	4	1	2294,6	13,6	199,4
24	ЕМВ	Красноярск	Красноярск	3	1	1	2405,5	14,8	492,6
25	ИЖВ	Ижевск	Ижевск	3	4	1	1537,9	6,2	188,4
26	ИКТ	Иркутск	Иркутск	3	2	1	1632,6	12,6	214,4
27	ИШО	Павловский	Йошкар-Ола	3	5	1	706,7	5,2	52,5
28	КГН	Курган	Курган	3	3	1	969,3	5,5	76,8
29	КИО	Киров	Киров	3	4	1	1426,9	9,1	108,1
30	ККЗ	Основной	Казань	3	3	1	2050,5	15,4	420,9
31	КЛД	Храброво	Калининград	3	3	1	937,4	7	92,9
32	КОГ	Когалым	Когалым	3	3	1	175	0,8	123,5
33	КРВ	Кемерово	Кемерово	3	3	1	1584,5	7,7	221,8
34	КСЛ	Хурба	Комсомольск-на-Амуре	3	3	1	386,2	2	33,8
35	КУС	Восточный	Курск	3	4	1	3314,9	5,1	121,2
36	КЫЫ	Кызыл	Кызыл	3	5	0	309,4	1,5	15,3
37	ЛИП	Липецк	Липецк	3	4	1	1173,9	7,5	237,2
38	МГС	Магнитогорск	Магнитогорск	3	4	1	865,6	9	127,8

№ п/п	Код города	Аэропорт/ код аэропорта	Населённый пункт (город, посёлок городского типа, село или др.)	Ста- тус горо- да	Потен- циал аэро- порта по ВС	Нали- чие ж.-д. стан- ции	Численность населения, относящаяся к городу, тыс. человек	Число мест коллективного размещения (тыс. коек), относящееся к городу, пропорциональное численности населения	ВРП' субъекта РФ, пропор- циональное численности населения, млрд. руб.
39	МДС	Сокол	Магадан	3	3	0	163	1,8	19
40	МИР	Мирный	Мирный	3	3	0	37,5	0,2	5,1
41	МРВ	Минеральные Воды	Минеральные Воды	3 (2)	3	1	1841,4	14,5	102,1
42	МУН	Мурманск	Мурманск	3	3	1	661,6	5,7	78,2
43	МХЛ	Уйташ	Махачкала	3	3	1	3842,3 (2658,6)	4	163,7
44	НАК	Алыкель	Норильск	3	3	0	238	15,8	526,2
45	НВК	Спиченково	Новокузнецк	3	3	1	1239	6	173,6
46	НДМ	Надым	Надым	3	3	0	69,7	0,3	40,2
47	НЖВ	Нижневартовск	Нижневартовск	3	3	1	359	1,7	254,4
48	НЖК	Бегишево	Нижнекамск	3	3	1	1712,4	12,9	351,4
49	НЖС	Стригино	Нижний Новгород	3	3	1	3381,3	22,7	402,2
50	ННР	Нарьян-Мар	Нарьян-Мар	3	3	0	41,4	0,1	35
51	НОЯ	Ноябрьск	Ноябрьск	3	3	1	170,2	0,8	98,7
52	НРГ	Чульман	Нерюнгри	3	3	1	87,5	0,4	11,9
53	НУР	Новый Уренгой	Новый Уренгой	3	3	1	192	0,9	111,3
54	НЧК	Нальчик	Нальчик	3	4	1	891,3	9,2	56,2
55	ОМС	Центральный	Омск	3	3	1	2025,6	7,4	252
56	ОНГ	Центральный	Оренбург	3	3	1	2125,5	10,6	376,8
57	ПНА	Терновка	Пенза	3	4	1	1396	8,2	104,4
58	ПРЛ	Елизово	Петропавловск-Камчатский	3	1	0	347,1	2,3	27,6
59	ПРЬ	Большое Савино	Пермь	3	3	1	2730,9	17,6	378,5
60	ПСК	Псков	Псков	3	5	1	713,4	5	57,5

№ п/п	Код города	Аэропорт/ код аэропорта	Населённый пункт (город, посёлок городского типа, село или др.)	Ста- тус горо- да	Потен- циал аэро- порта по ВС	Нали- чие ж.-д. стан- ции	Численность населения, относящаяся к городу, тыс. человек	Число мест коллективного размещения (тыс. коек), относящееся к городу, пропорциональное численности населения	ВРП' субъекта РФ, пропор- циональное численности населения, млрд. руб.
61	РАД	Радужный	Радужный	3	3	0	82,3	0,4	58,5
62	РОВ	Ростов-на-Дону	Ростов-на-Дону	3	3	1	3723	19,1	327,4
63	РЩН	Рощино	Тюмень	3	3	1	1318,2	9,6	417,8
64	СРН	Саранск	Саранск	3	5	1	847,7	3	69,2
65	СРО	Центральный	Саратов	3	4	1	2583,8	13,9	236,3
66	СТВ	Шпаковское	Ставрополь	3	4	1	1790,5	14,1	99,3
67	СТЖ	Стрежевой	Стрежевой	3	5	0	77,4	0,3	13,5
68	СУР	Сургут	Сургут	3	3	1	498,4	2,4	352,3
69	СХД	Салехард	Салехард	3	3	0	94,7	0,4	54,7
70	СХТ	Кадала	Чита	3	3	1	1122,1	7,6	84
71	СЫВ	Сыктывкар	Сыктывкар	3	3	1	453,3	2,1	75,5
72	ТМБ	Донское	Тамбов	3	5	1	1117,1	5,1	98,6
73	ТСК	Богашево	Томск	3	3	1	957,6	4,2	166
74	УЛК	Баратаевка	Ульяновск	3	3	1	1321,7	9	118,6
75	УЛЭ	Улан-Удэ	Улан-Удэ	3	3	1	960	7,5	77,6
76	УФА	Уфа	Уфа	3	2	1	4051	29,9	584,6
77	УХТ	Ухта	Ухта	3	4	1	192,9	0,9	32
78	ХАС	Ханты-Мансийск	Ханты-Мансийск	3	3	0	175,5	0,8	124,5
79	ХБР	Новый	Хабаровск	3	1	1	1034,3	5,3	90,4
80	ЧБЕ	Чебоксары	Чебоксары	3	4	1	1286,2	6,5	116,3
81	ЧЛБ	Баладино	Челябинск	3	3	1	2645,4	27,4	389,6
82	ЭЛИ	Элиста	Элиста	3	4	1	287,2	0,3	15,9
83	ЮЖХ	Хомутово	Южно-Сахалинск	3	1	0	521,2	3,4	93,6

№ п/п	Код города	Аэропорт/ код аэропорта	Населённый пункт (город, посёлок городского типа, село или др.)	Ста- тус горо- да	Потен- циал аэро- порта по ВС	Нали- чие ж.-д. стан- ции	Численность населения, относящаяся к городу, тыс. человек	Число мест коллективного размещения (тыс. коек), относящееся к городу, пропорциональное численности населения	ВРП' субъекта РФ, пропор- циональное численности населения, млрд. руб.
84	ЯКТ	Якутск	Якутск	3	2	0	499,6	2,3	68
85	АЛД	Алдан	Алдан	4	5	1	46,7	0,2	6,4
86	АМД	Амдерма	Амдерма	4	5	0	0,6	0	0,5
87	БЛР	Белоярский	Белоярский	4	5	0	56,1	0,3	39,4
88	БТГ	Батагай	Батагай	4	5	0	23,8	0,1	3,4
89	ВЛД	Волгодонск	Волгодонск	4	5	1	531,4	2,7	46,8
90	ЕНС	Енисейск	Енисейск	4	5	0	213,5	1,3	43,9
91	ЖИГ	Жиганск	Жиганск	4	5	0	4	0	0,5
92	ЗНК	Зырянка	Зырянка	4	5	0	13,8	0,1	1,8
93	ИГР	Игарка	Игарка	4	4	0	7	0,1	1,6
94	КПМ	Кепервеем	Кепервеем	4	5	0	4,1	0	0,5
95	КРН	Киренск	Киренск	4	5	0	57,7	0,4	7,6
96	КТС	Котлас	Котлас	4	5	1	233,7	1,4	23,6
97	ЛСК	Ленск	Ленск	4	5	0	38,7	0,2	5,3
98	МКМ	Каменный мыс	Каменный мыс	4	5	0	16,1	0,1	9,4
99	МКО	Марково	Марково	4	5	0	6,8	0,1	0,8
100	МШД	Мыс Шмидта	Мыс Шмидта	4	5	0	2,2	0	0,3
101	НЛК	Николаевск-на-Амуре	Николаевск-на-Амуре	4	5	0	69,4	0,4	6,1
102	НЮР	Нюрба	Нюрба	4	5	0	86,8	0,4	11,9
103	ОЛК	Олекминск	Олекминск	4	5	0	25,4	0,1	3,5
104	ОЛН	Оленек	Оленек	4	5	0	8,1	0	1
105	ООЛ	Омолон	Омолон	4	5	0	4,1	0	0,5
106	ОХТ	Охотск	Охотск	4	5	0	13,3	0,1	1,1

№ п/п	Код города	Аэропорт/ код аэропорта	Населённый пункт (город, посёлок городского типа, село или др.)	Ста- тус горо- да	Потен- циал аэро- порта по ВС	Нали- чие ж.-д. стан- ции	Численность населения, относящаяся к городу, тыс. человек	Число мест коллективного размещения (тыс. коек), относящееся к городу, пропорциональное численности населения	ВРП' субъекта РФ, пропор- циональное численности населения, млрд. руб.
107	ПЕВ	Апальгино	Певек	4	3	0	5,7	0,1	0,7
108	ПЛЯ	Полярный	Полярный	4	3	0	44,7	0,2	6,1
109	ПРД	Провидения бухта	Провидения	4	5	0	9	0,1	1,1
110	ПТС	Подкаменная Тунгуска	Подкаменная Тунгуска	4	5	0	19,2	0,1	3,8
111	ПЧР	Печора	Печора	4	5	1	119,4	0,5	19,8
112	СОГ	Май-Гатка	Советская Гавань	4	5	1	86,1	0,4	7,5
113	ТСИ	Тикси	Тикси	4	5	0	9	0	1,2
114	УРА	Урай	Урай	4	5	0	158	0,7	111,8
115	УСК	Усть-Кут	Усть-Кут	4	5	1	181,8	1,4	23,7
116	УСМ	Усть-Мая	Усть-Мая	4	5	0	9,9	0	1,3
117	УСН	Усинск	Усинск	4	4	1	85,7	0,4	14,2
118	ХАТ	Хатанга	Хатанга	4	5	0	7,2	0,5	15,7
119	ЧБХ	Чайбуха	Чайбуха	4	5	0	2,8	0	0,3
120	ЧКД	Чокурдах	Чокурдах	4	5	0	3	0	0,4
121	ЧРС	Черский	Черский	4	5	0	13	0,1	1,8
122	ГДЖ	Геленджик	Геленджик	- (3)	- (3)	- (0)	- (369)	- (54,8)	- (32,2)
123	ГРН	Грозный	Грозный	- (3)	- (3)	- (1)	- (1183,7)	- (0)	- (32)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

Определение значений параметра «численность населения»

Данные о численности населения получены на основании данных Росстата о распределении численности населения Российской Федерации по городам, посёлкам городского типа и районам на 1 января 2007 г. [50].

Код города см. в приложении А или Б.

В.1) Центральный ФО

- Брянская, Орловская и Курская области отнесены к городу Курск (КУС).
- Рязанская, Владимирская, Ярославская, Тверская, Смоленская, Костромская, Ивановская, Калужская, Тульская, Московская области и г. Москва отнесены к городу Москва (МОС).

В результате получена следующая численность населения N(код города) (в тыс. чел), которая отнесена к каждому из рассматриваемых городов Центрального ФО:

N(БЕД) =1513,6	N(КУС) =1317,6+1170,7+826,6=3314,9
N(ВРН) =2294,6	N(МОС) =10442,7+6645,7+172,3+1459,6+
N(ЛИП) =1173,9	+1320,1+1390,5+993,5+1087,9+
N(ТМБ) =1117,1	+702,2+1009,0+1580,5=27804,0

В.2) Северо-Западный ФО

- Ленинградская и Новгородская области, Республика Карелия и г. Санкт-Петербург отнесены к городу Санкт-Петербург (ПЛК).

- В Мурманской области (рисунок В1) к городам Кировск (АПХ) и Мурманск (МУН) отнесено население следующих административно-территориальных единиц:

АПХ: Ловозерский р-н, г. Кандалакша, г. Полярные зори, г. Апатиты, г. Кировск, Терский р-н;

МУН: остальное население области.

- В Архангельской области (рисунок В2) (без Ненецкого автономного округа (АО)) к городам Котлас (КТС) и Архангельск (АРХ) отнесено население следующих административно-территориальных единиц:

КТС: Верхнетоемский р-н, Устьянский р-н, Красноборский р-н, Ленский р-н, Котласский р-н, г. Котлас, г. Коряжма, Вилегодский р-н;

АРХ: остальное (без Ненецкого АО) население области.



Рисунок В1 – Административно-территориальное деление Мурманской области

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/northern/murmansk-region/murman_obl.htm



Рисунок В2 – Административно-территориальное деление Архангельской области

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/northern/arkhangelsk-region/arhang_obl.htm

- В Ненецком АО (рисунок В3) население разделено между городами следующим образом:

АМД (Амдерма): г. Амдерма;

ННР (Нарьян-Мар): остальное население АО.

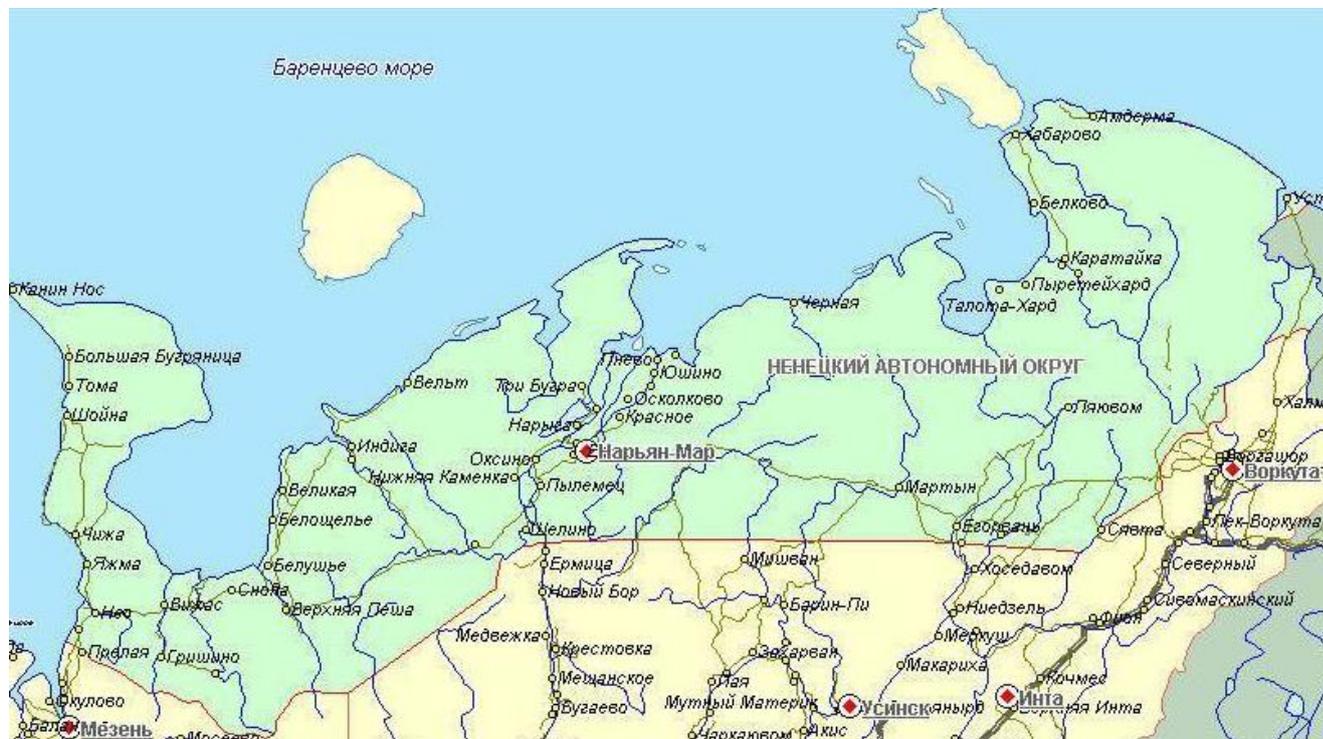


Рисунок В3 – Карта Ненецкого авт. округа

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/northern/nenets-ao/nenec_ao.htm

- В Республике Коми (рисунок В4) к городам Воркута (ВКТ), Печора (ПЧР), Усинск (УСН), Ухта (УХТ) и Сыктывкар (СЫВ) отнесено население следующих административно-территориальных единиц:

ВКТ: г. Воркута;

ПЧР: г. Печора и Печорский р-н, г. Инта, г. Вуктыл и Вуктыльский р-н;

УСН: Усть-Цилемский р-н, г. Усинск и Усинский р-н, Ижемский р-н;

УХТ: г. Ухта, г. Сосногорск и Сосногорский р-н, Троице-Печорский р-н;

СЫВ: остальное население Республики.

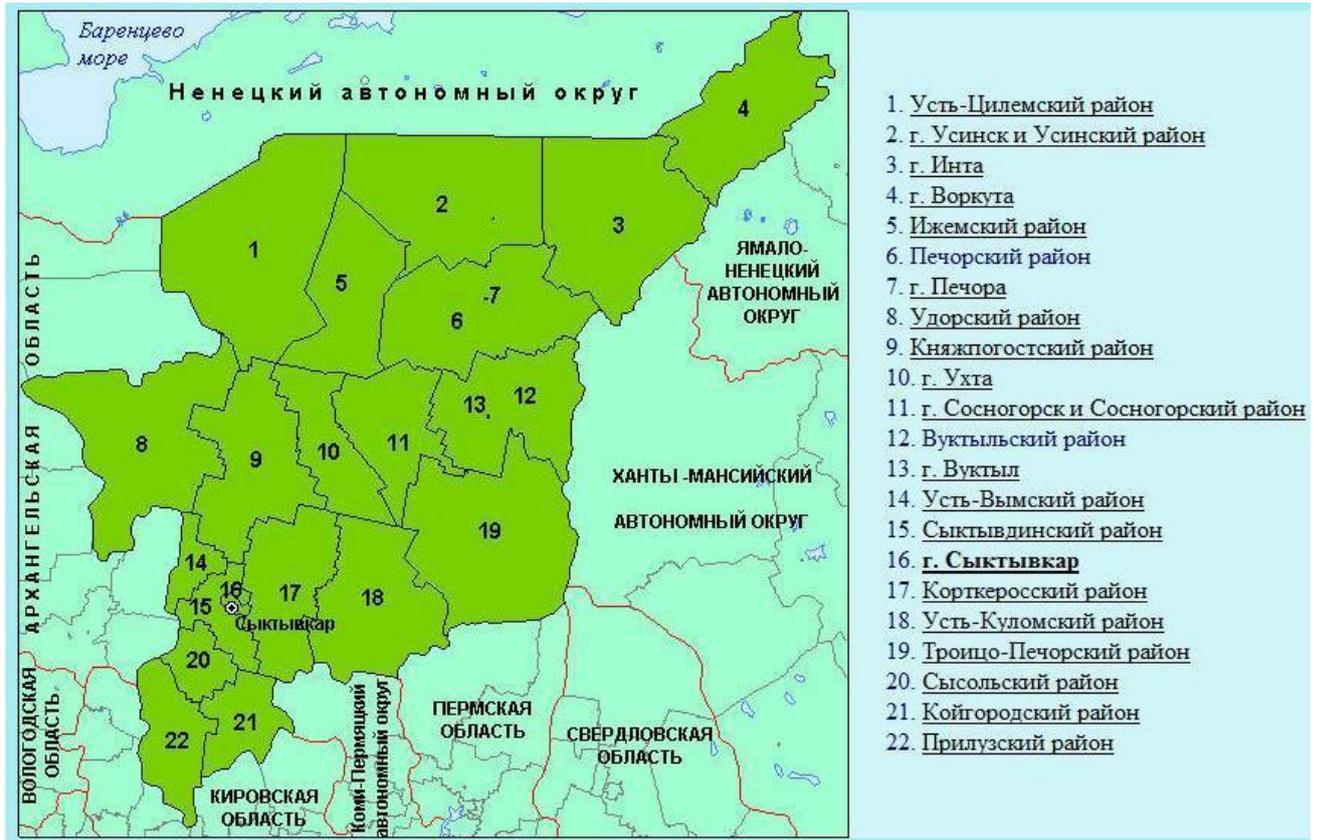


Рисунок В4 – Административно-территориальное деление Республики Коми

Источник: <http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/northern/komi-republic/komi.htm>

В результате получена следующая численность населения N(код города) (в тыс. чел), которая отнесена к каждому из рассматриваемых городов Северо-Западного ФО:

$N(\text{АМД}) = 0,6$	$N(\text{УСН}) = 14,223 + 51,406 + 20,038 = 85,7$
$N(\text{ВГД}) = 1227,8$	$N(\text{УХТ}) = 127,1 + 49,8 + 16,0 = 192,9$
$N(\text{ВКТ}) = 116,9$	$N(\text{ПЛК}) = 1637,7 + 4571,2 + 657,6 + 693,1 = 7559,6$
$N(\text{КЛД}) = 937,4$	$N(\text{СЫВ}) = 968,2 - 116,9 - 119,4 - 85,7 - 192,9 = 453,3$
$N(\text{ННР}) = 42,0 - 0,6 = 41,4$	$N(\text{АПХ}) = 13,1 + 56,2 + 18,3 + 62,2 + 33,2 + 6,4 = 189,4$
$N(\text{ПСК}) = 713,4$	$N(\text{КТС}) = 20,1 + 33,9 + 15,8 + 14,5 + 22,3 + 72,4 + 42,8 + 11,9 = 233,7$
$N(\text{МУН}) = 850,9 - 189,3 = 661,6$	
$N(\text{ПЧР}) = 62,8 + 40,0 + 16,6 = 119,4$	
$N(\text{АРХ}) = 1271,8 - 42,0 - 233,7 = 996,1$	

В.3) Южный ФО

В Южном ФО население отнесено к рассматриваемым городам, находящимся в данном ФО, в соответствии с распределением административно-территориальных единиц между этими городами следующим образом:

- В Краснодарском крае (рисунок В5):

СОЧ (Сочи): Туапсинский р-н, г. Туапсе, г. Сочи;

АНА (Анапа): Темрюкский р-н, Анапский р-н, г. Анапа, Новороссийский р-н, Крымский р-н, г. Крымск;

КПА (Краснодар): остальное населения Краснодарского края (в том числе г. Геленджик)
+ население Республики Адыгея.

(При рассмотрении аэропорта в городе Геленджик – ГДЖ: г. Геленджик и Новороссийский р-н.)

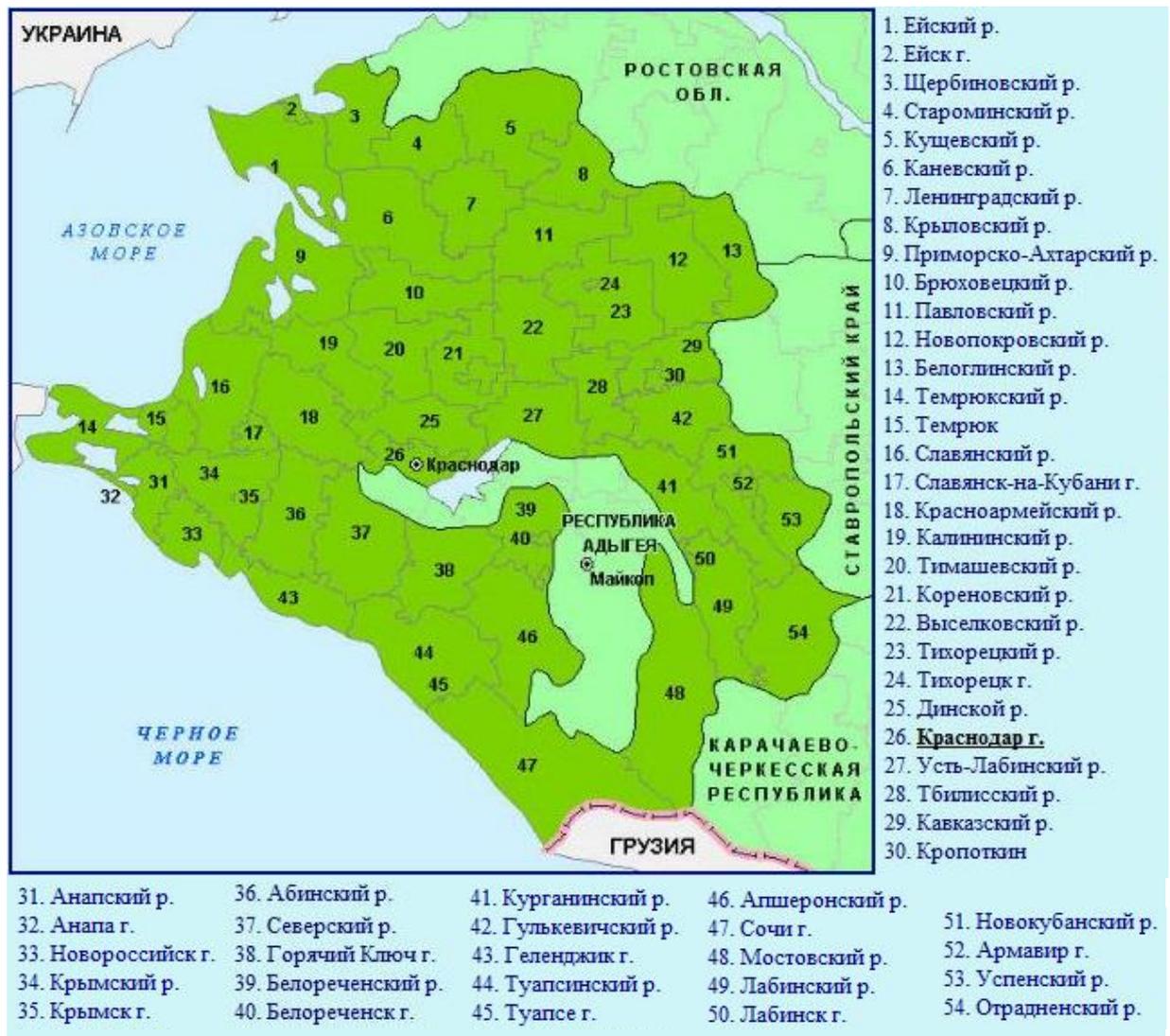


Рисунок В5 – Административно-территориальное деление Краснодарского края

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/north-caucasian/krasnodar-territory/krasnodar_krai.htm

- В Ставропольском крае (рисунок В6):

СТВ (Ставрополь): Красногвардейский р-н, Ипатовский р-н, Апанасенковский р-н, Новоалександровский р-н, Изобильненский р-н, Труновский р-н, Петровский р-н, Туркменский р-н, Шпаковский р-н, г. Ставрополь, Грачевский р-н, Благодарненский р-н, Арзгирский р-н, Кочубеевский р-н, Невинномысск, Андроповский р-н, Александровский р-н, Новоселицкий р-н + население Карачаево-Черкесской Республики;

МРВ (Минеральные Воды): остальное население Ставропольского края + население Республики Ингушетия.

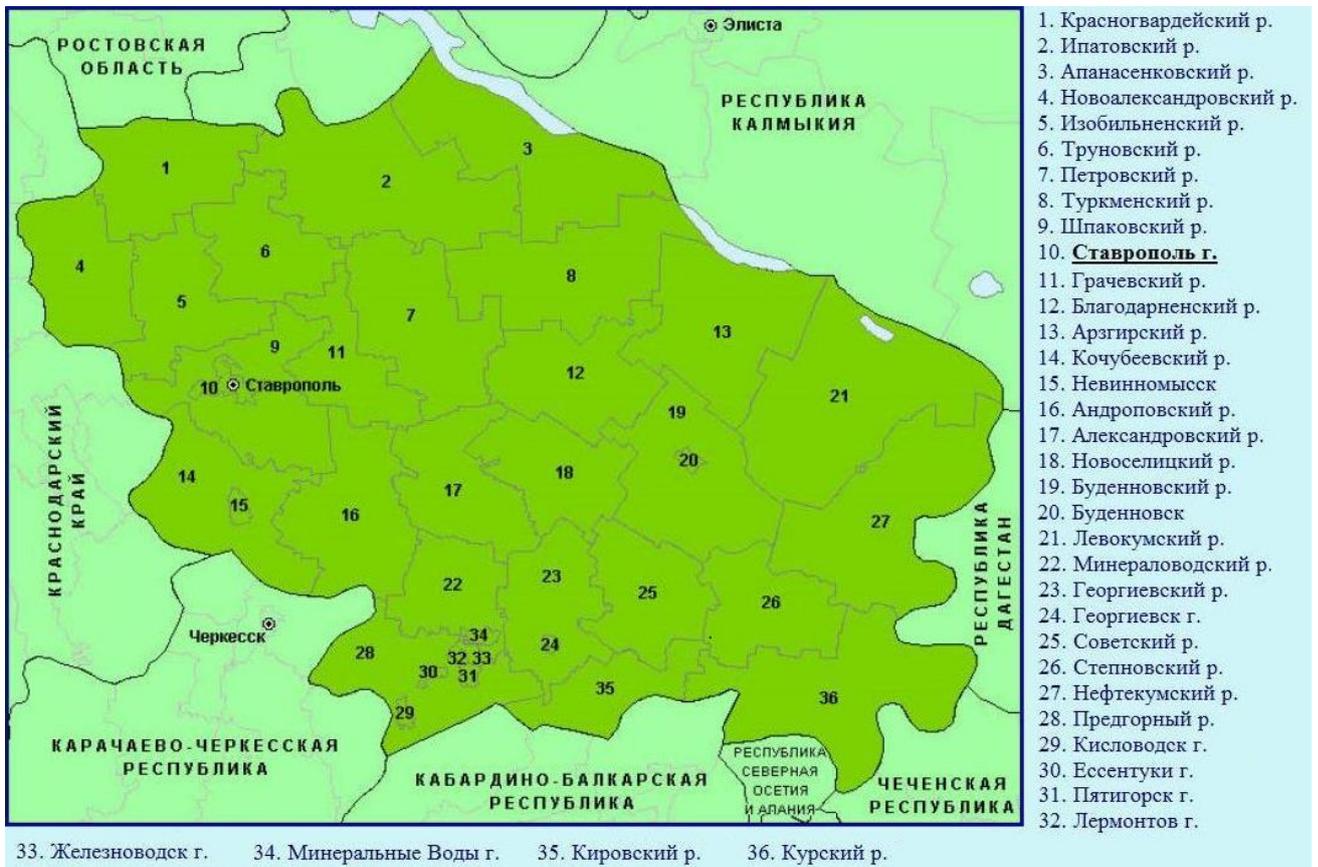


Рисунок В6 – Административно-территориальное деление Ставропольского края

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/north-caucasian/stavropol-territory/stavropol_krai.htm

- В Ростовской области (рисунок В7):

ВЛД (Волгодонск): Морозовский р-н, Константиновский р-н, Цимлянский р-н, Мартыновский р-н, Волгодонский р-н, г. Волгодонск, Пролетарский р-н, Орловский р-н, Зимовниковский р-н, Дубовский р-н, Заветинский р-н, Ремонтненский р-н;

РОВ (Ростов-на-Дону): остальное население области.



Рисунок В7 – Административно-территориальное деление Ростовской области

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/north-caucasian/rostov-region/rostov_obl.htm

- Население города Грозный (ГРН) присоединено к населению города Махачкала (МХЧ). (При рассмотрении аэропорта в городе Грозный – ГРН: г. Грозный.)

В результате получена следующая численность населения N(код города) (в тыс. чел), которая отнесена к каждому из рассматриваемых городов Южного ФО:

N(АСР) =994,1	N(КПА) =5121,8-664,0-533,1+
N(ВГГ) =2620,0	+441,2=4365,9
N(ВЛА) =701,4	N(АНА) =116,3+71,9+65,7+281,1+
N(НЧК) =891,3	+72,3+56,7 =664,0
N(ЭЛИ) =287,2	N(ВЛД) =45,2+35,6+35,0+38,5+
N(РОВ) =4254,4-531,4=3723,0	+32,0+169,6+35,5+40,7+38,1+
N(МХЧ) =N(МХЧ)+N(ГРН)=	+22,7+17,8+20,7=531,4
=2658,6+1183,7= 3842,3	N(СТВ) =40,0+65,8+34,5+64,3+100,0+
N(МРВ) =2705,0-1363,1+	+34,4+79,3+26,3+111,6+363,9+
+499,5=1841,4	+35,9+63,6+26,9+77,0+129,1+
N(СОЧ) =62,6+63,7+406,8=533,1	+34,9+50,1+25,5+427,4= =1790,5

В.4) Приволжский ФО

В Приволжском ФО население отнесено к рассматриваемым городам, находящимся в данном ФО в соответствии с распределением административно-территориальных единиц между этими городами следующим образом:

- В Республике Татарстан (рисунок В8):

НЖК (Нижнекамск): Агрызский р-н, Менделеевский р-н, Мамадышский р-н, Елабужский р-н, Елабуга, Тукаевский р-н, г. Набережные Челны, Мензелинский р-н, Актанышский р-н, Нижнекамский р-н, Нижнекамск, Заинский р-н, г. Заинск, Сармановский р-н, Муслюмовский р-н, Новошешминский р-н, Альметьевский р-н, г. Альметьевск, Азнакаевский р-н, Азнакаево, Черемшанский р-н, Лениногорский р-н, Лениногорск, Бугульминский р-н, Бугульма, Ютазинский р-н, Бавлинский р-н;

ККЗ (Казань): остальное население Республики.

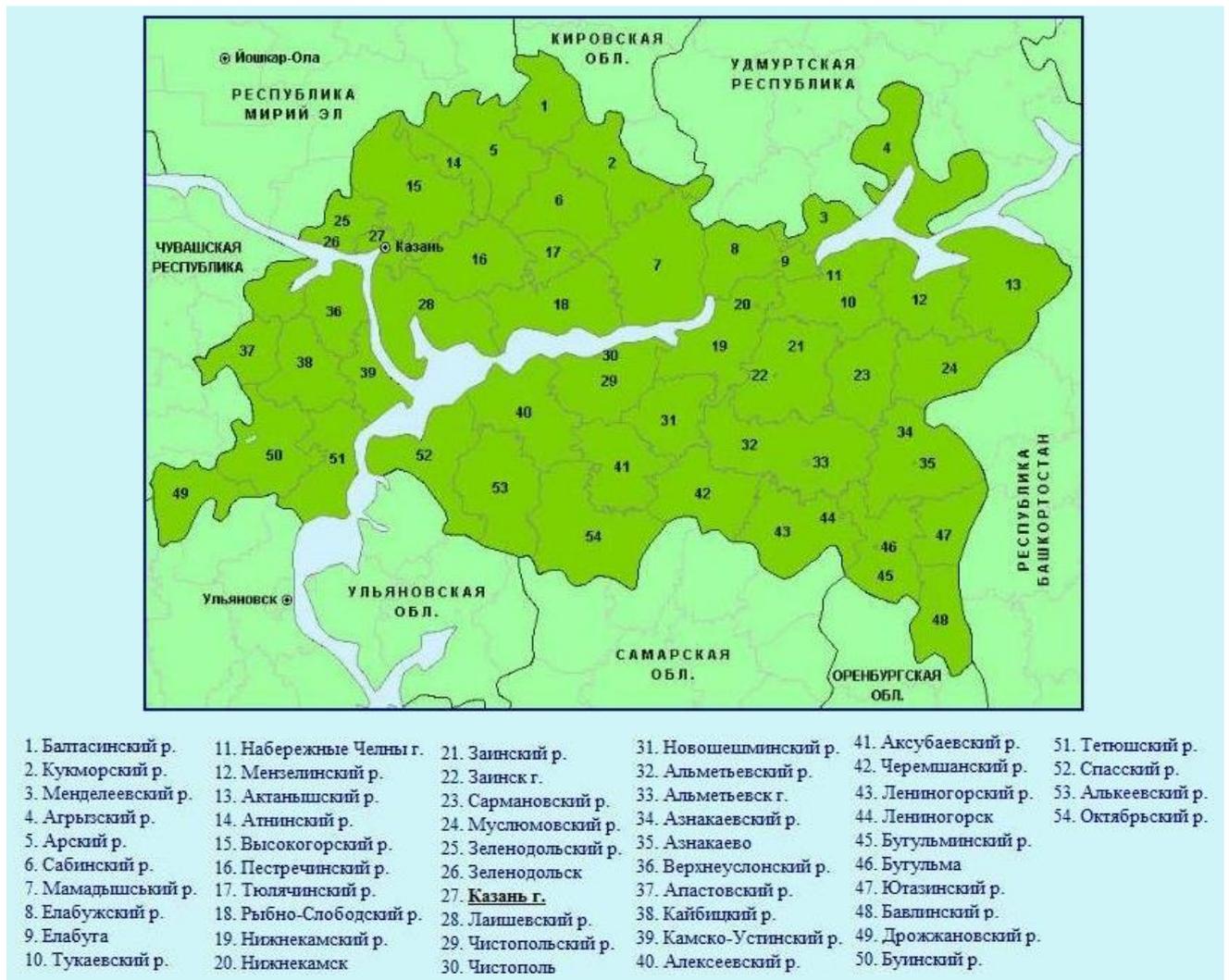


Рисунок В8 – Административно-территориальное деление Республики Татарстан

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/volga/tatarstan-republic/resp_tatarstan.htm

В результате получена следующая численность населения N(код города) (в тыс. чел), которая отнесена к каждому из рассматриваемых городов Приволжского ФО:

N(ИЖВ)	=1537,9	N(СРО)	=2583,8
N(ИШО)	=706,7	N(УЛК)	=1321,7
N(КИО)	=1426,9	N(УФА)	=4051,0
N(НЖС)	=3381,3	N(ЧБЕ)	=1286,2
N(ОНГ)	=2125,5	N(ККЗ)	=3762,8-1712,3=2050,5
N(ПИНА)	=1396,0	N(НЖК)	=36,3+30,4+45,8+10,6+70,0+36,0+506,1+
N(ПРЬ)	=2730,9		+30,0+31,4+38,4+226,4+16,1+42,3+36,8+
N(СКЧ)	=3178,6		+21,9+15,3+51,9+141,959+30,0+34,5+ 21,1+
N(СРН)	=847,7		+23,4+65,8+23,0+90,7+22,8+14,4 = 1712,4

В.5) Уральский ФО

В Уральском ФО население отнесено к рассматриваемым городам, находящимся в данном ФО в соответствии с распределением административно-территориальных единиц между этими городами следующим образом:

- В Ямало-Ненецком автономном округе (рисунок В9):
 - СХД (Салехард): Шурышкарский р-н, Приуральский р-н, г. Лабытнанги, г. Салехард;
 - НДМ (Надым): Надымский р-н, г. Надым;
 - МКМ (Каменный Мыс): Ямальский р-н;
 - НУР (Новый Уренгой): Тазовский р-н, Пуровский р-н, г. Новый Уренгой, Красноселькупский р-н ;
 - НОЯ (Ноябрьск): Муравленко, г. Ноябрьск, г. Губкинский.
- В Ханты-Мансийском автономном округе (рисунок В10):
 - УРА (Урай): Советский р-н, Кондинский р-н, г. Урай, г. Югорск;
 - ХАС (Ханты-Мансийск): г. Ханты-Мансийск, Ханты-Мансийский р-н, Нягань, Октябрьский р-н;
 - РАД (Радужный): Радужный, Нижневартовский р-н;
 - НЖВ (Нижневартовск): Нижневартовск, г. Мегион, г. Лангепас, Покачи;
 - БЛР (Белоярский): Березовский р-н, Белоярский р-н, Белоярский;
 - КОГ (Когалым): г. Когалым, Сургутский р-н;
 - СУР (Сургут): г. Сургут, Нефтеюганский р-н, Нефтеюганск, г. Пыть-Ях.



Рисунок В9 – Административно-территориальное деление Ямало-Ненецкого авт. округа

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/west-siberian/yamal-nenets-ao/neneckij_avt_okr.htm



Рисунок В10 – Административно-территориальное деление Ханты-Мансийского авт. округа

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/west-siberian/khanty-mansi-ao/hantymansi_avt_okr.htm

- В Челябинской области (рисунок В11):

МГС (Магнитогорск): Верхнеуральский р-н, Агаповский р-н, г. Магнитогорск, Нагайбакский р-н, Чесменский р-н, Варненский р-н, Карталинский р-н, Карталы, Кизильский р-н, Брединский р-н, пгт. Локомотивный;

ЧЛБ (Челябинск): остальное население области.

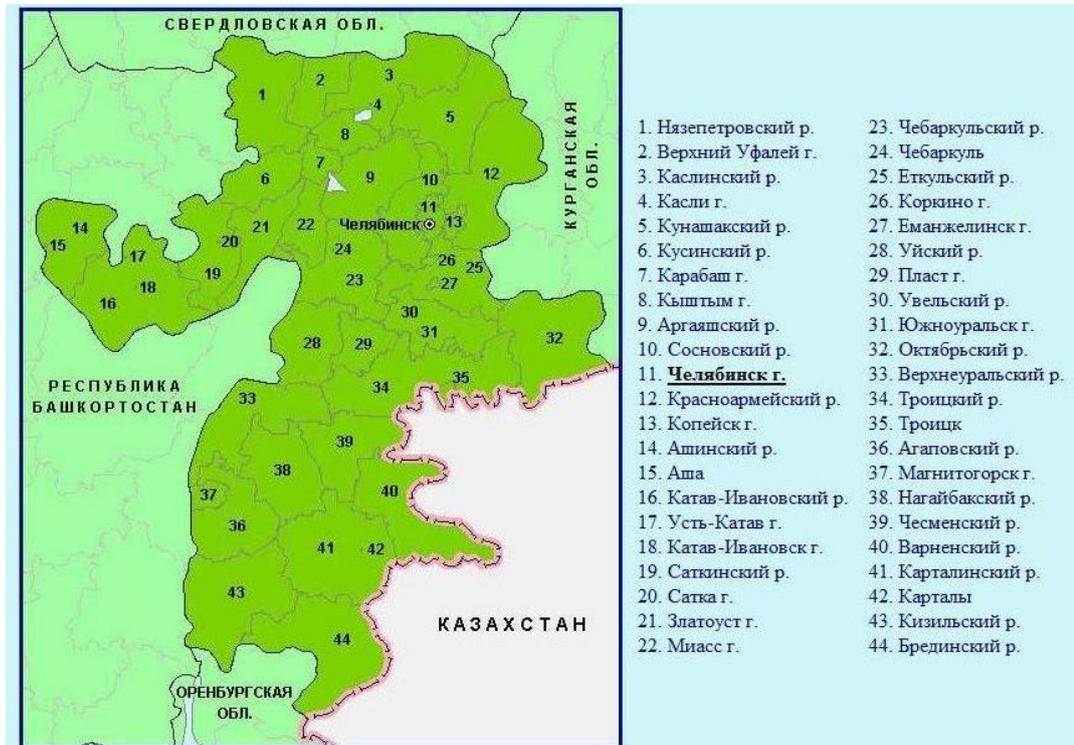


Рисунок В11 – Административно-территориальное деление Челябинской области

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/urals/chelyabinsk-region/chelyabinsk_obl.htm

- Тюменскую область рассматриваем без автономных округов (для г. Тюмень (РЦН)).

В результате получена следующая численность населения N(код города) (в тыс. чел), которая отнесена к каждому из рассматриваемых городов Уральского ФО:

N(КЛЦ) = 4399,8	N(НЖВ) = 243,5+57,7+41,9+ +16,9=359,0
N(КГН) = 969,3	N(НУР) = 17,4+50,0+118,4+6,2=192,0
N(МКМ) = 16,1	N(СУР) = 294,2+46,9+115,7+ +41,6=498,4
N(КОГ) = 59,0+116,0=175,0	N(СХД) = 9,9+8,4+34,6+41,8=94, 7
N(НДМ) = 21,4+48,3=69,7	N(УРА) = 47,4+35,2+43,0+32,4=158,0
N(РАД) = 47,7+34,6=82,3	N(ХАС) = 67,8+16,7+56,1+34,9=175,5
N(ЧЛБ) = 3511,0-865,6=2645,4	N(МГС) = 42,3+35,0+409,0+22,4+
N(БЛР) = 26,8+9,2+20,1=56,1	+20,1+29,0+211,2+28,8+
N(НОЯ) = 37,1+110,4+22,7=170,2	+26,7+31,2+9,9=865,6
N(РЦН) = 3345,1-1488,3-38,6=1318,2	

В.6) Сибирский ФО

В Сибирском ФО население отнесено к рассматриваемым городам, находящимся в данном ФО в соответствии с распределением административно-территориальных единиц между этими городами следующим образом:

- В Иркутской области (рисунок В12):

УСК (Усть-Кут): Усть-Кутский р-н, г. Усть-Кут, Нижнеилимский р-н, Казачинско-Ленинский р-н, Усть-Удинский р-н, Жигаловский р-н, Качугский р-н;

КРН (Киренск): Катангский р-н, Киренский р-н, Мамско-Чуйский р-н, Бодайбинский р-н, Бодайбо;

БРС (Братск): г. Братск, Братский р-н, Чунский р-н, г. Тайшет, Тайшетский р-н, Нижнеудинский р-н, г. Нижнеудинск, Усть-Илимский р-н, Усть-Илимск;

ИКТ (Иркутск): остальное население области.

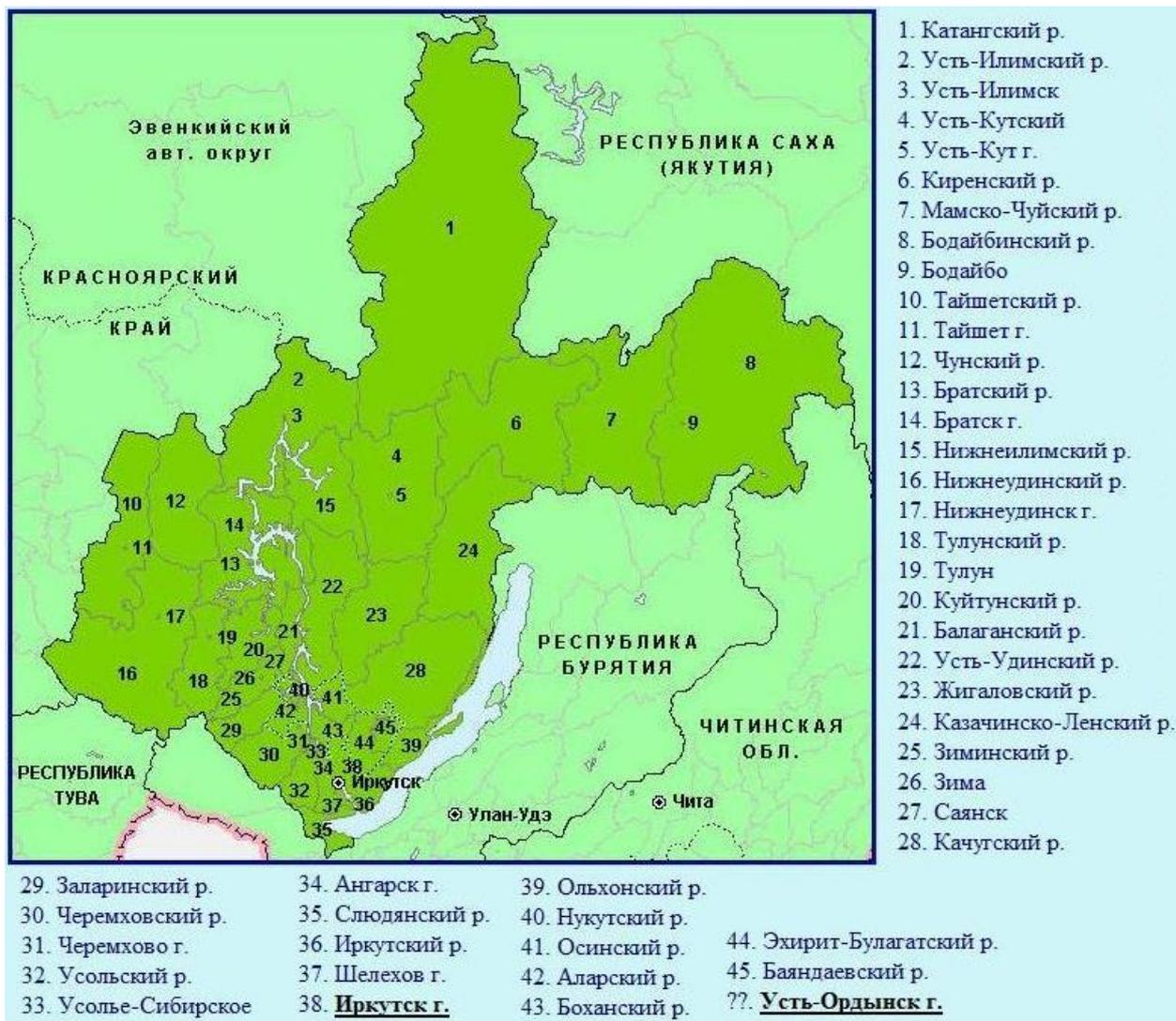


Рисунок В12 – Административно-территориальное деление Иркутской области

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/east-siberian/irkutsk-region/irkutsk_obl.htm

- В Кемеровской области (рисунок В13):

НБК (Новокузнецк): Таштагол, Таштагольский р-н, г. Мыски, г. Осинники, г. Новокузнецк, Новокузнецкий р-н, г. Междуреченск, Междуреченский р-н, г. Прокопьевск, Прокопьевский р-н, г. Киселевск;

КВР (Кемерово): остальное население области.

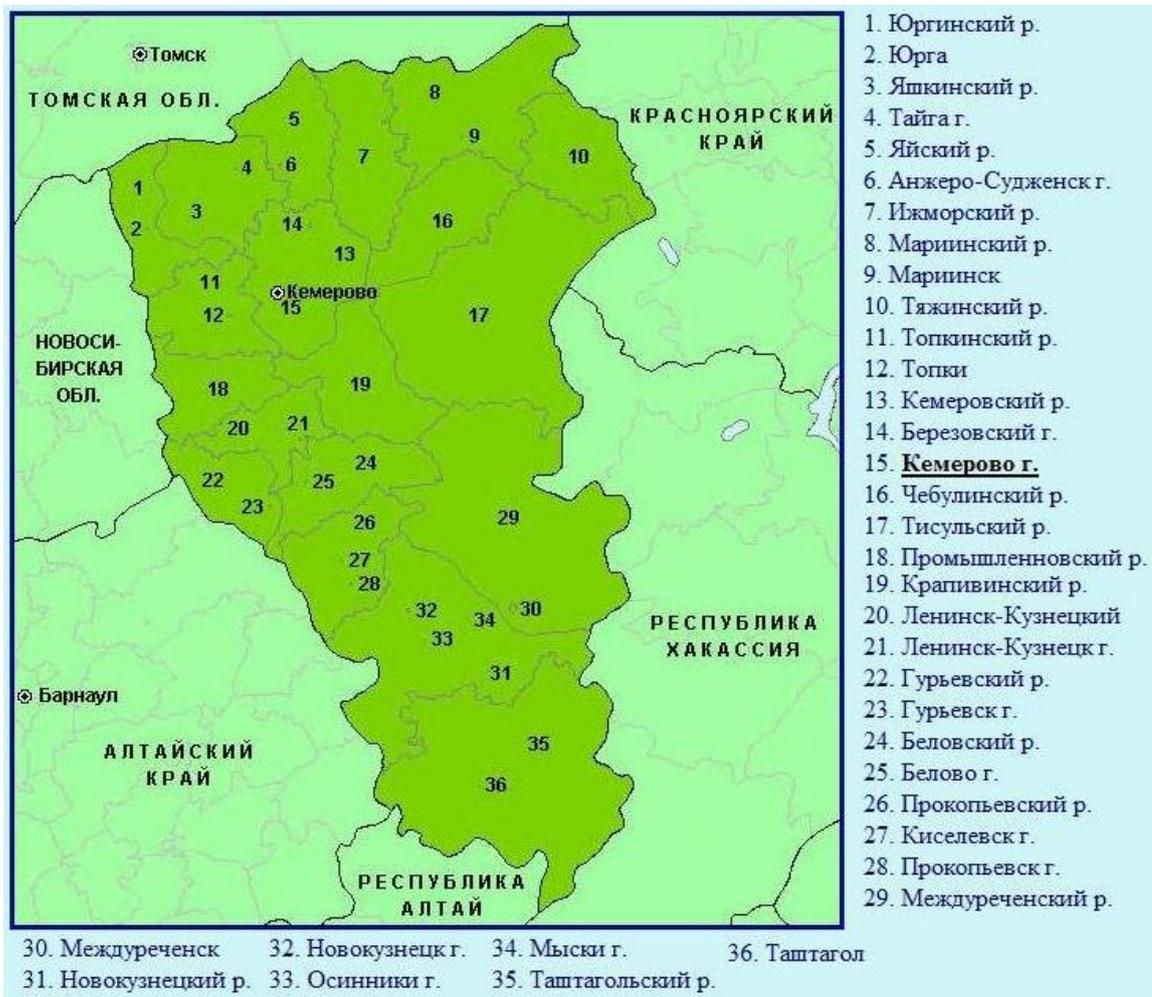


Рисунок В13 – Административно-территориальное деление Кемеровской области

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/west-siberian/kemerovo-region/kemerovsk_obl.htm

- В Красноярском крае (рисунок В14) (рассматриваем без Таймырской автономной области):

ЕНС (Енисейск): Енисейский р-н, г. Енисейск, г. Лесосибирск, Северо-Енисейский р-н, Мотыгинский р-н, Богучанский р-н, Тюхтетский р-н, Илимпейский р-н, Тунгусско-Чунский р-н;

ИГР (Игарка): г. Игарка;

ПТС (Подкаменная Тунгуска): Байкитский р-н, Туруханский р-н (без г. Игарка);

ЕМВ (Красноярск): остальное население края (без Таймырской автономной области и г. Норильска).

- В Таймырской автономной области (рисунок В14):
НАК (Норильск): Усть-Енисейский р-н, г. Дудинка, г. Норильск;
ХАТ (Хатанга): Диксонский р-н, Хатангский р-н

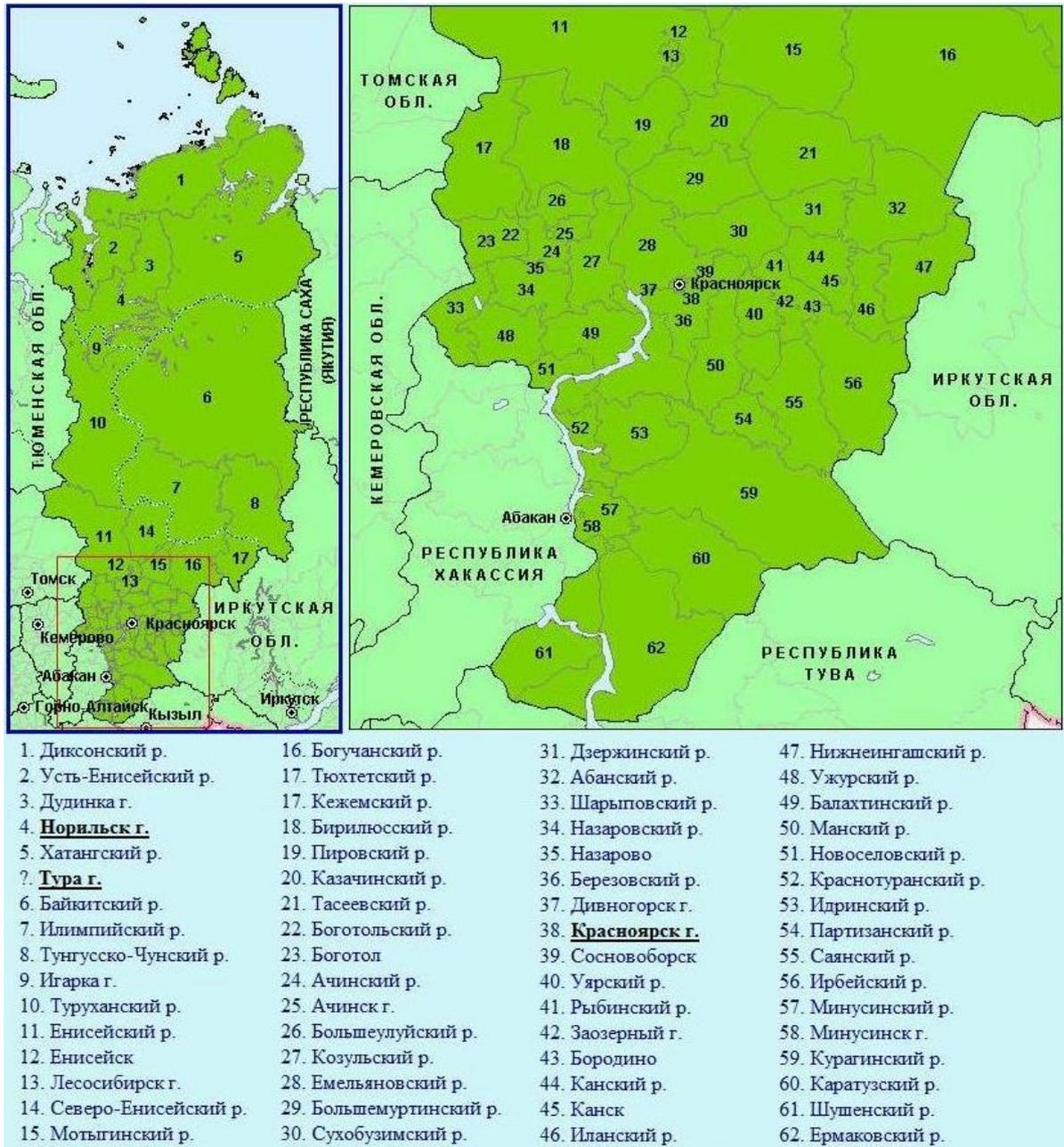


Рисунок В14 – Административно-территориальное деление Красноярского края и Таймырской авт. области

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/east-siberian/krasnoyarsk-territory/krasnoyarsk_krai.htm

- Республика Алтай отнесена к Алтайскому краю (они связаны друг с другом дорогой) - к г. Барнаул (БАН).

- В Томской области (рисунок В15):
СТЖ (Стрежевой): Александровский р-н, г. Стрежевой, Каргасокский р-н;
ТСК (Томск): остальное население области.



Рисунок В15 – Административно-территориальное деление Томской области

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/west-siberian/tomsk-region/tomsk_obl.htm

В результате получена следующая численность населения N(код города) (в тыс. чел), которая отнесена к каждому из рассматриваемых городов Сибирского ФО:

N(АБН) =536,6	N(ИКТ) =2507,7-181,7-57,6-119,3-
N(ИГР) =7,0	-516,3=1632,6
N(КЫЫ) =309,4	N(КРН) =4,3+22,1+6,4+9,7+15,2=57,7
N(НСБ) =2640,7	N(ЕМВ) =2890,3-37,8-213,5-7,0-19,1-
N(ОМС) =2025,6	-207,4=2405,5
N(СХТ) =1122,1	N(УСК) =9,8+45,3+59,6+20,5+16,1+
N(УЛЭ) =960,0	+10,1+20,4=181,8
N(БАН) =2523,3+205,4= =2728,7	N(БРС) =252,0+62,1+40,0+52,1+34,8+
N(КРВ) =2823,5-1239,0=1584,5	+30,7+44,6+21,4+98,0=635,7
N(ПТС) =5,4+20,8-7,0=19,2	N(ЕНС) =27,0+19,1+69,7+ 10,9+18,2+
N(ТСК) =1035,0-77,4=957,6	+ 48,3+ +9,0+7,7+3,6=213,5
N(ХАТ) =0,7+6,5=7,2	N(НБК) =22,9+33,0+44,5+63,2+562,2+
N(НАК) =4,0+26,6+ +207,4=238,0	+51,2+103,8+2,7+214,4+32,7+
N(СТЖ) =9,9+44,5+23,0=77,4	+108,4=1239,0

В.7) Дальневосточный ФО

В Дальневосточном ФО население отнесено к рассматриваемым городам, находящимся в данном ФО в соответствии с распределением административно-территориальных единиц между этими городами следующим образом:

- В Магаданской области (рисунок В16):
 ЧБХ (Чайбуха): Северо-Эвенский р-н;
 МДС (Магадан): остальное население области.



Рисунок В16 – Административно-территориальное деление Магаданской области

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/far-east/magadan-region/magadan_obl.htm

- В Республике Саха (рисунок В17):
 ТСИ (Тикси): Булунский р-н;
 УСМ (Усть-Мая): Усть-Майский р-н;
 АД (Алдан): Алданский р-н;
 ЧКД (Чокурдах): Аллаиховский р-н;
 ЧРС (Черский): Нижнеколымский р-н, Среднеколымский р-н;
 ЛСК (Ленск): Ленский р-н;
 БТГ (Батагай): Усть-Янский р-н, Эвено-Бытантайский национальный р-н,
 Верхоянский р-н;
 ЖИГ (Жиганск): Жиганский р-н;

ОЛК (Олекминск): Олекминский р-н;

НРГ (Нерюнгри): г. Нерюнгри;

ОЛН (Оленек): Анабарский национальный р-н, Оленекский национальный р-н;

ПЛЯ (Полярный): Мирнинский р-н;

ЗНК (Зырянка): Момский нац. р-н, Абыйский р-н, Верхнеколымский р-н;

НЮР (Нюрба): Нюрбинский р-н, Сунтарский р-н, Верхневиллюйский р-н,
Виллюйский р-н;

МИР (Мирный): Мирный;

ЯКТ (Якутск): остальное население Республики.



Рисунок В17 – Административно-территориальное деление Республики Саха

Источник: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/12216>

- В Хабаровском крае (рисунок В18):

КСЛ (Комсомольск-на-Амуре): Солнечный р-н, Амурск, г. Комсомольск-на-Амуре,
Комсомольский р-н;

СОГ (Советская Гавань): Ванинский р-н, г. Советская Гавань, Советско-Гаванский р-н;

ОХТ (Охотск): Охотский р-н, Аяно-Майский р-н;

НЛК (Николаевск-на-Амуре): Тугуро-Чумиканский р-н, им. Полины Осипенко р-н,
Николаевский р-н, г. Николаевск-на-Амуре, Ульчский р-н;

ХБР (Хабаровск): остальное население края + население Еврейской автономной области.



Рисунок В19 – Административно-территориальное деление Чукотской авт. области

Источник: http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/far-east/chukotski-ao/chukotka_obl.htm

В результате получена следующая численность населения N(код города) (в тыс. чел), которая отнесена к каждому из рассматриваемых городов Дальневосточного ФО:

N(АЛД) = 46,7	N(КПМ) = $\frac{1}{2} * 8,2 = 4,1$
N(БГЩ) = 874,6	N(МДС) = $165,8 - 2,8 = 163,0$
N(ВВО) = 2005,9	N(ОЛН) = $4,0 + 4,1 = 8,1$
N(ЖИГ) = 4,0	N(ООЛ) = $\frac{1}{2} * 8,2 = 4,1$
N(ЛСК) = 38,7	N(ОХТ) = $10,5 + 2,8 = 13,3$
N(МИР) = 37,5	N(ПРД) = $4,4 + 4,6 = 9,0$
N(МКО) = 6,8	N(ЧРС) = $5,1 + 7,9 = 13,0$
N(МЩД) = 2,2	N(АНЫ) = $3,9 + 2,6 + 11,9 = 18,4$
N(НРГ) = 87,5	N(БТГ) = $8,7 + 2,8 + 12,3 = 23,8$
N(ОЛК) = 25,4	N(ЗНК) = $4,6 + 4,3 + 4,9 = 13,8$
N(ПЕВ) = 5,7	N(НЮР) = $14,6 + 25,6 + 21,2 + 25,4 = 86,8$
N(ПЛЯ) = 44,7	N(СОГ) = $40,5 + 29,2 + 16,4 = 86,1$
N(ПРЛ) = 347,1	N(КСЛ) = $35,9 + 46,1 + 272,4 + 31,8 = 386,2$
N(ТСИ) = 9,0	N(НЛК) = $2,5 + 6,1 + 12,9 + 25,5 + 22,4 = 69,4$
N(УСМ) = 9,9	N(ХБР) = $1403,7 - 386,2 - 86,1 - 13,2 - 69,4 + 185,5 = 1034,3$
N(ЧБХ) = 2,8	N(ЯКТ) = $951,4 - 9,0 - 9,9 - 46,7 - 3,0 - 13,0 - 38,7 - 23,8 - 4,0 - 25,4 - 87,5 - 8,1 - 44,7 - 13,7 - 86,8 - 37,5 = 499,6$
N(ЧКД) = 3,0	
N(ЮЖХ) = 521,2	