

На правах рукописи

Чистова Наталья Александровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА СОКРАЩЕНИЕ ЦИФРОВОГО  
РАЗРЫВА И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ  
КЛАСТЕРОВ СЕТЕЙ СВЯЗИ С УЛЬТРА МАЛЫМИ ЗАДЕРЖКАМИ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре сетей связи и передачи данных.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Кучерявый Андрей Евгеньевич**

Официальные  
оппоненты: **Колбанев Михаил Олегович,**  
доктор технических наук, профессор,  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра  
информационных управляющих систем,  
профессор кафедры

**Комаров Михаил Михайлович ,**  
кандидат технических наук,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», департамент  
бизнес-информатики Высшей школы бизнеса,  
профессор департамента

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Российский университет дружбы народов» ,  
г. Москва

Защита состоится 24 ноября 2021 года в 14.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте [www.sut.ru](http://www.sut.ru).

Автореферат разослан 24 сентября 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 55.2.004.01,  
д-р техн. наук, доцент

М.А. Маколкина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

**Актуальность темы диссертации.** Происходящие в настоящее время изменения в области сетей и систем телекоммуникаций принципиальным образом влияют не только на архитектуру и предоставляемые услуги сетей связи, но и на развитие экономики в целом. Эти изменения первоначально базировались на концепциях Интернета Вещей и Тактильного Интернета. Первая из концепций изменила представление о числе пользователей сетей связи. В соответствии со стандартами 3GPP (Third Generation Partnership Project) число Интернет вещей на 1 кв. км может составлять до 1 млн устройств. Это привело к необходимости разработки принципов построения сверхплотных сетей, существенно отличающихся от традиционных представлений о сетях связи. При этом появился новый вид взаимодействия на сетях связи устройство-устройство D2D (Device-to-Device), обеспечивающий связь двух и более устройств без участия базовой станции. И это вполне естественное решение не только защищающее ядро сети от избыточного трафика, но и позволяющее уменьшить потери и задержки в сверхплотных сетях.

Еще большее влияние на сети связи оказала концепция Тактильного Интернета. Созданная на основе передовых идей по передаче тактильных ощущений, концепция Тактильного Интернета для обеспечения требуемого уровня качества обслуживания и качества восприятия для пользователей потребовала обеспечить круговую задержку в сетях связи пятого и последующих поколений величиной в 1мс. Это требование привело к принципиальным изменениям в архитектуре сети, поскольку исходя из фундаментальных ограничений по скорости распространения света и особенностей его распространения в волоконно-оптических кабелях по рекомендации МСЭ-Т, оказание услуг Тактильного Интернета с требуемыми параметрами качества обслуживания и качества восприятия оказалось возможным только в круге радиусом в 50км.

Помимо Тактильного Интернета в процессе работ в области сетей связи пятого и последующих поколений появились и иные приложения сетей связи, которые потребовали ультра малых задержек. К ним относятся, например, беспилотные автомобили, дополненная реальность и т.д. Исходя из этого, концепция Тактильного Интернета была преобразована в концепцию сетей связи с ультра малыми задержками, принципиальной особенностью которых стало оказание услуг в пределах ограниченных расстояний, например, в круге радиусом 50км, как это было отмечено выше.

Все это привело к необходимости децентрализации сети и созданию цифровых кластеров, в пределах которых выполняются требования пользователей по качеству обслуживания и качеству восприятия для услуг сетей связи с ультра малыми задержками. При этом, естественно, что для предоставления услуг в центре цифрового кластера должен быть образован центр обработки данных (ЦОД), а число этих ЦОД на территории Российской Федерации составит тысячи единиц.

Как видим, такие принципиальные изменения в построении сетей связи приводят к децентрализации сети, которая в свою очередь, создает предпосылки для

децентрализации экономики. Это может привести к реальному сокращению цифрового разрыва между регионами Российской Федерации, что является приоритетной задачей программы цифровой экономики. Роль сетей связи в создании цифровой экономики в настоящее время недооценена, но именно сети связи с ультра малыми задержками создают реальные условия для сокращения цифрового разрыва. Для оценки влияния сетей связи с ультра малыми задержками на сокращение цифрового разрыва следует найти меру цифрового разрыва между регионами Российской Федерации с точки зрения информатизации и связи, отражающую взаимосвязь между Валовым Региональным Продуктом и этой мерой.

Исходя из сказанного, тема диссертационной работы, посвященная исследованию влияния на цифровой разрыв между регионами Российской Федерации сетей связи с ультра малыми задержками и разработке методов формирования цифровых кластеров для этих сетей представляется актуальной.

**Степень разработанности темы.** В области сетей связи с ультра малыми задержками, включая Тактильный Интернет, существует ряд работ отечественных и зарубежных ученых В.М. Вишневого, Б.С. Гольдштейна, В.Г. Карташевского, А.Е. Кучерявого, А.И. Парамонова, К.Е. Самуйлова, В.К. Сарьяна, С.Н. Степанова, В.О. Тихвинского, В.И. Блануцы, А.С. Бородина, Ю.В. Гайдамаки, Р.В. Киричка, Е.А. Кучерявого, М.А. Маколкиной, Д.А. Молчанова, А.С.А. Мутханни, А.А.А. Ateya, G.P. Fettweis, M. Dohler, M. Maier, Z. Li, M. Uusitalo, H. Shariatmadari, V. Singh, P. Popovski и других.

Отмеченные выше работы внесли весомый вклад в исследования в области сетей связи с ультра малыми задержками, включая Тактильный Интернет. Однако до настоящего времени практически отсутствовали работы, в которых оценивалось бы влияние появления сетей связи с ультра малыми задержками на сокращение цифрового разрыва между территориями, что является одной из основных задач реализации программы построения цифровой экономика. Кроме того, в настоящее время уже требуется разработка методов построения сетей связи с ультра малыми задержками, что в условиях ограничений по расстояниям, на которых могут предоставляться услуги этих сетей, приводит к децентрализации сети и образованию цифровых кластеров. Все это в целом и определяет цель, задачи, объект и предмет диссертационной работы.

**Объект и предмет диссертации.** *Объектом* исследования являются сети связи с ультра малыми задержками, а *предметом* – влияние сетей связи с ультра малыми задержками на цифровой разрыв между регионами Российской Федерации и методы формирования цифровых кластеров на этих сетях.

**Цель и задачи диссертации.** *Цель* диссертационной работы состоит в исследовании влияния внедрения сетей связи с ультра малыми задержками на сокращение цифрового разрыва между регионами Российской Федерации и разработка методов формирования цифровых кластеров при внедрении этих сетей.

Указанная цель достигается путем решения в диссертационной работе следующих задач:

- анализ принципов построения и предоставляемых пользователям услуг сетей связи с ультра малыми задержками,
- анализ взаимосвязи Валового Регионального Продукта на душу населения и числа, занятых в области информатизации и связи (на 100 тысяч занятых во всех областях деятельности),
- типизация регионов Российской Федерации по возможностям внедрения услуг сетей связи с ультра малыми задержками,
- разработка прогноза развития трафика для сетей связи с ультра малыми задержками на горизонте планирования до 2030 года,
- разработка метода определения динамического распределения точек предоставления услуг (центров обработки данных) при внедрении сетей связи с ультра малыми задержками,
- разработка модели и метода формирования цифровых кластеров сетей связи пятого и последующих поколений на основе качества предоставления услуг,
- разработка метода выбора размеров цифровых кластеров в сети с ультра малыми задержками с учетом трассы прокладки кабеля и фрактальной размерности дорожной сети.

**Научная новизна.** Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

- Предложено в качестве меры цифрового разрыва между территориями Российской Федерации использовать число занятых в области информатизации и связи на 100 тысяч занятых во всех областях деятельности.
- В отличие от известных результатов установлена взаимосвязь между Валовым Региональным Продуктом на душу населения и числом занятых в области информатизации и связи на 100 тысяч занятых во всех областях деятельности, коэффициент корреляции при этом равен  $k = 0,667$ .
- Для сокращения цифрового разрыва между регионами Российской Федерации в отличие от существующих подходов предлагается обеспечить опережающее развитие сетей связи с ультра малыми задержками, что приведет к созданию тысяч цифровых кластеров с центрами обработки данных в областных и районных центрах и может обеспечить сокращение цифрового разрыва между регионами в несколько раз.
- В отличие от известных результатов на основании данных о средних расстояниях между сельскими населенными пунктами и районными центрами, а также районными и областными центрами Российской Федерации, проведена типизация Федеральных Округов по способам построения сетей связи с ультра малыми задержками и возможностям по оказанию услуг этих сетей.
- На основе ассоциативного метода с использованием эволюционного алгоритма получен прогноз доли пользователей услуг сетей связи с ультра малыми задержками на горизонте планирования до 2030 года, который показывает, что доля пользователей таких услуг к 2030 году превысит 60%.

– Разработан метод формирования цифровых кластеров сетей связи пятого и последующих поколений на основе качества предоставления услуг, отличающийся от известных тем, что при формировании цифрового кластера учтены плотность пользователей, а также одновременное предоставление услуг Тактильного Интернета и услуг дополненной реальности.

– Для решения задачи размещения ЦОД при неравномерном распределении пользователей по территории предложен модифицированный алгоритм FOREL, отличающийся от известных тем, что область допустимых положений центра цифрового кластера ограничена множеством  $M$ . Это позволяет добиться того, чтобы точки предоставления различных услуг совпадали, что дает возможность сокращения протяженности линий связи в цифровом кластере.

– Разработан метод выбора размера цифрового кластера в сети с ультра малыми задержками, отличающийся от известных тем, что учитывается длина трассы прокладки кабеля на основе оценки фрактальной размерности дорожной сети на территории кластера, что позволяет оценить степень отличия трасс прокладки кабеля от прямых линий и определить значение длины, на которое необходимо уменьшить радиус планируемого цифрового кластера.

**Теоретическая и практическая значимость диссертации.** *Теоретическая* значимость диссертационной работы состоит, прежде всего, в выявлении взаимосвязи между Валовым Региональным Продуктом и числом занятых в области информатизации и связи (на 100 тысяч занятых во всех областях деятельности), при этом опережающее развитие сетей связи с ультра малыми задержками, что приведет к созданию тысяч цифровых кластеров с центрами обработки данных в областных и районных центрах и может обеспечить сокращение цифрового разрыва между регионами в несколько раз. Разработанные методы формирования цифровых кластеров расширяют представления о построении сетей связи с ультра малыми задержками с учетом масштабного внедрения услуг дополненной реальности, а также увязывают размеры цифрового кластера с фрактальными характеристиками дорожной сети, поскольку прокладка трасс кабеля осуществляется, как правило, вдоль дорог.

*Практическая* значимость диссертационной работы состоит в создании методики определения размера цифрового кластера на основе данных о дорожной сети в районе размещения цифрового кластера и ее фрактальной размерности и требований по круговой задержке для планируемых к внедрению услуг сетей связи с ультра малыми задержками. Методика реализована в виде алгоритма оценки размера цифрового кластера.

Полученные в диссертационной работе результаты использованы в ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке «Методики определения размера цифрового кластера при проектировании сетей связи с ультра малыми задержками» и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ) при чтении лекций и проведении практических

занятий по курсам «Интернет Вещей и самоорганизующиеся сети» и «Современные проблемы науки в области инфокоммуникаций», а также при выполнении НИР по теме «Разработка моделей и методов организации сетей связи 2030 для цифровой экономики».

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы системного анализа, теории телетрафика, теории фракталов, математической статистики.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Валовой Региональный Продукт на душу населения в существенной степени зависит от числа занятых в области информатизации и связи (на 100 тысяч занятых во всех областях деятельности), коэффициент корреляции при этом равен  $k = 0,667$ .

2. Для сокращения цифрового разрыва между регионами Российской Федерации требуется опережающее развитие сетей связи на основе концепции сетей с ультра малыми задержками, что приведет к созданию тысяч цифровых кластеров с центрами обработки данных в областных и районных центрах и может обеспечить сокращение цифрового разрыва между регионами в несколько раз.

3. Метод формирования цифровых кластеров сетей связи пятого и последующих поколений на основе качества предоставления услуг с учетом плотности пользователей, одновременного предоставления услуг Тактильного Интернета и услуг дополненной реальности, который дает возможность выбора размера цифрового кластера с учетом трафика пользователей и позволяет интегрировать цифровые кластеры различных размеров в единую сеть электросвязи.

4. Метод выбора размера цифрового кластера в сети с ультра малыми задержками с учетом длины трассы прокладки кабеля на основе оценки фрактальной размерности дорожной сети на территории цифрового кластера, что позволяет оценить степень отличия трасс прокладки кабеля от прямых линий и определить значение длины, на которое необходимо уменьшить радиус планируемого цифрового кластера (для реальных значений фрактальной размерности до более, чем в 2 раза).

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность основных результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата, обсуждением результатов диссертационной работы на международных конференциях и семинарах, публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и российских конференциях и семинарах: BRICS Forum on Networks Innovation, October 29-30, 2020, Shenzhen, China. МИИТ, China Academy of Information and Communications Technology (CAICT), Российско-Вьетнамском ИКТ Форуме, Москва – Ханой, Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, 30 марта 2021г., конференции NEW2AN 2020 Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, август 2020г., С.-Петербург, IX и X Международных научно-технических и научно-методических конференциях «Актуальные проблемы инфокоммуникаций в науке и образовании»

АПИНО (Санкт-Петербург, 2020, 2021), семинарах кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

**Публикации по теме диссертации.** Всего по теме диссертации опубликовано 7 работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, 1 статья в рецензируемых изданиях, входящих в международные базы данных SCOPUS и WoS (Q2), 2 статьи в других изданиях.

**Соответствие паспорту специальности.** Содержание диссертации соответствует пп. 3, 11, 12 и 14 паспорта специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

**Личный вклад автора.** Основные результаты диссертации получены автором самостоятельно.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работы изложена на 123 страницах и включает введение, 4 главы, заключение, список сокращений, приложение и список литературы, состоящий из 158 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, приведены цель и задачи диссертационной работы, перечислены основные научные результаты диссертации, определена научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов, приведены сведения об опубликованных работах и выступлениях на конференциях и семинарах, представлены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертационной работы проведен анализ развития сетей связи и их влияния на развитие цифровой экономики в целом, на основе которого сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Отмечается, что определяющей концепцией дальнейшего развития сетей связи стала концепция сетей связи с ультра малыми задержками. Основанная на концепции Тактильного Интернета, эта концепция еще не получила в достаточной степени реализацию на сетях связи пятого поколения и лежит в основе создания перспективных сетей связи шестого поколения и сетей 2030.

Сети связи с ультра малыми задержками в соответствии с фундаментальными ограничениями по скорости распространения света приводят к децентрализации сети и создают предпосылки для решения одной из главных задач Цифровой экономики – сокращения цифрового разрыва между регионами Российской Федерации.

Однако, несмотря на достигнутые в настоящее время концептуальные успехи в выбранном направлении диссертационной работы, отсутствует не только понимание как построить децентрализованную сеть 2030 в целом, но и основополагающие подходы к решению задач по ядру сети, сетям доступа, распределенным вычислениям, новым приложениям, методам расчета и распределения ресурсов в такой сети, кодированию, обеспечению устойчивости и надежности такой сети, информационной



безопасности, требованиям по качеству обслуживания и качеству восприятия. В диссертации предлагается решение научной задачи по созданию цифровых кластеров в сетях связи с ультра малыми задержками и оценки влияния этих сетей на сокращение цифрового разрыва между регионами Российской Федерации.

В диссертационной работе спрогнозирована доля пользователей услуг сетей связи с ультра малыми задержками и трафика на горизонте планирования до 2030 года.

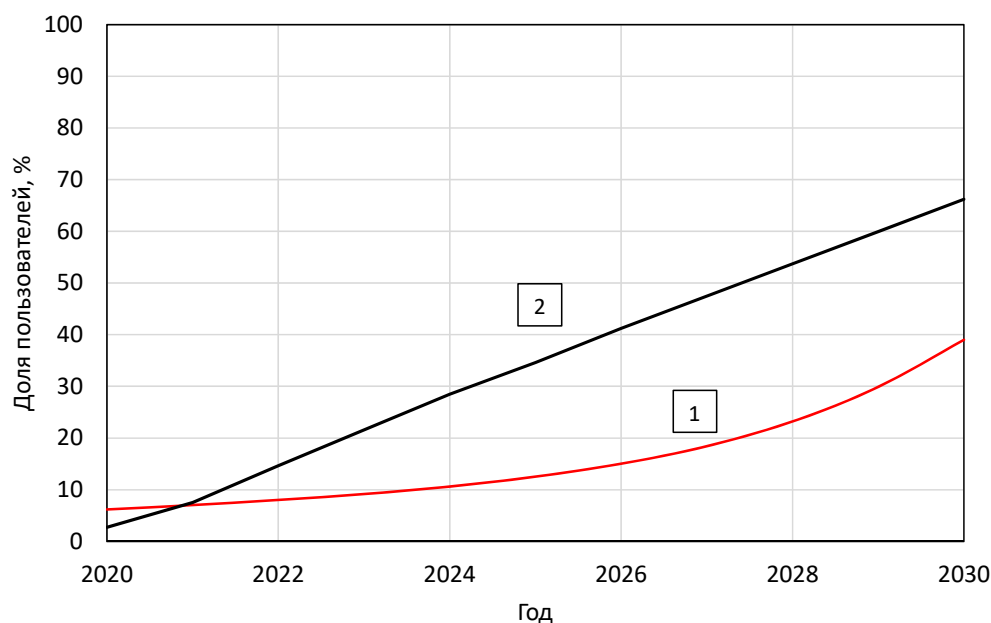


Рисунок 1 – Обобщенный прогноз изменения доли пользователей услуг сетей связи с ультра малыми задержками в Российской Федерации (2), с учетом пользователей услуг дополненной реальности (1)

Как видно из приведенного прогноза (рисунок 1), доля потенциальных пользователей услуг сетей связи с ультра малыми задержками в соответствии с приведенным прогнозом к 2030 году составит более 60%, что позволяет говорить о широкомасштабном внедрении таких услуг.

**Вторая глава диссертации** посвящена характеристике цифрового разрыва между территориями Российской Федерации и возможностям его сокращения за счет информатизации и связи.

Как было отмечено ранее, одной из главных задач создания эффективной цифровой экономики является уменьшение цифрового разрыва между различными регионами государства. Именно децентрализация сети при внедрении сетей связи с ультра малыми задержками может быть эффективным инструментарием для уменьшения цифрового разрыва, поскольку тысячи центров обработки данных для обеспечения функционирования таких сетей потребуют высококвалифицированного персонала, что, естественно, должно привести к росту Валового Регионального Продукта (ВРП) для тех регионов, где такие центры будут развернуты.

На основании статистического анализа в диссертационной работе предложено в качестве меры цифрового разрыва между территориями Российской Федерации

использовать число занятых в области информатизации и связи на 100 тысяч занятых во всех областях деятельности.

Более того, установлена взаимосвязь между Валовым Региональным Продуктом на душу населения и числом занятых в области информатизации и связи (на 100 тысяч занятых во всех областях деятельности).

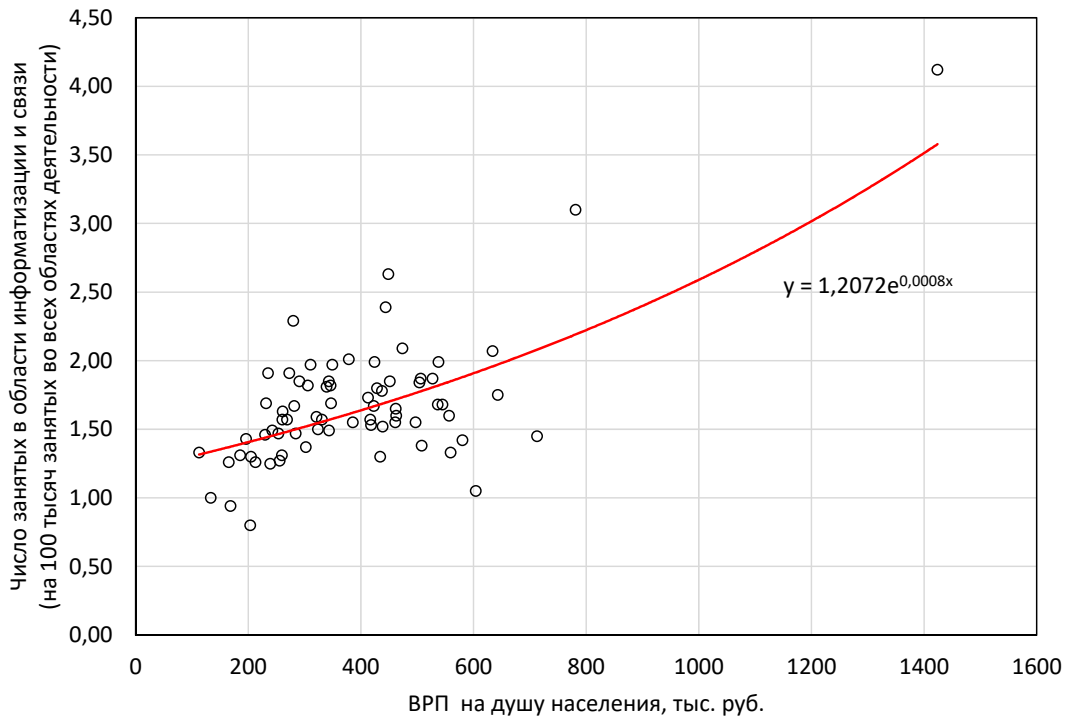


Рисунок 2 – Аппроксимация статистических данных экспоненциальной функцией

Как видно из рисунка 2 цифровой разрыв является весьма существенным и в большой степени зависит от числа занятых в области информатизации и связи, что позволяет определить область информатизации и связи в обществе как ключевую для сокращения цифрового разрыва между территориями Российской Федерации.

Рассчитанный коэффициент корреляции, равный  $k=0,667$ , говорит о возможности существенного сокращения цифрового разрыва в условиях перераспределения ресурсов между регионами в области информатизации и связи.

Такая задача может быть решена при приоритетном и опережающем развитии сетей связи с ультра малыми задержками, внедрение которых приведет к созданию тысяч центров обработки данных. Последнее потребует их установки во всех областных и районных центрах. При этом устойчивое функционирование этих центров возможно только при наличии специалистов с высшим образованием, что, в свою очередь, требует ускоренного развития специализирующихся на подготовке кадров в области информатизации и связи университетов.

Определено, что для сетей связи с ультра малыми задержками характерна кластеризация с учетом ограничения по расстоянию, на котором могут оказываться услуги таких сетей с заданными требованиями по качеству обслуживания и качеству восприятия.

На основании статистических данных по средним расстояниям между сельскими населенными пунктами и районными центрами и между районными и областными центрами в диссертационной работе проведена типизация Федеральных округов Российской Федерации.

Выделено три группы Федеральных округов, для которых построение сетей связи с ультра малыми задержками будет существенно различаться по структуре сети и размещению центров обработки данных для обеспечения требований по качеству обслуживания и качеству восприятия при предоставлении услуг таких сетей.

**В третьей и четвертой главах** диссертационной работы исследуются методы формирования и выбора размеров цифровых кластеров сетей связи пятого и последующих поколений на основе анализа современных требований к структуре сетей со стороны услуг и выбору метода ее построения с учетом особенностей дорожной инфраструктуры целевого региона.

**В третьей главе** предложена модель, позволяющая выбрать размер цифрового кластера сети с учетом требований к качеству обслуживания абонентского трафика и распределения пользователей по территории, которая дает возможность формировать структуру сети цифровых кластеров, учитывающую различные требования и трафик пользователей, а также разработан метод формирования цифровых кластеров сетей связи пятого и последующих поколений на основе качества предоставления услуг с учетом плотности пользователей и одновременного предоставления услуг Тактильного Интернета и услуг дополненной реальности,

Известно, что основной задачей при построении сети связи является решение компромисса между абонентским трафиком (спросом на услугу), качеством его обслуживания и объемом ресурсов сети связи. Поскольку сеть строится на некоторой территории, то при решении этой задачи также необходимо учитывать и географические особенности, которые зачастую играют решающую роль и определяют структуру сети.

Основными параметрами качества для современных услуг связи являются вероятностно-временные показатели обслуживания трафика.

При разработке модели сети с учетом требований по ультра малым задержкам будем полагать, что основным параметром, характеризующим качество услуги, является задержка доставки данных  $\tau$ . Ее величина зависит от многих факторов. Во-первых, от размера той единицы количества (объема) данных, о передаче которой идет речь, и скорости передачи данных по линии связи для каждого из участков маршрута, если маршрут состоит из нескольких участков. Во-вторых, от вероятных задержек в узлах маршрута, связанных с ожиданием в буфере из-за занятости линии передачей очередного пакета данных. В-третьих, от времени распространения сигнала между участниками обмена данными.

Учитывая сказанное можно записать

$$\tau = \bar{t} + \bar{W} + t_p \quad (1)$$

где  $\bar{t} = \bar{L} / \bar{b}$  – среднее время передачи;  $\bar{L}$  – средний объем передаваемых данных;  $\bar{b}$  – средняя скорость передачи;  $\bar{w}$  – среднее время ожидания;  $t_p$  – время распространения сигнала.

Для маршрута при некоторых допущениях среднюю величину задержки можно оценить как сумму задержек для каждого из участков

$$T = \sum_{i=1}^k \tau_i, \quad (2)$$

где  $\tau_i$  задержка для  $i$ -го участка.

Сделаем допущение о том, что сеть между пользователем и точкой предоставления услуги состоит из двух участков: участка доступа и соединительной линии с точкой предоставления услуги. Структура модели сети приведена на рисунке 3.

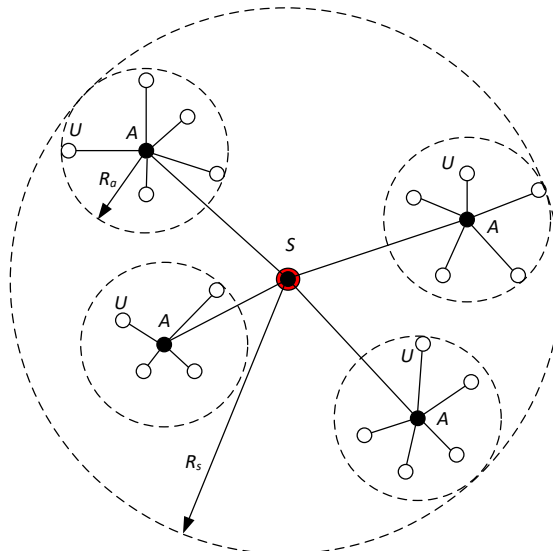


Рисунок 3 – Структура сети

Модель включает в себя пользователей услуг  $U$ , точки доступа  $A$  и точки предоставления услуги  $S$ . Принятые допущения таковы, что точки доступа соединены с точкой предоставления услуги линиями связи, длина которых равна длине отрезка прямой, проходящей через соответствующие точки. Максимальное расстояние от пользователя до точки доступа равно  $R_a$ , максимальное расстояние от точки предоставления услуги до точки доступа  $R_s$ . Тогда максимальное расстояние, преодолеваемое сигналом, составит:

$$d_{\max} = R_s + R_a \quad (3)$$

при сделанных выше допущениях

$$R_a \ll R_s. \quad (4)$$

При указанном выше допущении расстояние между пользователем и точкой предоставления услуги можно принять равным  $R_a$ .

Время распространения сигнала определяется скоростью распространения света в среде передачи. Полагаем, что между точкой доступа и точкой предоставления услуги используется оптоволоконная линия связи. Тогда с учетом рекомендации:

$$t_p = t_o R_S, \quad (5)$$

где  $t_o$  задержка при распространении на единицу длины.

Время распространения в соответствии с рекомендациями МСЭ-Т  $t_o = 5$  мкс/км.

Также сделаем допущение о том, что пользователи распределены по территории случайным образом и их распределение может быть описано пуассоновским полем.

Тогда вероятность попадания  $n$  пользователей в зону обслуживания может быть рассчитана по формуле:

$$p_n = \frac{(\pi R_s^2 \eta)^n}{n!} e^{-\pi R_s^2 \eta} \quad (6)$$

где  $\eta$  – плотность пользователей на территории ( $1/\text{м}^2$ ).

Число пользователей в зоне обслуживания составит:

$$\nu = \pi R_s^2 \eta. \quad (7)$$

Интенсивность заявок (потока) в зоне обслуживания:

$$\lambda = \lambda_0 \nu, \quad (8)$$

где  $\lambda_0$  – интенсивность заявок, создаваемая одним пользователем.

В дальнейших расчетах будем использовать для оценки задержки (для одного участка сети) приближенное решение Крамера и Лангенбах-Бельца для системы GI/G/1.

Учет распределения пользователей по территории необходим при планировании сетей в Российской Федерации, поскольку плотность населения на различных территориях изменяется в пределах от 0,07 до около 5000 человек на  $\text{км}^2$ .

Использование предложенной модели и дифференцированной оценки размеров цифровых кластеров для услуг с различными требованиями к задержке дает возможность формировать структуру сетей связи пятого и последующих поколений, а именно выбирать позиции и размер цифровых кластеров для различных услуг на основе концепции сетей связи с ультра малыми задержками.

При планировании размещения цифровых кластеров в сетях связи пятого и последующих поколений для услуг с жесткими требованиями к величине задержки необходимо наряду с задержкой, вносимой временем распространения сигнала,

учитывать величину интенсивности трафика, которая пропорциональна плотности населения.

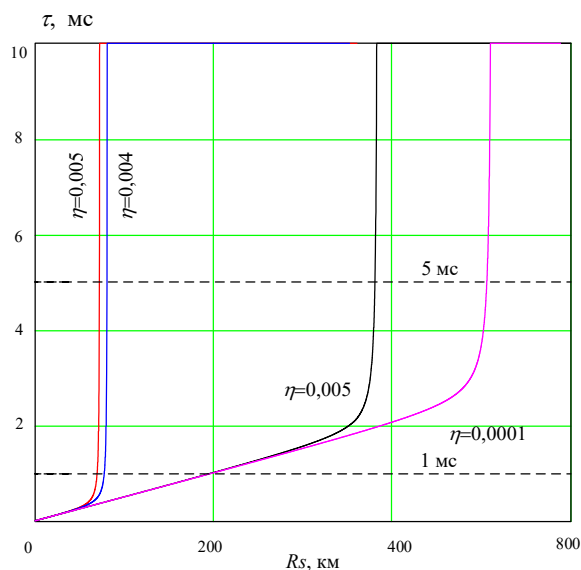


Рисунок 4 – Зависимость задержки от радиуса цифрового кластера

Вполне ожидаемо, что для городов с высокой плотностью населения величине  $R_s$  будет значительно меньше, чем для населенных пунктов с малой плотностью населения (рисунок 4).

Ввиду того, что различные виды услуг имеют различные требования к величине задержки доставки данных целесообразно решать задачу выбора размера цифрового кластера для каждой такой группы услуг. В этом случае структура сети должна содержать точки предоставления услуг (серверы), дифференцированные по различным группам услуг (рисунок 5).

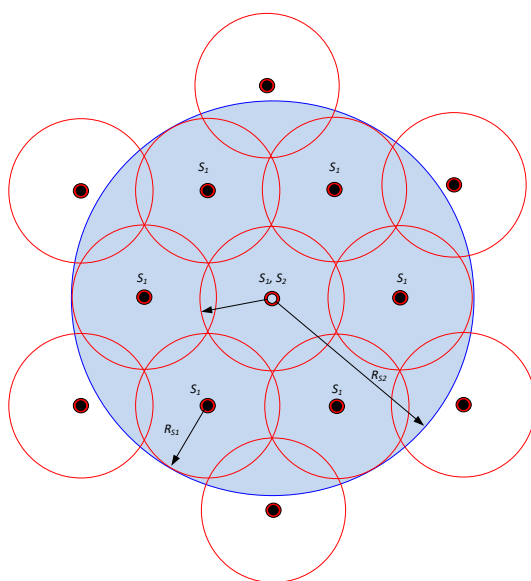


Рисунок 5 – Пример структуры цифровых кластеров для двух услуг сетей uRLLC

Такой подход применим в случае, когда требуется построить сеть на территории с равномерным распределением пользователей. Однако в практических задачах требуется покрытие некоторого количества точек (пользователей, зданий, населенных пунктов и т.п.).

Данную задачу можно сформулировать как задачу оптимизации, в которой требуется обеспечить минимальное покрытие заданного количества точек цифровыми кластерами (кругами). Аналитического решения данной задачи не известно.

Для решения данной задачи в диссертационной работе предлагается использование модифицированного алгоритма кластеризации FOREL. Модификация состоит в том, что область допустимых положений центра цифрового кластера ограничена множеством  $M$ . Данная модификация позволяет добиться того, чтобы точки предоставления различных услуг, по возможности, совпадали, что дает возможность сокращения протяженности линий связи.

В четвертой главе разработан метод выбора размера цифрового кластера в сети с ультра малыми задержками с учетом длина трассы прокладки кабеля на основе оценки фрактальной размерности дорожной сети на территории кластера, который позволяет оценить степень отличия трасс прокладки кабеля от прямых линий и определить значение длины, на которое необходимо уменьшить радиус планируемого цифрового кластера.

В реальных условиях расстояние между центром и элементом кластера определяется не по прямой (рисунок 6а), а возможной трассой прокладки кабеля. При этом чаще всего прокладка трассы осуществляется вдоль имеющихся дорог.

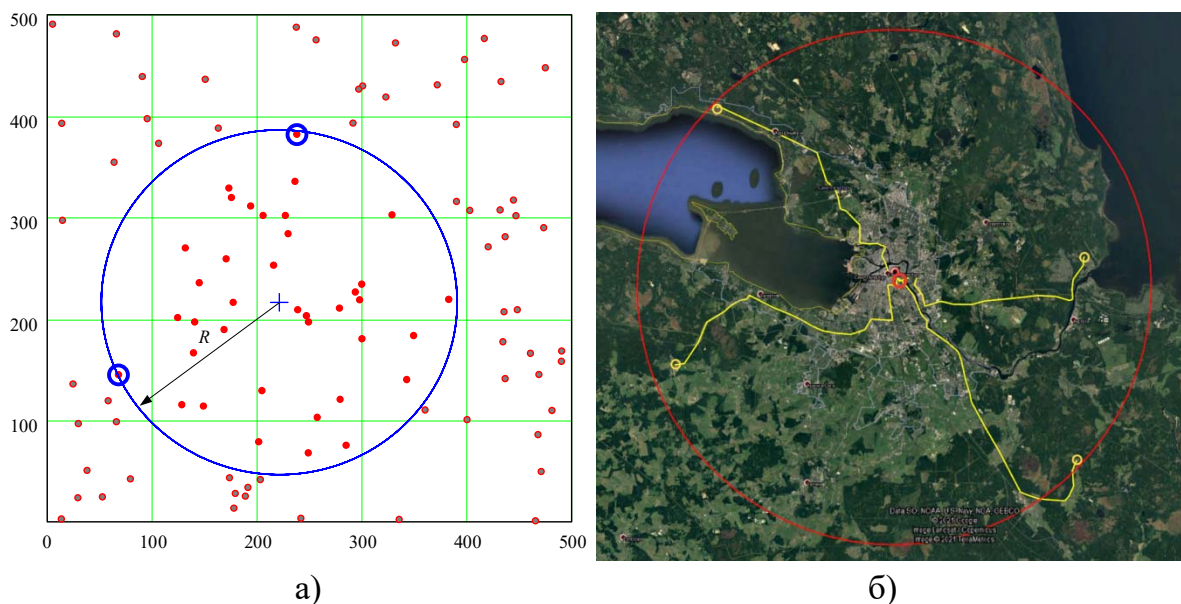


Рисунок 6 – Пример кластеризации при использовании FOREL

На рисунке 6б приведен возможный пример выбора трасс на карте местности (получено с помощью Google Earth). Как видно из примера, длина трассы может

существенно отличаться от длины отрезка прямой, соединяющих центр и элементы кластера.

При разработке метода выбора размера цифрового кластера будем полагать, что трассы прокладки кабеля между точкой предоставления услуги и оконечными узлами (элементами кластера) пролегают вдоль дорог, т.е. в общем случае трасса прокладки кабеля не лежит на прямой, проведенной через эти точки. Очевидно, что в таком случае длина реальной трассы  $L_T$  будет не менее длины отрезка прямой  $L_0$ , проходящей через соединяемые точки

$$L_T \geq L_0 . \quad (9)$$

Будем также полагать, что сеть дорог достаточно развита, а трасса прокладки кабеля все же стремится к прямой между точками, а не «петляет» бесконечно в пределах кластера, например, подобно фрактальной линии. Такое допущение возможно в силу того, что точки в данной модели совпадают с населенными пунктами, каждый из которых достигим маршрутом конечной длины.

Если  $L_{max}$  это допустимая длина трассы, определяемая на основе требований ко времени распространения сигнала, то должно выполняться условие  $L_T \leq L_{max}$ . Радиус предполагаемого кластера также должен быть меньше этой величины (рисунок 7).

$$R \leq L_{max} . \quad (10)$$

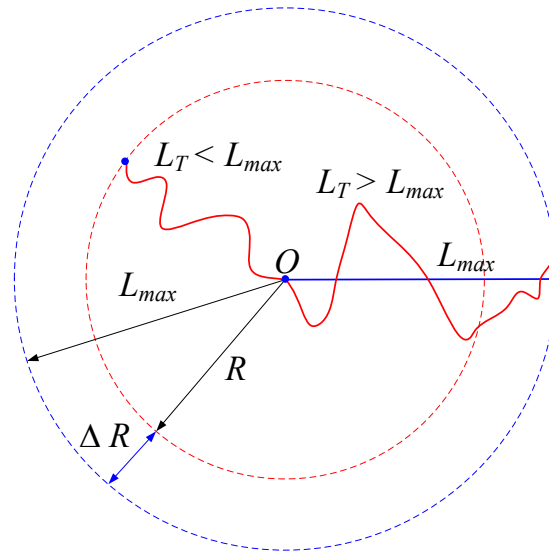


Рисунок 7– Модель кластера

Для определения величины  $R$ , которая обеспечит выполнение этих условий, будем исходить из предположения, что увеличение длины трассы пропорционально фрактальной размерности дорог на территории предполагаемого кластера:

$$\Delta L = L_T - L_0 \propto D \quad (11)$$



В (11)  $D$  – фрактальная размерность. Если  $L_0 = L_{\max}$ , то  $\Delta L = \Delta R$ .

Связь между длиной линии и размером элемента покрытия:

$$L \propto \frac{1}{\tau^D}, \quad (12)$$

Введем в выражение (12) переменную  $a$ , чтобы перейти к знаку равенства:

$$L = \frac{a}{\tau^D}. \quad (13)$$

Как известно, для прямой линии ФР  $D=1$ , тогда на базе выражения (13) можно записать систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} a\tau^{-1} = R \\ a\tau^{-D} = L_{\max} \end{cases}. \quad (14)$$

В данной системе  $R$  – это искомый радиус кластера,  $L_{\max}$  – допустимая длина трассы,  $D$  – фрактальная размерность,  $a$  – неизвестна переменная.

Первое уравнение в системе записано для отрезка прямой, соединяющей центр кластера с точкой на его границе, т.е. отрезка, длина которого равна радиусу. Поэтому показатель степени  $\tau$  составляет минус 1, т.е. равен фрактальной размерности прямой.

Второе уравнение записано для линии, которую представляет собой трасса с фрактальной размерностью  $D$ . При этом длина трассы равна максимально допустимой длине  $L_{\max}$ .

Решение этой системы уравнений выглядит следующим образом:

$$R(D) = L_{\max} \tau^{D-1} \quad (15)$$

В выражении (15)  $\tau$  – размер элемента покрытия.

Диапазон изменения фрактальной размерности выбран от 1 до 2, что соответствует возможным значениям для линий, т.е. от прямой до линии заполняющей всю плоскость. Как видно из приведенного рисунка 8, с увеличением фрактальной размерности радиус кластера уменьшается. Особо стоит отметить роль величины  $\tau$  в этой зависимости.

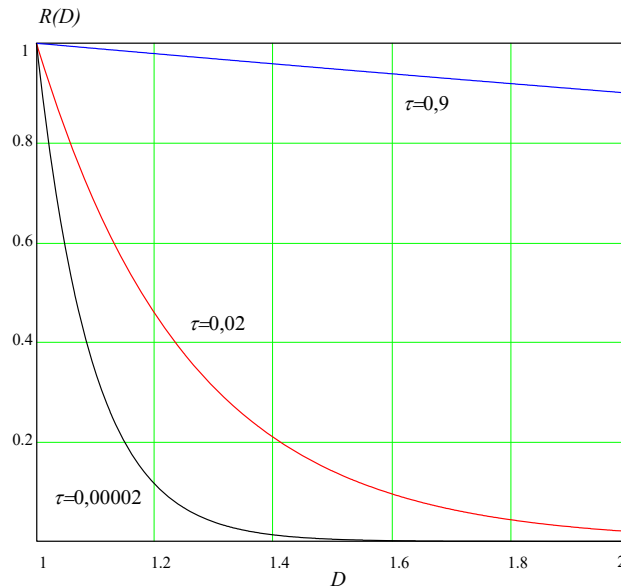


Рисунок 8 – Зависимость радиуса кластера от фрактальной размерности

Естественно, что существенные для практики приложения должны оперировать значениями  $\tau$  между этими границами. Иными словами, для конкретной задачи необходимо определить такую величину  $\tau$ , которая соответствует реальным возможностям и потребностям. В рамках данной задачи целесообразно производить выбор  $\tau$ , исходя из допустимой ошибки оценки величины задержки.

Если допустимая ошибка при оценке задержки составляет  $\Delta t$ , то это будет соответствовать величине допустимой ошибки по расстоянию равной

$$d = \Delta t C, \quad (16)$$

где  $C$  – скорость распространения света (м/с).

Тогда  $\tau$  целесообразно выбрать исходя из величины  $d$ , поскольку это размер «измерителя», а ошибка при этом равна  $1/2$  этой величины. При этом:

$$\tau = \frac{2d}{L_0}. \quad (17)$$

Например, при  $L_0 = 50000$  м,  $\Delta t = 1$  мкс  $d \approx 600$  м, а  $\tau \approx 0,012$ , при  $\Delta t = 10$  мкс,  $d \approx 6000$  м, а  $\tau \approx 0,12$ .

Для этих случаев приведены зависимости на рисунке 9.

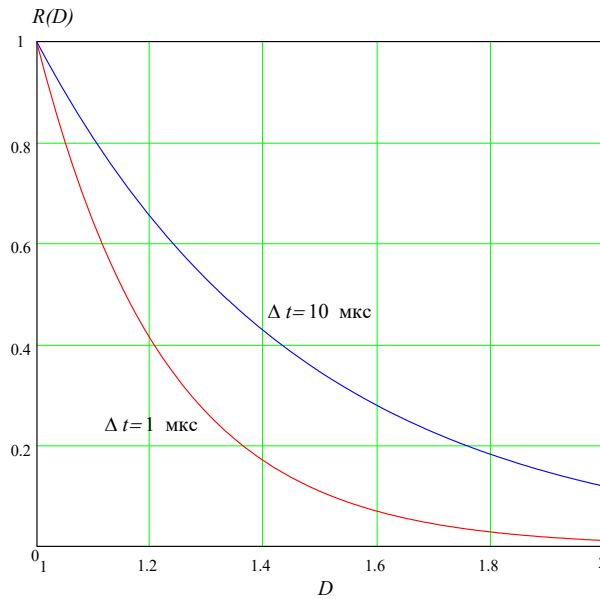


Рисунок 9 – Зависимости радиуса кластера от фрактальной размерности (при допустимой ошибке оценки задержки 1 и 10 мкс)

Как видно из приведенного графика, в таком случае при реальных значениях фрактальной размерности (1-1,3), размер кластера может быть более чем вдвое меньше допустимой длины линии  $L_{\max}$ .

Следует отметить, что избыточность длины трасс предполагается неизменной при изменении размера (радиуса) кластера, также, как и фрактальная размерность сети дорог. При неравномерном распределении свойств дорог внутри исходного кластера после корректировки его размеров длина трасс может оказаться заниженной или завышенной. Для уменьшения этой ошибки целесообразно производить оценку фрактальной размерности в кластере до и после корректировки размера и принимать в качестве целевого значения усредненное значение фрактальной размерности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе были получены следующие основные результаты:

1. Анализ перспектив развития сетей связи пятого и последующих поколений показал, что концепции Интернета Вещей и Тактильного Интернета определили тенденции развития сетей связи на горизонте планирования до 2030 года. При этом концепция Тактильного Интернета стала основой для появления сетей связи с ультра малыми задержками. Сети связи с ультра малыми задержками в соответствии с фундаментальными ограничениями по скорости распространения света приводят к децентрализации сети и создают предпосылки для сокращения цифрового разрыва между регионами Российской Федерации.

2. На основе ассоциативного метода с использованием эволюционного алгоритма получен прогноз доли пользователей услуг сетей связи с ультра малыми задержками на горизонте планирования до 2030 года, который показывает, что доля пользователей таких услуг к 2030 году превысит 60%.

3. На основании статистического анализа предложено в качестве меры цифрового разрыва между территориями Российской Федерации использовать число занятых в области информатизации и связи на 100 тысяч занятых во всех областях деятельности.

4. В отличие от известных результатов установлена взаимосвязь между Валовым Региональным Продуктом на душу населения и числом занятых в области информатизации и связи (на 100 тысяч занятых во всех областях деятельности), коэффициент корреляции при этом равен  $k=0,667$ ,

5. Для сокращения цифрового разрыва между регионами Российской Федерации в отличие от существующих подходов предлагается обеспечить опережающее развитие сетей связи с ультра малыми задержками, что приведет к созданию тысяч цифровых кластеров с центрами обработки данных в областных и районных центрах и может обеспечить сокращение цифрового разрыва между регионами в несколько раз.

6. В отличие от известных результатов на основании данных о средних расстояниях между сельскими населенными пунктами и районными центрами, а также районными и областными центрами Российской Федерации, проведена типизация Федеральных Округов по способам построения сетей связи с ультра малыми задержками и возможностям по оказанию услуг этих сетей,

7. Устойчивое функционирование сетей связи с ультра малыми задержками и соответствующих центров обработки данных возможно только при наличии специалистов с высшим образованием, что требует ускоренного развития специализирующихся на подготовке кадров в области информатизации и связи университетов.

8. Предложена модель, позволяющая выбрать размер цифрового кластера сети с учетом требований к качеству обслуживания абонентского трафика и распределения пользователей по территории, которая дает возможность формировать структуру сети цифровых кластеров, учитывающую различные требования и трафик пользователей.

Учет распределения пользователей по территории необходим при планировании сетей в Российской Федерации, поскольку плотность населения на различных территориях изменяется в пределах от 0,07 до около 5000 человек на км<sup>2</sup>.

9. Использование предложенной модели и дифференцированной оценки размеров цифровых кластеров для услуг с различными требованиями к задержке дает возможность формировать структуру сетей связи пятого и последующих поколений, а именно выбирать позиции и размер цифровых кластеров для различных услуг на основе концепции сетей связи с ультра малыми задержками.

10. Разработан метод формирования цифровых кластеров сетей связи пятого и последующих поколений на основе качества предоставления услуг, отличающийся от известных тем, что при формировании цифрового кластера учтены плотность пользователей, а также одновременное предоставление услуг Тактильного Интернета и услуг дополненной реальности,

11. Для решения задачи размещения ЦОД при неравномерном распределении пользователей по территории предложен модифицированный алгоритм FOREL, отличающийся от известных тем, что область допустимых положений центра цифрового кластера ограничена множеством  $M$ . Это позволяет добиться того, чтобы точки предоставления различных услуг совпадали, что дает возможность сокращения протяженности линий связи в цифровом кластере.

12. При выборе размеров цифровых кластеров сети с ультра малыми задержками следует учитывать особенности прокладки линий связи между точкой предоставления услуги и точками подключения пользователей. Эта особенность, как правило, заключается в том, что трасса прокладки линий связи проходит вдоль существующих дорог. Поэтому, структура существующей дорожной сети оказывает влияние на выбор трасс для прокладки линий связи. С учетом данной особенности длина линии связи в большинстве случаев оказывается больше расстояния между соединяемыми точками. Для цифрового кластера это приводит к завышению величины задержки относительно целевых значений.

13. Разработан метод выбора размера цифрового кластера в сети с ультра малыми задержками, отличающийся от известных тем, что учитывается длина трассы прокладки кабеля на основе оценки фрактальной размерности дорожной сети на территории кластера, что позволяет оценить степень отличия трасс прокладки кабеля от прямых линий и определить значение длины, на которое необходимо уменьшить радиус планируемого цифрового кластера (для реальных значений фрактальной размерности до более, чем в 2 раза).

14. Для компенсации неравномерности свойств дорожной сети, которая может отразиться на занижении или завышении размера кластера, целесообразно производить оценку фрактальной размерности для исходного и скорректированного размеров кластеров, а для окончательной оценки размера кластера использовать усредненное значение фрактальной размерности.

**СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ****Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях**

1. Чистова Н.А. Метод формирования цифровых кластеров сетей пятого и последующих поколений на основе качества предоставления услуг / Н.А. Чистова, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2020. – №7. – С.22-28.
2. Чистова, Н.А. Методы определения динамического распределения точек предоставления услуг и прогнозирования трафика для сетей связи с ультра малыми задержками. / Н.А. Чистова // Электросвязь. – 2020. – № 12. – С. 32-36.
3. Чистова Н.А., Парамонов А.И., Выборнова А.И., Кучерявый А.Е. Метод выбора размеров цифровых кластеров сетей связи с ультра малыми задержками. Электросвязь. – 2021. – № 4. – С. 43-48.
4. Чистова Н.А., Бородин А.С., Кучерявый А.Е. Сети связи как основа сокращения цифрового разрыва между регионами Российской Федерации. – Электросвязь. – 2021. – № 8. – С. 27-29.

**Научные статьи, опубликованные в изданиях,  
индексируемых в международных базах данных**

5. Chistova N. The method of forming the digital clusters for fifth and beyond telecommunication networks structure based on the quality of service / N. Chistova, A. Paramonov, M. Makolkina, A. Koucheryavy // LNCS, Springer. 20 th NEW2AN, LNCS 12525, 26-28, August, 2014. Pp. 59-70

**Научные статьи, опубликованные в других изданиях**

6. Чистова Н.А. Анализ технико-экономических последствий внедрения сетей связи с ультрамалыми задержками / Н.А. Чистова, А.Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2018. – Т.6. – №4. – С.53-60.
7. Чистова, Н.А. Сети связи с ультрамалыми задержками и цифровой разрыв в Российской Федерации / Н.А. Чистова, А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2021. – Т.6, № 4. – С. 5-30.