

На правах рукописи

Шарлаева Мария Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА
МЕТОДОВ ВНЕДРЕНИЯ УСЛУГ ТЕЛЕМЕДИЦИНЫ
В СЕТЯХ СВЯЗИ ПЯТОГО И ПОСЛЕДУЮЩИХ ПОКОЛЕНИЙ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

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, доцент
Маколкина Мария Александровна

Официальные
оппоненты: **Колбанев Михаил Олегович**,
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный
экономический университет, кафедра
информационных систем и технологий,
профессор кафедры

Ковтуненко Алексей Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
Уфимский университет науки и технологий,
кафедра информатики, доцент кафедры

Ведущая организация: Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики», г. Москва

Защита состоится 27 ноября 2024 года в 16.00 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.

Автореферат разослан 27 сентября 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В последние десятилетия отмечается значительный рост внедрения информационных технологий во всех областях человеческой деятельности. Интенсивное развитие информационно-коммуникационных технологий спровоцировало появление термина «цифровая экономика», который прочно закрепился в нашем обществе. Очевидно, что базовыми технологиями цифровой экономики являются искусственный интеллект, Интернет Вещей, сверхплотные сети с ультрамалыми задержками, дополненная реальность, медицинские сети, облачные вычисления.

Изменения в области систем и сетей телекоммуникаций напрямую влияют на изменения архитектуры сети и перечень предоставляемых услуг. Новые требования во многом были спровоцированы появлением Интернета Вещей и Тактильного Интернета. Так, появление сетей связи пятого поколения как новой ветки развития инфокоммуникаций является не просто закономерным эволюционированием существующих сетей, а вынужденной мерой для обеспечения высокой плотности устройств (1 млн на 1 кв. м) и величины круговой задержки 1 мс.

Первое требование сформировано именно благодаря тому, что к Интернету подключаются не только пользователи, но и устройства. Так в 2008 году наступил момент, когда число вещей, подключенных к Интернету, превысило число жителей Земли. И по прогнозам, это отношение будет только расти, достигая десятки миллиардов.

Тактильный Интернет, предполагая передачу тактильных ощущений по сети, потребовал критически низкую задержку для обеспечения требуемого качества обслуживания и качества восприятия. В данном случае ограничение по скорости распространения света и особенности его распространения в волоконно-оптических кабелях по рекомендации МСЭ-Т делают возможным предоставление данных услуг только в пределах радиуса 50 км. Это означает, что ресурсы оператора в сетях связи с ультрамалыми задержками должны предполагать существенную децентрализацию.

Помимо этого, требования по обеспечению низкой задержки предъявляются к приложениям дополненной реальности – круговая задержка 5 мс, беспилотным автомобилям и медицинским сетям, где из-за предоставления услуг реального времени необходимо обеспечивать задержку 10 мс.

Исследования качества предоставления услуг дополненной реальности на основании субъективной оценки пользователей показали, что задержки в 5 мс не оказывают негативного влияния на качество восприятия. При этом большие

значения задержки ухудшают восприятие скорости движения объекта за счет уменьшения частоты обновления кадра, а при задержке более 25 мс трафик не является самоподобным, и предсказать его поведение и произвести оценку качества восприятия довольно сложно.

Что касается наиболее перспективных на текущий момент времени областей внедрения инфокоммуникаций, внедрение новых технологий в сферу здравоохранения способно повысить доступность получения медицинских услуг, а значит, в некоторой степени сократить цифровой разрыв между регионами Российской Федерации. При этом с точки зрения требований к предоставляемым услугам необходимо обеспечивать задержку, как и в приложениях дополненной реальности, т.к. они могут применяться в целях дистанционного оказания медицинских услуг, т.е. при проведении телеконсультаций и телеобучения.

Именно поэтому в основе сетей связи пятого и последующих поколений лежат сверхплотные сети и сети связи с ультрамалыми задержками. Исходя из вышесказанного, тема диссертационной работы, посвященная исследованию влияния внедрения телемедицинских услуг и в целом сетей связи с ультрамалыми задержками на цифровой разрыв между регионами Российской Федерации, а также созданию нового подхода для кластеризации территорий в сетях с учетом плотности пользовательских устройств является актуальной.

Степень разработанности темы. В области сетей связи с ультрамалыми задержками исследованиями занимаются ряд ученых, в частности, В.М. Вишнеvский, Р.В. Киричек, А.Е. Кучеряvый, В.Г. Карташевский, Б.С. Гольдштейн, М.О. Колбанев, А.И. Парамонов, К.Е. Самуйлов, А.С. Ковтуненко, С.Н. Степанов, Е.А. Кучеряvый, Ю.В. Гайдамака, М.А. Маколкина, Д.А. Молчанов, А.Н. Волков, А.С.А. Мутханна, А.А.А. Ateya, M. Dohler, G.P. Fettweis, Z. Li, M. Maier, P. Popovski, T. Taleb, M. Uusitalo и другие авторы, в том числе принимающие участие в разработке рекомендаций по построению сетей 2030.

Указанные авторы в своих работах рассматривают значимые вопросы по организации сетей связи с высокими требованиями по задержке при предоставлении услуг Тактильного Интернета, дополненной реальности и т.д. Однако, в них практически не затрагивается вопрос решения проблемы цифрового разрыва между территориями посредством предоставления новых видов услуг или изменения структуры сети. На текущий момент вопрос организации сетей с использованием нового подхода является актуальным, поскольку обеспечение ультрамалых задержек возможно на ограниченных расстояниях между точками

предоставления услуг и пользователями. Сложившаяся ситуация требует децентрализации сети и разделения территорий на цифровые кластеры с учетом плотности населения, что определяет цель, задачи, объект и предмет исследования диссертационной работы.

Объект и предмет исследования. *Объектом* исследования являются сети связи пятого и последующих поколений, а *предметом* – методы внедрения услуг телемедицины.

В диссертации решена **научная задача** по разработке метода построения цифровых кластеров сети для первого набора телемедицинских услуг с учетом требований по качеству обслуживания и прогнозирования числа пользователей телемедицинских услуг на горизонте планирования до 2030 года.

Цель и задачи исследования. *Цель* диссертационной работы состоит в исследовании и разработке методов формирования цифровых кластеров при внедрении услуг телемедицины в сетях связи пятого и последующих поколений и оценке влияния распространения этих услуг на цифровой разрыв между территориями Российской Федерации.

Для достижения заданной цели в работе решаются следующие *задачи*:

1. Анализ услуг телемедицины и направлений развития сетей связи пятого и последующих поколений для предоставления данных услуг.

2. Анализ принципов построения сетей связи пятого и последующих поколений, в том числе сетей с ультрамалыми задержками для предоставления услуг телемедицины.

3. Прогнозирование доли пользователей услуг телеприсутствия или телемедицинских услуг в сетях связи пятого и последующих поколений.

4. Разработка первого набора телемедицинских услуг в сетях связи пятого и последующих поколений.

5. Анализ взаимосвязи Валового Регионального Продукта, плотности населения и числа медицинских учреждений на душу населения.

6. Типизация территорий РФ для внедрения телемедицинских услуг.

7. Анализ способов проектирования телемедицинской сети и разработка алгоритма для выбора характеристик, удовлетворяющих требованиям при предоставлении услуг.

8. Разработка модели сети связи пятого и последующих поколений для телемедицинских услуг с учетом показателей качества предоставления услуг.

9. Разработка метода формирования цифровых кластеров для использования в сетях с ультрамалыми задержками с учетом плотности населения и территориального расположения населенных пунктов.

Научная новизна. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

– Разработан прогноз развития услуг на сетях связи пятого и последующих поколений на горизонте планирования до 2030 года, отличающийся от известных тем, что получены результаты прогнозирования для числа пользователей услуг телемедицины.

– В отличие от известных научных результатов получены зависимости задержки от интенсивности трафика и длительности обслуживания пакетов для первого набора телемедицинских услуг в сетях связи пятого и последующих поколений.

– В отличие от существующих алгоритмов кластеризации предложенный метод позволяет выбрать размер цифрового кластера в зависимости от плотности расположения пользователей.

Теоретическая и практическая значимость диссертации. *Теоретическая значимость* диссертационной работы заключается в выявлении взаимосвязи между Валовым Региональным Продуктом, плотностью населения в областях и числом медицинских организаций. Расположение центров обработки данных в областных или региональных центрах способно обеспечить повсеместное предоставление первого набора телемедицинских услуг, таких как телеконсультации, телемониторинг и телеобучение, в сетях связи пятого и последующих поколений. За счет формирования цифровых кластеров повышается доступность обращений за медицинской помощью, что позволяет частично сократить цифровой разрыв без необходимости расширения числа медицинских организаций и увеличения численности кадров в удаленных населенных пунктах.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в доказательстве зависимости величины задержки от плотности населения, интенсивности трафика и длительности обслуживания пакетов для первого набора телемедицинских услуг. Весомую практическую ценность имеет создание нового метода кластеризации территорий, учитывающего плотность расположения пользователей телемедицинских услуг, а также алгоритм действий для формирования технического задания по проектированию телемедицинской сети.

Полученные в диссертационной работе результаты использованы в ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке «Методики планирования сетей связи при

внедрении первого набора телемедицинских услуг», в ООО «НТЦ АРГУС» при проектировании систем технического учета «Аргус NRI», в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ) при чтении лекций и проведении практических занятий по курсам «Архитектура построения и принципы проектирования сетей связи 5G/6G», «Технологические принципы организации инфокоммуникационных услуг», а также при выполнении Соглашения о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидий, выделяемого для государственной поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в российских образовательных организациях высшего образования, научных учреждениях и государственных научных центрах Российской Федерации от «06» июля 2022 г. № 075-15-2022-1137 по приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации 20а – Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

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

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Прогноз числа пользователей телемедицинских услуг сети на горизонте планирования до 2030 года, выполненный методом экспоненциального сглаживания, доказывает, что с учетом доверительной вероятности $P=95\%$ число пользователей телемедицинских услуг на сети связи общего пользования составит не менее 40 млн, что составит 22% от общего числа пользователей сети.

2. С использованием модели сети с произвольным распределением интервала поступления между заявками и произвольным распределением длительности обслуживания получены зависимости задержки от интенсивности трафика и длительности обслуживания пакетов для первого набора телемедицинских услуг в сетях связи пятого и последующих поколений.

3. Метод формирования цифровых кластеров для первого набора телемедицинских услуг, основанный на комбинации методов C-means и DBSCAN, позволяет сократить время выполнения алгоритма не менее чем на 30% по

сравнению с классическим вариантом DBSCAN, увеличив точность выделения кластеров методом C-means за счет плотностного подхода.

Степень достоверности и апробация результатов. *Достоверность* основных результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами имитационного моделирования и широким спектром публикаций и выступлений как на российских, так и на международных конференциях.

Апробация результатов исследования. Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих конгрессах, конференциях и семинарах: XXI Международной научно-практической конференции «Технологии 1С в цифровой трансформации экономики и социальной сферы» (Москва, 2021), Всероссийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2020)» (Санкт-Петербург, 2020), Международных научно-технических и научно-методических конференциях «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» АПИНО (Санкт-Петербург, 2019-2022), региональных научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Студенческая весна» (Санкт-Петербург, 2018-2021).

Публикации по теме диссертации. Всего по теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 3 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России, 6 статей в других изданиях и материалах конференций.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа выполнена по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций и соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 3, 4, 7, 19.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Экспериментальные исследования проведены при его непосредственном участии и под научным руководством.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 138 страниц, включая 40 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 80 наименований. В приложении к диссертационной работе приведены документы, подтверждающие внедрение основных результатов диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и определены её ключевые особенности, сформулированы цель и задачи работы, определена научная новизна результатов, указаны теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации работы, перечислены публикации по теме выполненного исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе произведен анализ перспектив развития сетей связи пятого и последующих поколений. Отмечается, что голографические коммуникации и Тактильный Интернет как предпосылки для создания сетей 2030 могут способствовать появлению новых услуг телемедицины. Обеспечение ультрамалой задержки способно сократить цифровой разрыв между регионами РФ за счет повышения доступности получения медицинских услуг в дистанционном формате.

Информация о характере телемедицинских услуг из первого набора услуг позволяет определить, какими типами данных оперирует система, а также сформулировать основные подходы к построению архитектуры сети связи, предоставляющей такие услуги.

В процессе предоставления телемедицинских услуг используются данные различных типов, как показано в таблице 1: медицинская запись (текстовые или числовые данные, отражающие сведения мониторинга, ФИО, диагноз, назначенное лечение); данные (результаты анализов, сводные отчеты, электронные ресурсы и сведения); черно-белые статические 2D-изображения (рентгеновские снимки, КТ, МРТ и ЭКГ); цветные 2D-изображения (снимки кожных покровов, КТ, МРТ и ЭКГ); 3D-модели органов; потоковое аудио и видео для передачи аудиовизуальной информации между удаленными пользователями.

Таблица 1 – Типы данных телемедицинских услуг

Телемедицинская услуга	Типы медицинских данных
Телеконсультация	<ul style="list-style-type: none"> – медицинская запись; – данные; – потоковое аудио, видео
Телемониторинг	<ul style="list-style-type: none"> – медицинская запись; – данные; – черно-белое или цветное статическое 2D изображение; – трехмерные изображения (3D-модели); – потоковое аудио, видео
Телеобучение	<ul style="list-style-type: none"> – данные; – черно-белое или цветное статическое 2D изображение; – потоковое аудио, видео

Говоря о вариантах развертывания сети связи, предоставляющей телемедицинские услуги, с точки зрения подхода к хранению данных рекомендуется использовать децентрализованную схему (рисунок 1). Для обеспечения избыточности создается несколько копий фрагментов данных на локальных ресурсах телемедицинской сети или телемедицинских рабочих станциях специалистов, за счет чего исключается вероятность того, что информация будет недоступна. Поскольку при такой организации данные шифруются, фрагментируются и хранятся на разных узлах, снижаются риски несанкционированного доступа. Помимо этого, использование данного подхода позволяет существенно сократить время задержки за счет возможности получения данных с ближайших узлов и является экономически выгодным в случае масштабирования сети. Безопасность данных обеспечивается за счет специального программного обеспечения, используемого на узлах для управления доступом и разрешениями, сквозного шифрования как при хранении, так и при передаче. Для проверки целостности данных могут быть использованы криптографические хэши или деревья Меркла.

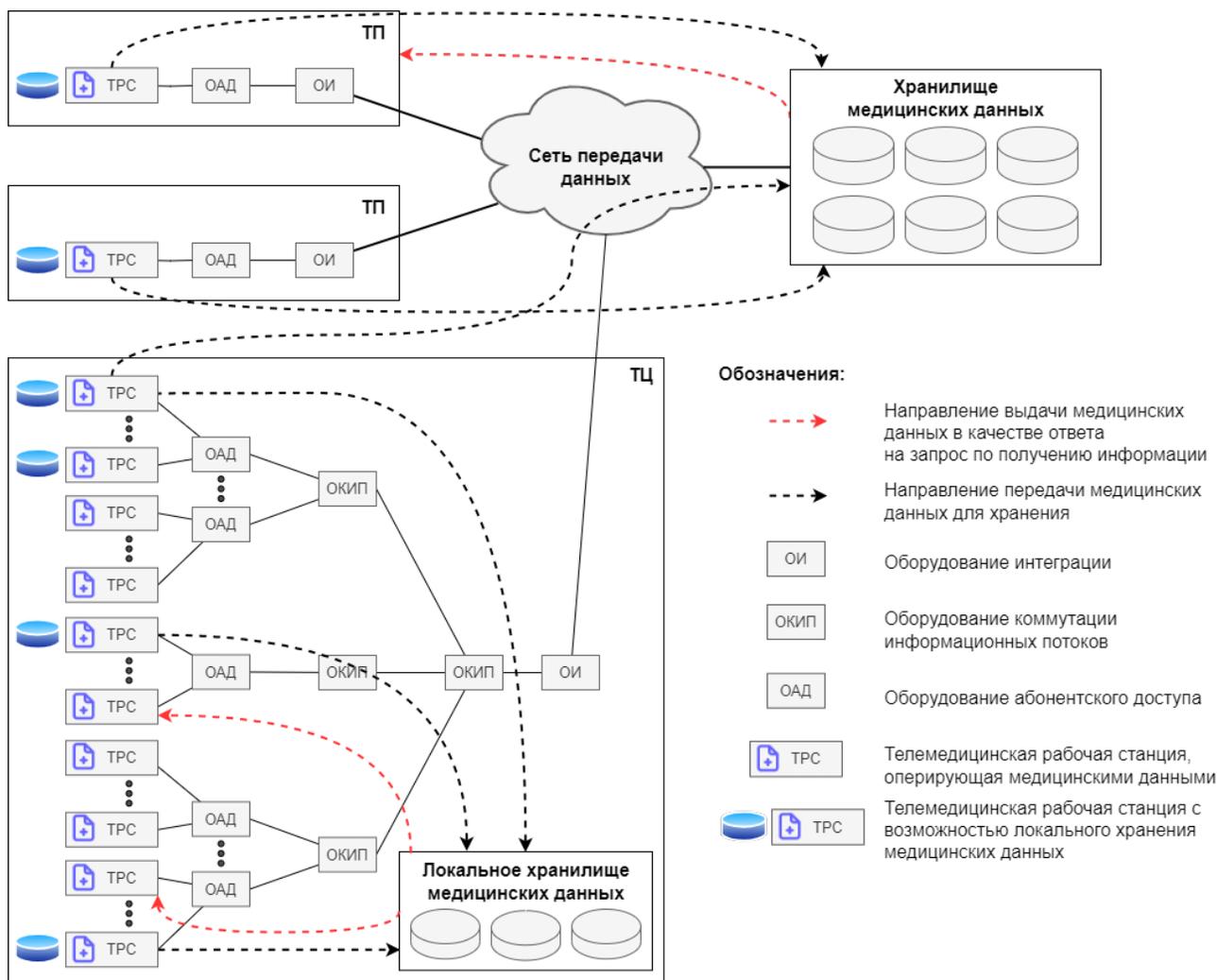


Рисунок 1 – Децентрализованная схема построения телемедицинской сети

За подключение рабочих станций к сети и передачу данных внутри объекта телемедицины, т.е. телемедицинского пункта или телемедицинского центра, отвечает LAN-сегмент. WAN-сегмент обеспечивает подключение перечисленных объектов к внешней сети передачи данных для взаимодействия с иными объектами телемедицинской сети. Оборудование провайдера может размещаться на стороне телемедицинской сети, т.е. в пределах телемедицинского пункта, или на технической площадке провайдера, это объясняет 2 возможных варианта реализации WAN-сегмента. В зависимости от чего задача оборудования интеграции заключается в обмене данными с сетью передачи данных или с оборудованием провайдера, расположенным за пределами телемедицинского пункта.

Прогноз числа пользователей услуг телемедицины, выполненный на основании статистических данных из открытых источников за период до 2022 года (рисунок 2), позволяет предположить сохранение тенденции к росту в ближайшие

годы. Метод экспоненциального сглаживания позволил получить диапазон доверительного интервала с доверительной вероятностью $P = 95\%$, согласно которому охват составит не менее 40 млн пользователей.

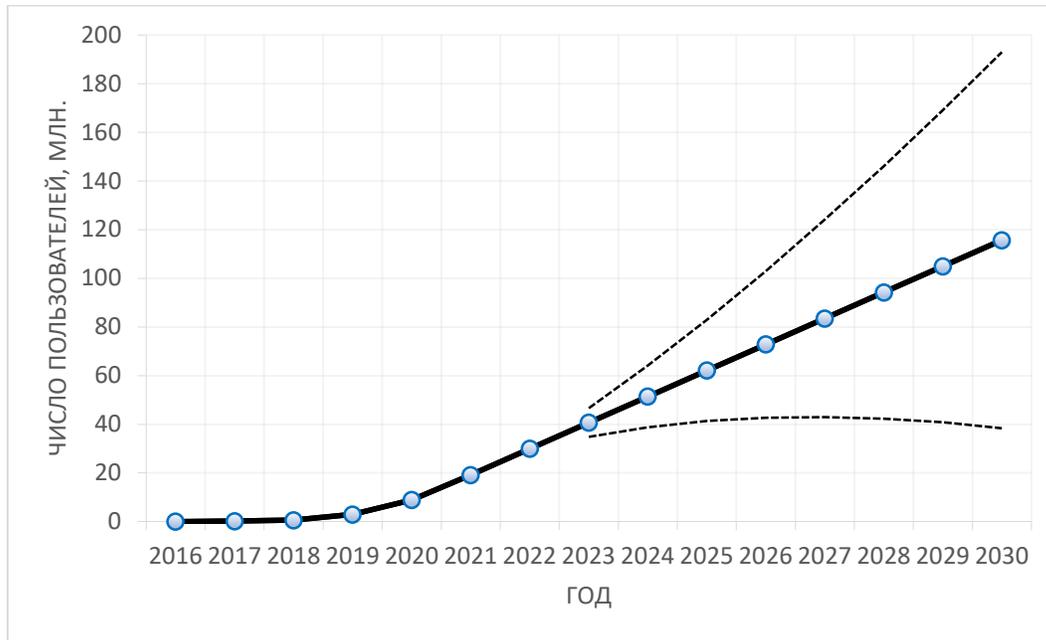


Рисунок 2 – Прогноз числа пользователей телемедицинских услуг методом экспоненциального сглаживания

Во второй главе рассматривается взаимосвязь одного из показателей экономической активности регионов, Валового регионального продукта (ВРП), с плотностью населения и количеством медицинских учреждений первичного звена, что позволяет определить населенные пункты с наибольшими проблемами в плане доступности медицинских услуг. По полученным соотношениям наблюдается тенденция зависимости числа мед. учреждений первого уровня от плотности населения (рисунок 3).

Оценивая отношение Валового Регионального Продукта на душу населения к численности медицинских учреждений, можно сделать вывод, что территории с более высокой плотностью амбулаторно-поликлинических организаций на км² имеют меньшие значения, чем субъекты с недостатком медицинских учреждений (рисунок 4), а значит очевидна зависимость указанных параметров друг от друга.

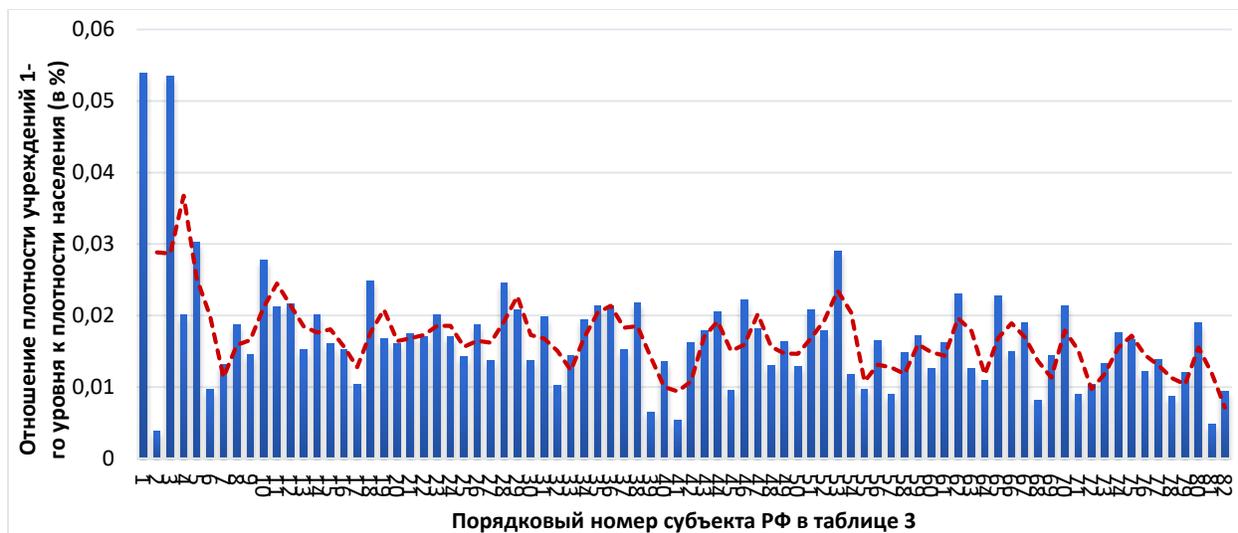


Рисунок 3 – График отношения плотности амбулаторно-поликлинических организаций к плотности населения по субъектам РФ

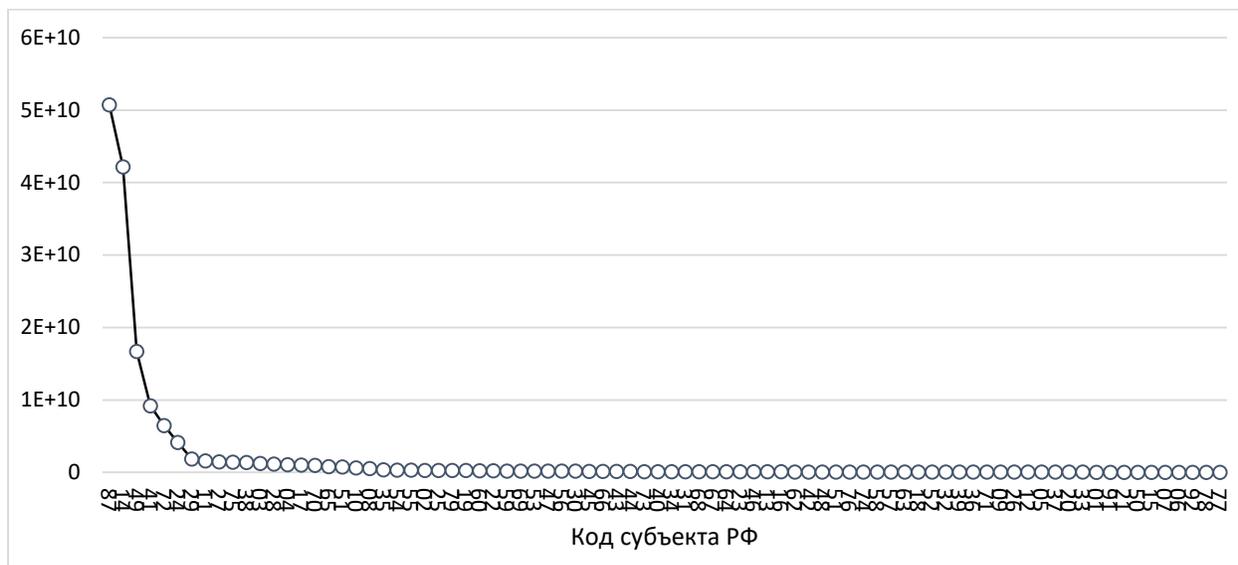


Рисунок 4 – Отношения ВРП к числу амбулаторно-поликлинических организаций для субъектов РФ

Имеющаяся информация о расстояниях между сельскими населенными пунктами, районными и областными центрами позволяет условно разделить федеральные округа РФ на 2 группы, предусматривающие структурные отличия для внедрения сетей с ультрамалыми задержками ввиду имеющихся требований по круговой задержке при предоставлении услуг. Так, в Центральном, Приволжском и Южном федеральных округах при размещении центров обработки данных (ЦОД) в

районных и областных центрах представляется возможным обеспечить задержку в 1 и 5 мс соответственно. В Северо-Западном, Сибирском, Уральском и Дальневосточном федеральных округах возможно придерживаться требований по задержке в 5 мс в случае использования ЦОД районных центров, меньшие значения требуют поиск нового подхода при проектировании архитектуры сети. Для предоставления услуг с задержкой в 1 мс необходимо прибегнуть к сегментированию территорий и расположению нескольких ЦОД, как на уровне районных центров, так и областных. Это позволит обеспечить соответствие требованиям по качеству обслуживания и качеству восприятия при предоставлении услуг.

С целью исследования числовых характеристик цифрового разрыва выполнена аппроксимация статистических данных о ВРП на душу населения и плотности амбулаторно-поликлинических организаций прямой, экспонентой, логарифмической функцией и полиномом второй степени. Согласно полученным значениям показателя достоверности аппроксимации R^2 , наиболее достоверные результаты демонстрирует полином 2 степени (рисунок 5).

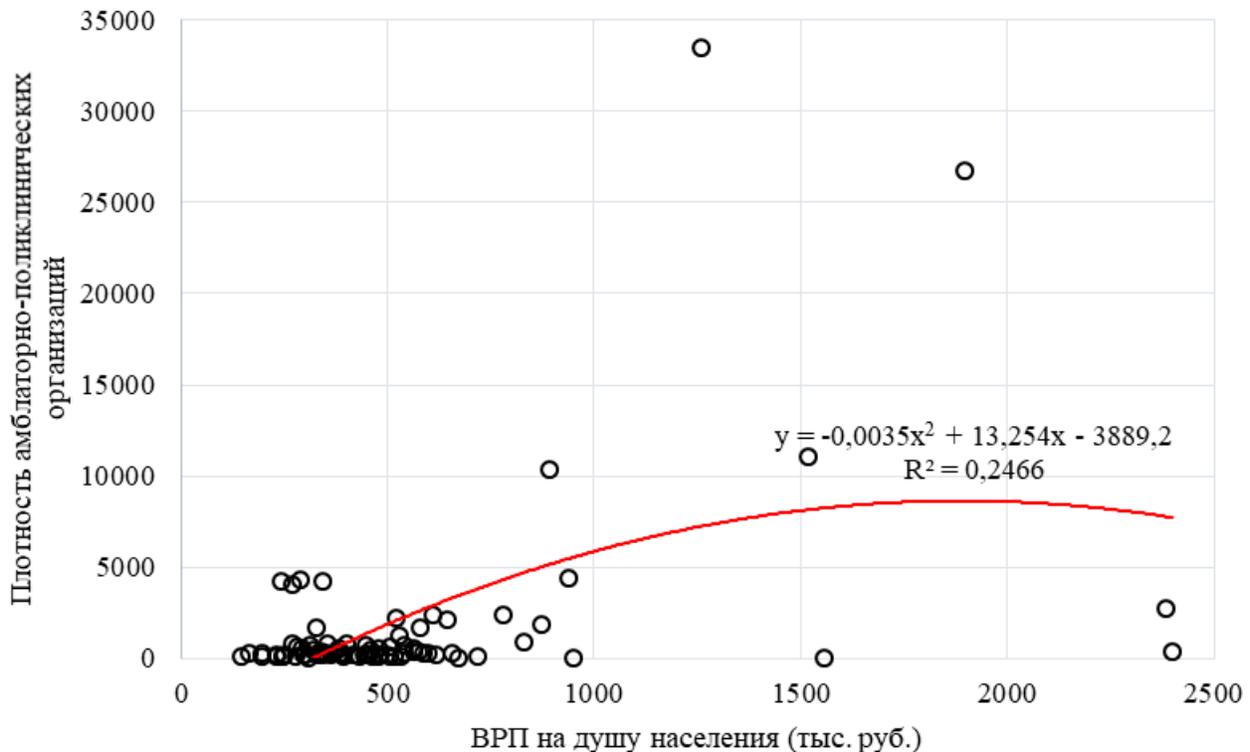


Рисунок 5 – Аппроксимация статистических данных полиномиальной функцией 2 степени

Коэффициент корреляции Пирсона, демонстрирующий в данном случае связь рядов плотности размещения амбулаторно-поликлинических организаций и ВРП, равен 0.46, что по шкале Чеддока свидетельствует об умеренной силе связи. Помимо этого, рассчитано значение коэффициента корреляции между числом больничных и амбулаторно-поликлинических организаций, полученное значение 0.68 говорит о заметной силе связи. Результаты говорят о том, что внедрение услуг телемедицины способно заменить необходимость создания новых медицинских учреждений и положительно повлиять на сокращения цифрового разрыва.

Третья глава посвящена вопросам построения сетей связи, предоставляющих телемедицинские услуги. Основными факторами, влияющими на структуру моделируемой сети, выделены: абонентский трафик, распределение пользователей по территории, требования по качеству обслуживания. Отмечается, что при проведении отложенных телеконсультаций, телемониторинге и телеобучении вопрос минимальных задержек, потерь и надежности сети стоит менее остро, чем при сопровождении операций или другого вида услуг реального времени, требующих постоянного участия всех сторон процесса.

Для определения характеристик телемедицинской сети необходимо зафиксировать географическое положение, площадь, численность населения и статус населенных пунктов рассматриваемой территории, планируемый перечень предоставляемых услуг, в случае охвата труднодоступных населенных пунктов – расстояние и информацию о соседях, обеспеченность техническими составляющими и наличие ранее используемых проводных соединений. На основании этой информации предлагается выбрать наиболее эффективные в данном случае сетевые технологии.

На текущий момент существует ряд проблем, препятствующих интеграции существующих наработок с целью создания единой распределенной телемедицинской сети на территории РФ:

- Несовместимость разработок, используемых на отдельных фрагментах телемедицинской сети.
- При построении телемедицинской сети не учтены требования стандартов и характеристики протоколов, принятые для медицинской диагностики.
- Несогласованность сетевого оборудования, разобщенность фрагментов локальных сетей LAN на территории самих медицинских учреждений.

В связи с чем очевидна необходимость поддержки унифицированного стандарта цифровизации изображений и коммуникации в медицине DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine).

В первой главе указано, что все данные, передаваемые по телемедицинской сети, можно разделить на 6 групп, каждая из которых характеризуется объемом передаваемых данных, типом трафика согласно стандарту IEEE 802.1p и показателями качества, которые следует обеспечить (таблица 2).

Таблица 2 – Характеристики медицинских данных

№	Тип медицинских данных	Средний объем, Мб	Допустимая задержка	Тип трафика
1.	Медицинская запись	< 1	1 с	Стандартный
2.	Данные	< 50	Не нормируется	Стандартный
3.	Черно-белое статическое 2D изображение	< 100	1 с	Приоритетный
4.	Цветное статическое 2D изображение	< 500	1 с	Приоритетный
5.	Трехмерное изображение (3D-модель)	< 1000	400 мс	Приоритетный
6.	Потоковое аудио, видео	Зависит от длительности конференции	10 мс, 100 мс	Интерактивный голосовой, интерактивный мультимедийный, контролируемый

Согласно сформулированным классам трафика, передача голоса и видео при интерактивных переговорах и обмене являются критичными по задержке: < 10 мс и < 100 мс, соответственно. При этом по своему приоритету уступают лишь передаче данных для поддержания сетевой инфраструктуры, т.е. трафику управления сетью.

Переходя к моделированию сети, следует заметить, что величина задержки зависит от объема передаваемых данных, скорости передачи по линии связи на каждом участке маршрута, возможных задержек на узлах маршрута, вызванных ожиданием в буфере из-за занятости линии ранее обслуживаемыми пакетами данных, времени передачи данных в среде передачи или по каналам и времени распространения сигнала, необходимого пакету для пересечения среды передачи.

Использование идеи кластерного анализа позволяет представить структуру сети как совокупность окружностей с некоторыми центроидами – точками предоставления услуги доступа (S), которые соединены прямыми с точками предоставления услуг линиями связи (A), а они свою очередь обслуживают

несколько пользовательских терминалов (U). В таком случае максимальное расстояние, которое преодолевает сигнал, складывается из расстояния от точки предоставления услуги до точки доступа и от точки доступа до терминала. Каждый кластер принимается за систему массового обслуживания (СМО) с одним сервером обработки заявок. Обслуживание заявок выполняется по принципу FIFO без использования приоритетов. Входящий поток является Пуассоновским. Число пользователей на 1 м² является случайной величиной, в связи с чем вероятность попадания m пользователей в зону обслуживания точкой предоставления услуги также можно описать Пуассоновским распределением. Тогда интенсивность потока λ сопоставима с количеством пользователей в зоне обслуживания ν , и вероятность попадания m числа пользователей в зону обслуживания точкой предоставления услуги будет определяться как:

$$P_m = \frac{(\pi R_{S-A}^2 \eta)^m}{m!} * e^{-(\pi R_{S-A}^2 \eta)}, \quad (1)$$

где η – плотность пользователей на территории (чел/м²), R_{S-A} – расстояние от точки предоставления услуги до точки доступа, m – число пользователей.

Для расчета задержки одного участка сети GI/G/1 с произвольным распределением интервала поступления между заявками и произвольным распределением длительности обслуживания допускается, что в СМО поступают запросы одного типа. В таких условиях при известных значениях коэффициента вариации и нагрузке, поступающей на узлы, можно рассчитать среднее время пребывания запроса в соответствующем узле при помощи приближенной формулы Крамера и Лангенбаха-Бельца:

$$\bar{w} = \frac{\rho_i \bar{t}}{2(1-\rho_i)} (C(i)_a^2 + C(i)_t^2) g(C(i)_a^2, C(i)_t^2, \rho_i), \quad (2)$$

$$g(C_a^2, C_t^2, \rho) = \begin{cases} e^{-\frac{2(1-\rho)(1-C_a^2)^2}{3\rho(C_a^2+C_t^2)}}, & C_a^2 \leq 1 \\ e^{-(1-\rho)\frac{(C_a^2-1)^2}{C_a^2+4C_t^2}}, & C_a^2 > 1 \end{cases}, \quad (3)$$

где $\rho_i \bar{t}$ – интенсивность нагрузки на i -й узел, $i \in M$ (множество узлов СМО); C_a – коэффициент вариации интервала между заявками (пакетами); C_t – коэффициент вариации времени обслуживания.

Полученные результаты для скоростей 1 Гбит/с (рисунок 6) и 10 Гбит/с (рисунок 7) при среднем значении длины кадра в 755 байт свидетельствуют о том, что задержка на ожидание в большей степени зависит от коэффициента вариации длительности обслуживания C_t , чем от коэффициента вариации интервала между заявками C_a . Данный факт наблюдается вне зависимости от скорости передачи, ведь

при аналогичных показателях интенсивности нагрузки задержка на ожидание имеет бóльшие значения, особенно это прослеживается при повышении коэффициента вариации длительности обслуживания.

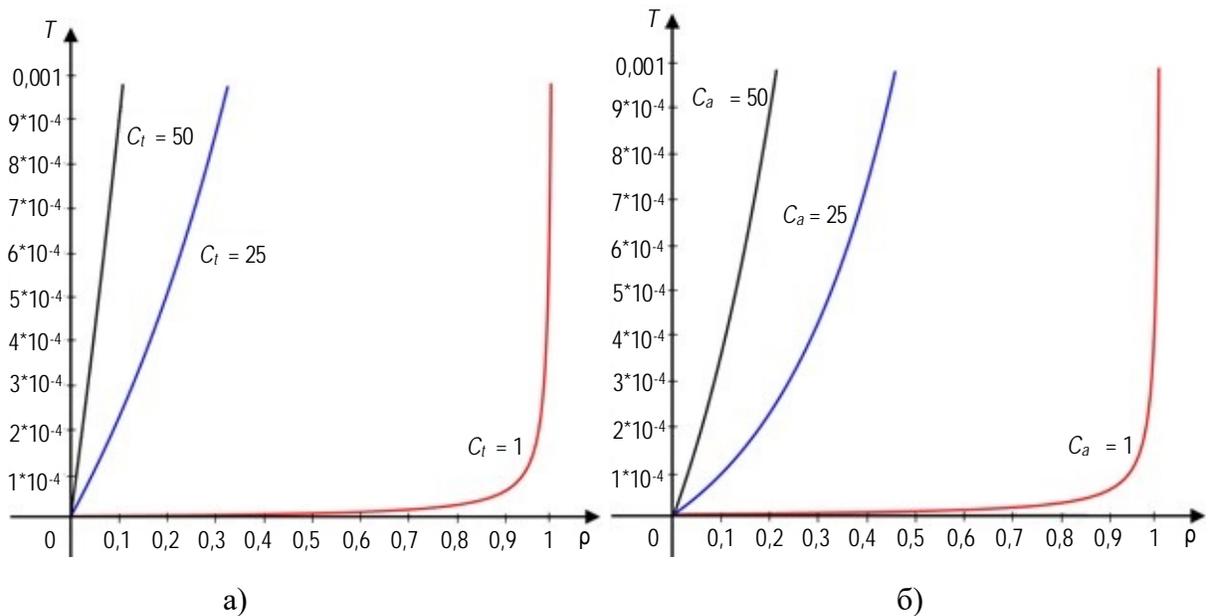


Рисунок 6 – Зависимость задержки от интенсивности трафика и коэффициента вариации длительности обслуживания C_t (а) и коэффициента вариации для потока C_a (б) для скорости передачи 1 Гбит/с

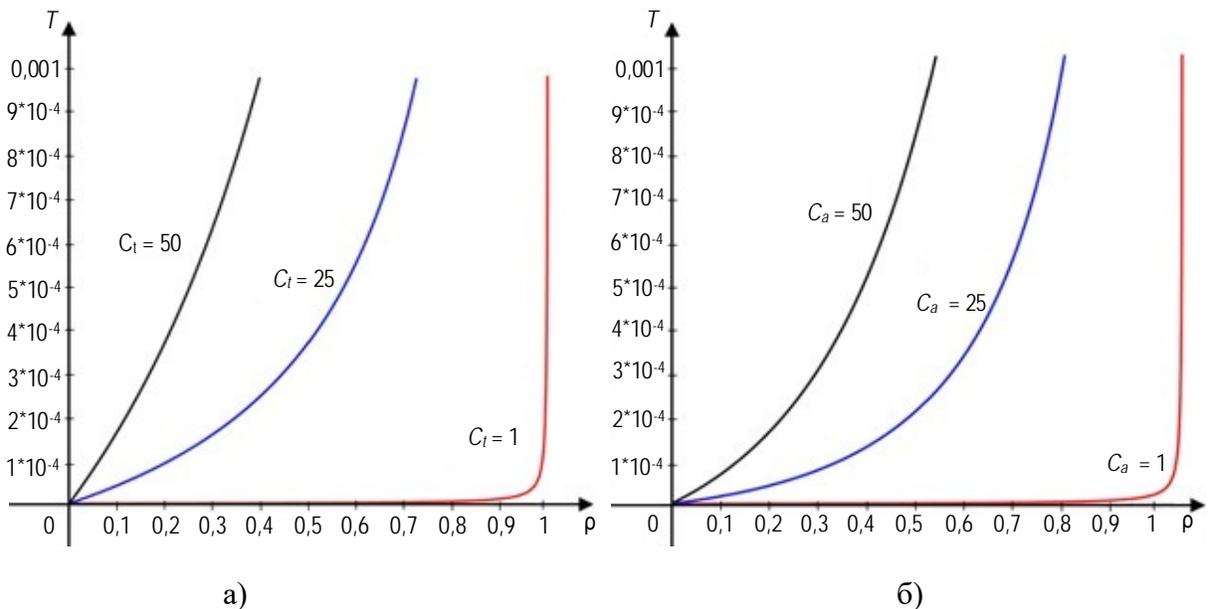


Рисунок 7 – Зависимость задержки от интенсивности трафика и коэффициента вариации длительности обслуживания C_t (а) и коэффициента вариации для потока C_a (б) для скорости передачи 10 Гбит/с

В четвертой главе предлагается новый алгоритм кластеризации территории, учитывающий плотность населения и распределение пользователей.

Формирование структуры сети, в том числе с целью её децентрализации, сопряжено с задачей разбиения обслуживаемой территории на кластеры. В зависимости от различных требований к качеству предоставляемых телемедицинских услуг в центрах кластеров различного радиуса предлагается размещать точки предоставления услуг. При определении размерности кластеров следует учитывать не только задержку, но и плотность пользователей, поскольку она характеризует интенсивность поступления заявок.

За основу для создания метода кластеризации взят алгоритм C-means, ключевой особенностью которого является определение степени принадлежности элементов к кластеру без однозначного закрепления. Также одной из причин данного выбора является то, что полученный результат представляет собой кластеры в форме окружности на плоскости и сферическое представление в трехмерном пространстве с выделенными центроидами. Основной недостаток, связанный с возможностью некорректной работы в случае различной дисперсии точек по осям, перекрывается использованием плотностного алгоритма кластеризации DBSCAN. Пространственная кластеризация на основе плотности расположения объектов позволяет выполнить группировку объектов в зависимости от расстояния до других точек, а также выявить точки, не относящиеся ни к одному кластеру.

Ниже описано пошаговое выполнение предложенного метода:

1. На вход поступает множество исходных данных D , количество промежуточных кластеров для алгоритма C-means k , случайно выбранная доля данных t из каждого кластера для получения нового множества E .

2. Случайным образом задается k центров кластеров V_i ($i = 1, \dots, k$) или матрица принадлежности к кластерам M .

3. Выполняется расчет степеней принадлежности объектов кластерам μ_{ki} :

- центры кластеров определяются как

$$V_j = \frac{\sum_{k=1}^M \mu_{ki}^m * X_k}{\sum_{k=1}^M \mu_{ki}^m}, \quad (4)$$

где μ_{ki} – элементы матрицы принадлежности; m – коэффициент неопределённости (экспоненциальный вес); X_k – объект;

- расстояния между новыми центрами кластеров и точками данных определяются для трех измерений по формуле евклидовых расстояний:

$$D_{ki} = \sqrt{\|X_k - V_i\|^2}, \quad (5)$$

где X_k – рассматриваемая точка; V_i – центр кластера;

- пересчет значений элементов матрицы принадлежности выполняется по формуле

$$\mu_{ki} = \frac{1}{\sum_j^c \left(\frac{D_{ki}}{D_{kj}}\right)^{\frac{2}{m-1}}}, \quad (6)$$

где c – число кластеров.

4. Расчет решающей функции F , определяющей сходимость алгоритма по формуле $\max(|\mu_{ki} - \mu_{ki}^*|) < \varepsilon$ или $\max(|V_i - V_i^*|) < \varepsilon$, где ε – параметр останова, в зависимости от выбора пользователя.

5. Если значение решающей функции уменьшается, то переместить центры кластеров и повторить действия шагов 3 и 4, пока не будет достигнуто значение ниже параметра останова ε .

6. На основании доли t для каждого полученного кластера получить новое множество E , чтобы не изменилась относительная плотность между регионами множества D .

7. Выбор произвольной не рассмотренной, а значит и не помеченной ранее точки из множества E , а также информации о минимальном числе соседей $MinPts$ и радиусе EPS , в пределах которого определяются соседи (EPS -соседи) рассматриваемой точки X .

8. Если точка набора данных имеет не менее заданного числа соседей $MinPts$ ($X \geq MinPts$) в радиусе EPS , она принимается за опорную для формирования кластера. Остальные точки делятся на две группы: точка границы кластера и шум. В случае непопадания точки в кластер, рассмотренная точка может быть включена в другой кластер, если будет найдена в пределах окружности радиуса EPS .

9. Для выделенной опорной точки элементы окрестности принимаются как составляющие кластера. Таким образом, все точки, найденные в пределах окружности радиуса EPS , добавляются вместе с их собственной окрестностью, если они также являются центральными точками.

10. Повторение шагов 8–9 до тех пор, пока опорные точки не будут объединены со всеми соседями, являющимися опорными.

11. Процесс возобновляется с новой точкой, которая может быть частью нового кластера или помечена как шум, т.е. повторение цикла по шагам 7–10 до окончания перебора всех точек множества E .

12. На выходе алгоритма получаются кластеры и аномальные точки, не отнесенные ни к одному кластеру.

С целью выполнения кластеризации при предоставлении трех услуг с различными требованиями к показателям качества сформируем синтетический набор данных, где группы ограничены окружностями, в пределах которых точка – случайная величина, принимающая значение согласно закону равномерного распределения. Каждой точке в зависимости от ее координат может быть предоставлено от одной до трех услуг. По полученному результату (рисунок 8) можно сделать вывод, что точки входного набора данных сгруппированы по плотности, и в зависимости от расстояния до точек доступа, размещенных в центре кластеров (в точке $(0;0)$), пользователю может доступно различное количество услуг.

Смоделируем другую ситуацию, где группы пользователей наиболее отдалены друг от друга, а в рамках каждого выделенного кластера предоставляется услуга со своими требованиями по задержке. С целью демонстрации различных полученных результатов, выполнена кластеризация с использованием метода C-means и улучшенного алгоритма. Допуская тот факт, что пользователи распределены по территории случайным образом и их расположение можно описать генерацией данных из изотропных гауссовских распределений, выполним алгоритм на синтетическом наборе.

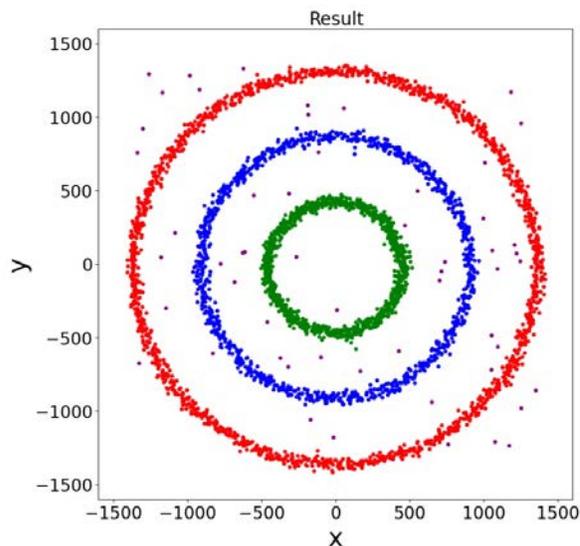


Рисунок 8 – Результат работы предложенного метода на наборе данных

В результате работы метода C-means выделено пять кластеров (рисунок 9), что не совсем корректно, так как не учтено расстояние между выделенными кластерами. Предложенный алгоритм кластеризации на выходе формирует три кластера (рисунок 10). В таком случае точки трех кластеров (по результатам работы метода C-means) отнесены к одному по причине близкого расположения точек, включенных в их состав, в связи с чем общее число центров кластеров сократилось с пяти до трех. Это позволяет сократить число точек предоставления услуг при формировании структуры сети связи.

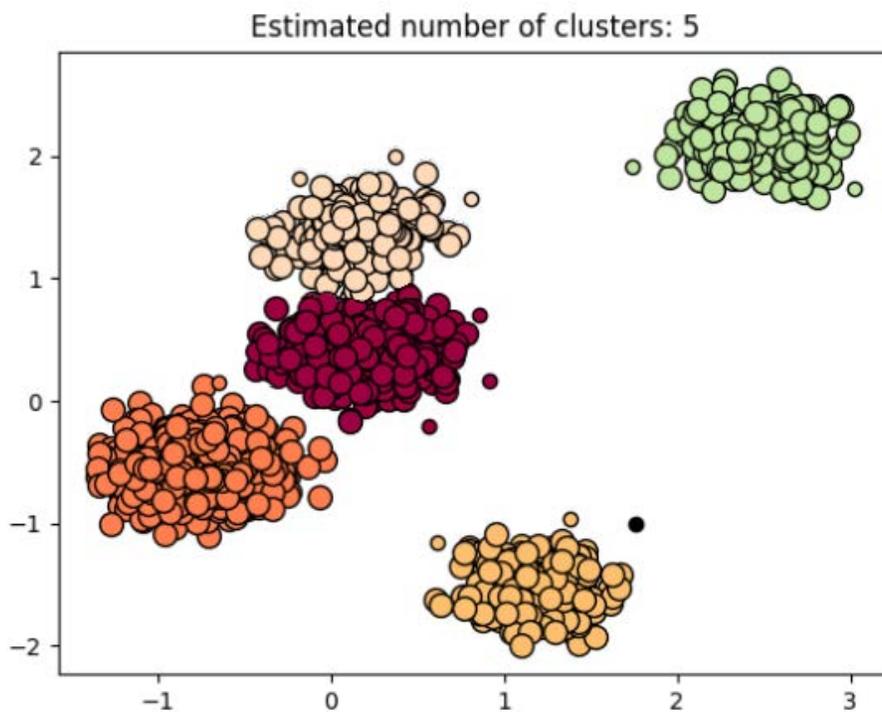


Рисунок 9 – Пример кластеризации методом C-means

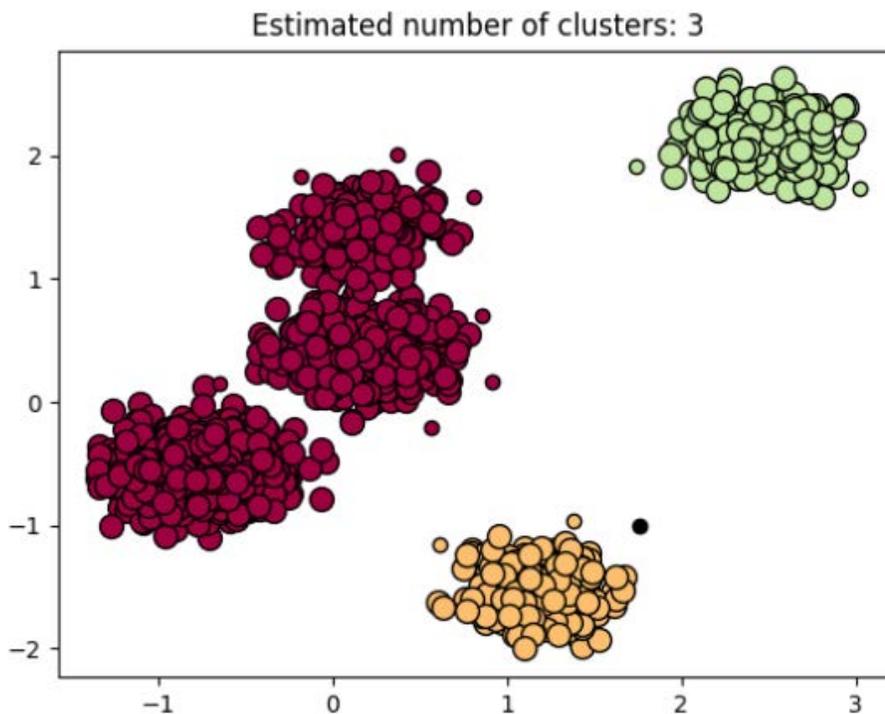


Рисунок 10 – Пример кластеризации модифицированным алгоритмом

В заключении изложены результаты исследований, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации изложены основные результаты диссертационной работы, а именно:

1. Выполнен анализ требований к сетям на горизонте планирования до 2030 года, что позволило выделить телемедицину как одно из основных направлений для сокращения цифрового разрыва на территории РФ. Представлен первый набор услуг телемедицины с разделением в зависимости от функциональных требований на консультации, мониторинг здоровья и обучение.

2. На основании линейной регрессии и алгоритма экспоненциального сглаживания получен прогноз доли пользователей телемедицинских услуг на горизонте планирования до 2030 года, что показывает в обоих случаях увеличение потребности среди населения с достижением охвата более 100 млн. человек.

3. Для покрытия площади Российской Федерации телемедицинской сетью рассмотрена зависимость числа медицинских учреждений амбулаторно-поликлинического характера и плотности населения от Валового регионального продукта (ВРП) как мера оценки цифрового разрыва, а также выявлена необходимость проектирования сетей связи для внедрения на территориях с низкой плотностью населения с сохранением требований, предъявляемых и в наиболее заселенных субъектах. Продемонстрированы варианты построения архитектуры телемедицинской сети.

4. Приведена классификация территорий РФ и выполнено разделение федеральных округов РФ, обоснованное имеющимися расстояниями между сельскими населенными пунктами, районными и областными центрами. Это позволило сделать выводы по частоте расположения центров обработки данных в районных или областных центрах для обеспечения требуемых показателей качества обслуживания и восприятия, в частности для услуг Тактильного Интернета, услуг дополненной реальности и телемедицинских услуг.

5. Предложен алгоритм выбора характеристик телемедицинской сети, учитывающий численность населения рассматриваемой территории, её площадь и географическое положение, предоставляемые услуги, а также обеспеченность техническими составляющими, которые используются или использовались ранее в районе.

6. Рассмотрены требования к сетям телемедицины с точки зрения показателей качества и характеристик медицинских данных для реализации первого набора телемедицинских услуг. На основании модели сети с общим произвольным распределением интервала поступления заявок и другим произвольным общим

распределением времени обслуживания кадров на произвольном участке сети получена зависимость задержки от интенсивности трафика и длительности обслуживания пакетов для первого набора телемедицинских услуг в сетях связи пятого и последующих поколений.

7. Подтверждена идея необходимости разработки алгоритма кластеризации территории с учетом плотности населения, параметров качества предоставления телемедицинских услуг и требований по ультрамалой задержке. Доказана зависимость величины задержки при доставке данных от плотности населения на примере расчетов, выполненных для территорий Северо-Западного федерального округа.

8. Предложена модификация алгоритма C-means с использованием плотностного метода, устойчивого к шумам, DBSCAN. При выполнении кластеризации предоставляется возможность эффективной настройки входных параметров, таких как радиус окружности и количество элементов, в пределах которых определяется попадание точек в кластеры.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Шарлаева, М.В. Исследование внедрения телемедицинских услуг в организации здравоохранения / М.В. Шарлаева // Электросвязь. – 2024. – № 6. – С. 22-29.

2. Шарлаева, М.В. Исследование средней задержки в сетях связи, предоставляющих телемедицинские услуги / М.В. Шарлаева, М.А. Маколкина // Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10, № 3. – С. 59-65. – DOI 10.31854/1813-324X-2024-10-3-59-65.

3. Шарлаева, М.В. Метод кластеризации в сетях связи пятого и последующих поколений на основании плотности населения / М.В. Шарлаева // Электросвязь. – 2024. – № 5. – С. 26-30. – DOI 10.34832/ELSV.2024.54.5.004.

Публикации в других журналах и материалах научных конференций

4. Шарлаева, М.В. Исследование системы мониторинга сердечно-сосудистой системы пациентов с использованием имитационного моделирования / М.В. Шарлаева // Сборник 75-й региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «СТУДЕНЧЕСКАЯ ВЕСНА – 2021». – 2021. – Т. 1. – С. 100-103.

5. Шарлаева, М.В. Интеграция платформы "1С:Предприятие 8" и нейронной сети для диагностики кардиологических заболеваний / М.В. Шарлаева, Д.В. Окунева // Сборник научных трудов XXI Международной научно-практической конференции «Технологии 1С в цифровой трансформации экономики и социальной сферы». – 2021. – Ч. 1. – С. 411-413.

6. Шарлаева, М.В. Разработка лабораторного стенда для мониторинга ЭКГ на базе технологии LORA / М.В. Шарлаева, М.А. Маколкина // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. X Юбилейная международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2021. – Т. 4. – С. 476-480.

7. Шарлаева, М.В. Применение порогового преобразования для сегментации изображений / М.В. Шарлаева, М.А. Маколкина // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2020. – Т. 1. – С. 697-702.

8. Шарлаева, М.В. Использование метода Оцу для вычисления адаптивного порога сегментации / М.В. Шарлаева, М.А. Маколкина // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2020. – Т. 1. – С. 693-697.

9. Шарлаева, М.В. Интеграция платформы 1С:Предприятие 8 и нейронной сети для диагностики кардиологических заболеваний / М.В. Шарлаева, Д.В. Окунева // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». VIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2019. – Т. 1. – С. 710-714.