

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

На правах рукописи

Волков Артём Николаевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА МОДЕЛЕЙ
И МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ТУМАННЫХ
ВЫЧИСЛЕНИЙ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ УСЛУГ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
Кучерявый Андрей Евгеньевич

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ БУДУЩЕГО: АРХИТЕКТУРА, УСЛУГИ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ, КОНЦЕПЦИЯ МУЛЬТИВСЕЛЕННОЙ.....	
1.1. Актуальные проблемы и переход к интегрированным сетям ИМТ-2030....	14
1.2. Услуги телеприсутствия и их требования.	45
1.3. Декомпозиция и конвергенция сетей и систем вычислений.....	57
1.4. Автономные сети связи: на пути к интеллектуальной инфраструктуре	81
1.5. Концепция Мультивселенной.	96
1.6. Выводы по Главе 1.	135
ГЛАВА 2. НОВАЯ АРХИТЕКТУРА СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ	
2.1. Введение	138
2.2. Архитектурные вызовы сетей и услуг.....	139
2.3. Новая архитектура и структура туманных вычислений.....	146
2.4. Оценка эффекта от внедрения туманных вычислений на сети.	158
2.5. Выводы по Главе 2.	161
ГЛАВА 3. ЗАДАЧА ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ КЛАСТЕРА В ДИНАМИЧЕСКИХ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ	
3.1. Введение	163
3.2. Архитектура интегрированных сетей для удалённых районов.....	165
3.2. Модель сети туманных вычислений на базе точечного процесса Неймана- Скотта	172
3.3. Метод обеспечения стабильности кластера динамических туманных вычислений.....	181
3.4. Оценка эффективности предложенного метода.....	186
3.5. Выводы по Главе 3	189

ГЛАВА 4. ИНТЕГРАЦИЯ БЕССЕРВЕРНОЙ АРХИТЕКТУРЫ И ДИНАМИЧЕСКИХ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ.....	191
4.1. Введение	191
4.2. Перспективы зелёных ИКТ и бессерверной архитектуры для туманных вычислений.....	193
4.3. Модель сети туманных вычислений для поиска группы устройств с последующей миграцией	199
4.4. Метод миграции групп типовых контейнеров в бессерверной архитектуре и туманных вычислениях.....	204
4.5. Результаты моделирования предложенного метода.....	209
4.6. Оценка эффективности предложенного метода.....	214
4.7. Выводы по Главе 4.	218
ГЛАВА 5. ЗАДАЧА МАРШРУТИЗАЦИИ В ДИНАМИЧЕСКИХ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ	220
5.1. Введение	220
5.2. Маршрутизация в сети динамических туманных вычислений.....	223
5.3. Разработка модели и метода маршрутизации.....	226
5.4. Моделирование и оценка эффективности предложенного метода	239
5.5. Выводы по Главе 5	244
ГЛАВА 6. ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ОБЪЕКТЫ МЕТАВСЕЛЕННОЙ. КОСТЮМ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ	246
5.1. Введение	246
6.2. Модельная сеть для исследований в области метавселенной и интерфейса “пользователь - аватар”	249
6.3. Проблематика интерфейса.....	251
6.4. Разработка модели данных для датчиков и актуаторов костюма телеприсутствия.....	252
6.5. Метод передачи данных с костюма телеприсутствия в объекты метавселенной - аватары.....	263
6.6. Выводы по Главе 6	268

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	270
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	275
Приложение А.....	315
Приложение Б	322

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Развитие сетей связи в последние десятилетия осуществляется опережающими темпами. Этому в большой степени способствовали концепции Интернета вещей и Тактильного Интернета, породившие соответственно сети связи высокой и сверх высокой плотности и сети связи с ультрамалыми задержками. Однако пандемия в начале третьего десятилетия 21 века несколько по-иному поставила вопрос о роли сетей связи в борьбе с подобными явлениями и на первый план сегодня постепенно выходят услуги телеприсутствия и, естественно, модели и методы построения современных сетей связи для оказания таких услуг.

Услуги телеприсутствия требуют больших ресурсов сети и, в то же время, повсеместной доступности для пользователя. Такое требование может быть эффективно реализовано в сетях связи пятого и последующих поколений при возможности использования всех ресурсов сети, в том числе и терминальных. В настоящее время ресурсы сети для оказания услуг, как правило, достаточно централизованы, более точно можно сказать, что, в основном, еще и географически определены. Для того, чтобы изменить это весьма устаревшее положение, архитектуру сети и услуг следует строить по модульному принципу, при этом программное обеспечение систем должно основываться на микросервисной архитектуре. Последнее предполагает появление на сети миграции микросервисов. Вкупе с туманными вычислениями это и есть основное направление развития сетей и систем связи, которое может обеспечить требования пользователей по предоставлению услуг телеприсутствия.

Необходимость в широком и повсеместном предоставлении услуг телеприсутствия породила еще одну новую технологию, которой, по всей видимости, будет принадлежать ведущая роль в развитии сетей и систем связи в обозримом будущем. Речь идет о метавселенных и их версии в виде мультивселенных по терминологии Сектора стандартизации Международного Союза Электросвязи (МСЭ-Т). Действительно, виртуальный мир в простейшем

варианте и телеприсутствие людей и роботов в расширенном понимании, в том числе в голографической форме, действительно привлекает к таким исследованиям ученых во всем мире. Особую роль в этих вселенных будут играть костюмы телеприсутствия, исследования и разработка которых только начинаются во всем мире.

Разработанность темы исследования. Существует множество работ в области сетей ИМТ-2020/5G и последующих поколений как теоретического, так и экспериментального плана.

Определяющий вклад в теоретические и экспериментальные исследования этих научных проблем внесли российские и зарубежные ученые А.С.Аджемов, В. М. Вишневецкий, К.Е.Самуйлов, Ю. В. Гайдамака, Б. С. Гольдштейн, В. Г. Карташевский, А. И. Парамонов, А. Е. Кучерявый, Е.А.Кучерявый, М. С. Маколкина, Д.А.Молчанов, А.С.А.Мутханна, М.О.Колбанев, Р. В. Киричек, А. П. Пшеничников, В. К. Сарьян, С. Н. Степанов, А. С. Ковтуненко, М. А. Сиверс, Н. А. Соколов, В. О. Тихвинский, М. А. Шнепс-Шнеппе, M. Dohler, G. Fettweis, J. Hosek, A.AbdEl Latif, A. A. Ateya, M. Maier, M. Z. Shafiq и другие.

В области мультивселенных научных работ пока еще не так много, но уже можно отметить исследования А.Е.Кучерявого и его научной школы у нас в стране и работы I.F.Akyildiz за рубежом.

Настоящая диссертация в отличие от известных подходов к построению и исследованию сетей связи направлена на решение научной проблемы разработки и исследования комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия в мультивселенной при использовании костюмов телеприсутствия.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются сети связи пятого и последующих поколений. Предметом исследования являются сети связи на основе туманных вычислений и предоставление услуг телеприсутствия в метавселенной, в том числе при использовании костюмов телеприсутствия.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка и исследование комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия в метавселенной при использовании костюмов телеприсутствия.

Цель работы достигается путем последовательного решения следующих задач:

- анализ существующего положения в области исследования сетей связи пятого и последующих поколений, роли и места туманных вычислений, миграции микросервисов и услуг телеприсутствия в развитии сетей и систем связи;

- анализ существующего положения дел в области исследований (мета-)мультивселенных, а также костюмов телеприсутствия как интерфейса между метавселенной и пользователями, в том числе роботами-аватарами и роботами-холотарами;

- разработка новой архитектуры сети, в которой все услуги связи предоставляются на основе туманных вычислений, а для динамического распределения ресурсов сети образуются туманности как результат ее кластеризации,

- разработка модели сети связи с распределенными оркестраторами,

- разработка метода построения сетей связи в сельской местности и труднодоступных районах на основе распределенных оркестраторов и туманных вычислений,

- разработка метода динамической кластеризации для обеспечения максимальной стабильности кластера без необходимости миграции микросервисов,

- разработка модели и метода функционирования сети с использованием бессерверной архитектуры для миграции групп типовых микросервисов при применении метаэвристического алгоритма стаи серых волков для определения группы устройств, на которую будет мигрировать группа контейнеров с микросервисами,

- разработка нового протокола маршрутизации для обеспечения взаимодействия устройств туманных вычислений для миграции микросервисов,

- разработка моделей данных для датчиков и актуаторов и метода передачи этих данных от костюма телеприсутствия в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары).

Научная новизна. Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана новая архитектура сетей связи, отличающаяся от известных тем, что все услуги связи предоставляются на основе туманных вычислений, образующих туманности для динамического распределения ресурсов сети, что позволяет уменьшить долю трафика поступающего в ядро сети на 20%.

2. Разработаны модель и метод построения сетей связи общего пользования, отличающиеся от известных тем, что с целью предоставления услуг телеприсутствия в сельской местности и труднодоступных районах предложено использовать для предоставления услуг распределенные оркестраторы совместно с туманными вычислениями и динамическую кластеризацию для обеспечения максимальной стабильности кластера без необходимости миграции микросервисов.

3. Разработаны модель и метод функционирования сети, отличающиеся от известных использованием бессерверной архитектуры для миграции групп типовых микросервисов при применении метаэвристического алгоритма стаи серых для определения группы устройств, на которую будет мигрировать группа контейнеров с микросервисами, что позволяет как определить группу устройств, а не единичное устройство, так и уменьшить время принятия решения о миграции в десятки раз по сравнению с известным метаэвристическим алгоритмом роя частиц.

4. Разработан метод миграции микросервисов на основе согласованного на международном уровне нового протокола маршрутизации в среде динамических туманных вычислений, отличающийся от известных тем, что этот метод обеспечивает взаимодействие устройств туманных вычислений для миграции микросервисов и одновременно позволяет достичь снижения потребляемой энергии устройствами туманных вычислений на 41%, а также уменьшить долю потерянных пакетов в среднем до 34%.

5. Разработаны модель данных для датчиков и актуаторов, а также метод передачи этих данных, отличающиеся от известных тем, что данные формируются

с использованием костюма телеприсутствия и передаются в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары), что позволяет обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в разработке и исследовании комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и миграции микросервисов для обеспечения возможности повсеместной реализации на сети Российской Федерации услуг телеприсутствия.

Важными результатами, имеющими существенную теоретическую ценность, представляются также модель данных для датчиков и актуаторов для костюма телеприсутствия и метод передачи этих данных в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары), что позволяет обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных. Этот результат дает возможность занять достойное место в общемировых исследованиях по созданию мультивселенных.

Самостоятельную научную ценность имеют результаты по построению сетей связи на основе распределенных оркестраторов, что совместно с туманными вычислениями позволяет предоставлять услуги телеприсутствия в сельской местности и труднодоступны районах.

Практическая ценность работы. Практическая ценность работы состоит в разработке научно-обоснованных рекомендаций по созданию сетей связи на основе туманных вычислений для предоставления услуг телеприсутствия, что реализуется как в методике планирования сетей связи ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ», так и в международных стандартах (рекомендациях) сектора стандартизации электросвязи Международного Союза Электросвязи.

Реализация результатов работы. Полученные в диссертационной работе результаты внедрены в ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при разработке методике планировании сетей связи, в ФГБУ НИИР при выполнении государственных контрактов по научно-техническому и методическому обеспечению выполнения

Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций функций Администрации связи Российской Федерации в Секторе стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи в работах по разработке стандартов (вкладов), в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича при проведении НИР по Мегагранту «Исследование сетевых технологий с ультра малой задержкой и сверхвысокой плотностью на основе широкого применения искусственного интеллекта для сетей 6G» по соглашению № 075-15-2022-1137 с Министерством науки и высшего образования РФ, при выполнении НИР “Прикладные научные исследования в области создания сетей связи 2030, включая услуги телеприсутствия с сетевой поддержкой, и экспериментальная проверка решений при подготовке отраслевых кадров” в 2023г. № 123060900012-6, а также, при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ. Акты реализации диссертационных исследований представлены в Приложении Б диссертации.

Методы исследования. При проведении исследований были использованы методы теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории оптимизации, теории вероятностей, а также мета эвристические алгоритмы и методы имитационного и натурального моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Новая архитектура сетей для предоставления услуг связи, в том числе услуг телеприсутствия, на основе туманных вычислений, образующих туманности для динамического распределения ресурсов сети, что позволяет уменьшить долю трафика поступающего в ядро сети на 20%.

2. Модель и метод построения сетей связи общего пользования, обеспечивающие предоставление услуг телеприсутствия в сельской местности и труднодоступных районах на основе распределенных оркестраторов совместно с туманными вычислениями, позволяющие на основе динамической кластеризации обеспечить максимальную стабильность кластера (сохранение его структуры) без необходимости миграции микросервисов.

3. Модель и метод использования бессерверной архитектуры для миграции групп типовых микросервисов при применении метаэвристического алгоритма стаи серых волков для определения группы устройств, на которую будет мигрировать группа контейнеров с микросервисами, что позволяет как определить группу устройств, а не единичное устройство, так и уменьшить время принятия решения о миграции в десятки раз по сравнению с известным метаэвристическим алгоритмом роя частиц.

4. Метод миграции микросервисов на основе разработанного протокола маршрутизации в среде динамических туманных вычислений, обеспечивающий учёт весов не только ребер графа, но и весов самих устройств туманных вычислений, что позволяет по сравнению с существующими протоколами, достичь снижения потребляемой энергии устройствами туманных вычислений на 41% и уменьшить долю потерянных пакетов в среднем до 34%.

5. Модель данных для датчиков и актуаторов для костюма телеприсутствия, а также метод передачи этих данных в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары), позволяющие обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных.

Достоверность результатов. Степень достоверности полученных результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами натурального и имитационного моделирования (натурное моделирование проводилось на модельной сети в СПбГУТ), а также широким спектром публикаций и выступлений как на российских, так и на международных научных конференциях.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и были одобрены на следующих конгрессах, конференциях и семинарах: Семинар Заседание секции «Радиоэлектроника» Дома ученых имени М. Горького РАН – СПб – 16.11.2023, Конкурс "5G bloomig cup" – БРИКС – Китай – 12.10.2023, Форум V Международной конференции «Наука будущего», VIII Всероссийского молодежного научного форума «Наука будущего – наука молодых» Орел, Российская Федерация – 20.09.2023-23.09.2023, Конференция "2nd

International Meet & Expo on Robot Intelligence Technology and Applications (ROBOTMEET2023) – Ванкувер, Канада – 18.08.2023, Форум 2023 BRICS Forum on Future Networks Innovation (BFFNI) – БРИКС – Шэньчжэнь – 04.09.2023. – 05.09.2023, Конференция Distributed Computer and Communication Networks (DCCN 2023) – ИПУ РАН – Москва – 25.09.2023-29.09.2023, Конференция Second International conference on Cybersecurity, Cybercrimes, and Smart Emerging Technologies Университет принца султана – Эр-Рияд, Саудовская Аравия – 05.12.2023-07.12.24, Конференция the 26th IEEE International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT) Phoenix PyeongChang – Канвондо, Республика Корея – 04.02.2024-07.02.2024, Конференция the 26th IEEE International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT) Phoenix PyeongChang – Канвондо, Республика Корея – 04.02.2024-07.02.2024, UN metaverse Think-a-Thon Virtual Worlds Revolutionizing Smart Sustainable Cities & Communities, Организация Объединённых Наций (ООН), Женева, Швейцария 2024 , Глобальный Саммит “Искусственный интеллект во Благо”, Женева, Швейцария 2024, Форум МСЭ “Сети будущего” и тренинг “тестирование на соответствие и функциональную совместимость”, г.Ташкент, Республика Узбекистан, 2023, Конференция 23rd International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networks and Systems (NEW2AN) – Дубай (ОАЭ) – 21.12.2023-23.12.2023, Конференция The 7th International Conference on Future Networks & Distributed Systems (ICFNDS) – Дубай, ОАЭ – 21.12.2023-23.12.2023, Конференция Международная конференция по современным системам вычислений и связям следующего поколения (англ. International Conference on Advanced Computing & Next-Generation Communication, ICACNGC 2023). – СПб 12.10.2023-13.10.2023.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 64 публикациях, в том числе в 11 работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации; 19 работах в изданиях, включенных в международные базы цитирования; 2 отчетах о НИР; 32 работах в других научных 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: 4, 9, 10, 12, 18.

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

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ СЕТЕЙ БУДУЩЕГО: АРХИТЕКТУРА, УСЛУГИ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ, КОНЦЕПЦИЯ МУЛЬТИВСЕЛЕННОЙ

1.1. Актуальные проблемы и переход к интегрированным сетям ИМТ-2030

Сравнительно недавно на научной арене ещё обсуждалась концепция Интернета Вещей, которая по определению Международного Союза Электросвязи является глобальной инфраструктурой для информационного общества и естественным образом будет влиять на все стороны жизни человека: социальную и общественную, рабочую и экономическую, а также государственную. В 2012 году, когда была официально утверждена концепция Интернета Вещей (ИВ, на англ. IoT - Internet of Things) в рекомендации МСЭ-Т Y.2060/Y.4000 [1], еще неявно виден был масштаб ее влияния, хотя об этом и было упомянуто в самом определении. Интернет вещей породил иные “технологические измерения”, которые в настоящее время являются самостоятельными концепциями и обладают большим потенциалом [2, 3, 4]. Внося изменение в понимание сетей связи, услуги и их возможности, Интернет вещей ознаменовал новую эру развития сетей и услуг, заложил основу информационного общества, цифровой экономики и цифрового правительства стран. Благодаря ИВ, прозрачность производственных и бизнес процессов [5, 6] позволила достичь нового уровня эффективности используемых ресурсов, обеспечить безопасность потока ресурсов в системах. При этом, как уточняется во множестве публикаций, ИВ заложил основу концепции сетей связи пятого поколения [7, 8, 9]. Не случайно в научной и технической литературе пятое поколение сетей связи обозначают двумя смежными аббревиатурами - 5G/ИМТ-2020 [10]. При этом глубокая конвергенция сетей с переходом полностью на “пакетные” технологии и начальным внедрением инструментов Искусственного Интеллекта (ИТ) для задач мониторинга и управления сетью стали инфраструктурным фундаментом для роста и развития Интернета вещей [11 - 18].

В настоящее время мировое сообщество учёных и инженеров в области инфокоммуникационных технологий пристально изучает следующее поколение -

поколение сетей 2030 [19 - 23]. Концепция сетей ИТ-2030 была официально принята в конце ноября 2023 года [24]. В этой концепции особое внимание уделяется комплексу услуг телеприсутствия, которые в настоящее время являются новой научной проблемой, породившей достаточно много новых нетривиальных задач.

Переход к сетям ИТ-2030 прослеживается в глобальных стратегических документах, принятых как ООН, так и отдельно взятыми странами. В 2015 году Генеральной Ассамблеей ООН в резолюции «Повестка дня на период до 2030 года» были названы разработанные совместно со всеми странами-участниками 17 целей устойчивого развития (ЦУР). Данные цели заменили предшествующий документ Цели Развития Тысячелетия (ЦРТ). В итоговом документе Генассамблеи ООН «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года» содержатся следующие 17 глобальных целей устойчивого развития [25]:

1. Ликвидация голода и обеспечение продовольственной безопасности;
2. Ликвидация нищеты;
3. Обеспечения здорового образа жизни;
4. Обеспечение справедливого и качественного образования;
5. Обеспечение гендерного равенства с расширением прав для женщин;
6. Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов;
7. Обеспечение доступа к недорогостоящим, надёжным и современным источникам энергии для всех;
8. Содействие экономическому росту с достойно работой для всех и обеспечения занятости население;
9. Создание прочной инфраструктуры, содействие обеспечению устойчивой индустриализации и внедрению инноваций;
10. Снижение уровня неравенства внутри стран и между странами;
11. Обеспечение безопасности, устойчивости городов и населённых пунктов;
12. Обеспечение рациональных моделей производства и потребления;
13. Обеспечение и принятие мер по борьбе с изменением климата, а также его последствиями;

14. Рациональное использование океанических, морских ресурсов в интересах устойчивого развития;

15. Защита и восстановление экосистем земли (суши), а также содействие их рациональному использованию

16. Содействие построению миролюбивых сообществ в интересах устойчивого развития

17. Партнерство или укрепление средств достижения устойчивого развития. Эти семнадцать целей комплексно дополняют друг друга, здесь также стоит отметить, что в существующей отчетности за прошедшие несколько лет с года принятия стратегического документа ЦУР уже определены потребности в развитии технологий связи, что фундаментально обеспечит сокращение существующего цифрового разрыва. Цифровой разрыв с учетом бурного роста технологий за последние 30 лет является отдельно взятой проблемой, решение которой позволит ускорить решение 17-ти ЦУР. Одной из ключевых проблем цифрового разрыва является обеспечения передовыми технологиями пользователей удаленных районов (вне зависимости от страны). Таким образом, каждая из стран, которая так или иначе участвовала в разработке и согласовании ЦУР, на данный момент обладает широким спектром работ по каждому из направлений, которые отражены в различных государственных проектах.

В Российской Федерации (РФ) на данный момент запущены ряд национальных проектов, призванных разрешить существующие проблемы (не только цифрового характера) и обеспечить лидерство по многим направлениям. Если же рассмотреть отрасль связи, то стратегически важным документом является распоряжение Правительства РФ от 24 ноября 2023 года №3339-р, которым утверждена Стратегия развития отрасли связи Российской Федерации до 2035 года [26]. В первую очередь данный документ является отраслевым и направлен для гражданского применения в РФ. Стратегия развития отрасли связи РФ включает реализацию защищенной и современной телекоммуникационной инфраструктуры, внедрение современных и будущих технологических направлений развития сети и услуг, а также развитие кадрового и научного потенциала, в том числе вопросы

усовершенствования нормативно-правовой базы для предоставления бизнесу, государству и гражданам востребованных, конкурентоспособных и качественных услуг связи. Здесь же отмечается, что отрасль связи выполняет обеспечивающую миссию при предоставлении услуг связи для граждан (физических пользователей), бизнеса и государственного сектора. Действительно, инфокоммуникационные технологии обладают как инфраструктурно важным компонентом современного государства, так и обслуживающей компонентой для других секторов экономики. Сложно представить эффективное производство, обучение, решение государственных задач и услуг в современное время и в обозримом будущем без глубоко интегрированных в общественные процессы инфокоммуникационных технологий.

В части анализа представленной стратегии развития отметим, что за 2012-2022 года объем трафика в сети Интернет только в Российской Федерации вырос более чем в 11 раз - до 126,7 Эбайт (при этом среднегодовой прирост составил 27%). В то же время, ежегодный прирост абонентской базы сети РФ с 2017 года находится в среднем на уровне 3%. [26]. При этом данный показатель не учитывает устройства ИВ, прирост которых существенно больше, чем новых подключений физических пользователей к сети. В стратегии развития отрасли связи также упоминается про существующую работу по устранению цифрового разрыва, которая активно ведется с 2014 года в части обеспечения доступа к сети в удаленных населенных пунктах. Кроме того, отмечается, что ожидается увеличение объемов трафика в сегментах домохозяйств и, соответственно, пользователей мобильного широкополосного доступа к Интернет. Это в первую очередь связано с растущим потреблением мультимедийного контента высокого качества, включая игры, приложения виртуальной и дополненной реальности, сервисов с эффектом присутствия (по характеру близкие больше к сетям и услугам 2030), потокового видео в высоком разрешении. Учитывая данный обобщенный “портрет потребителя” и увеличение числа подключаемых абонентских терминалов, несложно определить соответствующие шаги в развитии сети,

которые целиком и полностью согласуются как с определенными ЦУР, так и принятой почти в то же время концепцией ИМТ-2030.

Рассмотрим некоторые из проблем, приведённых в стратегии развития сети Российской Федерации. В документе уделяется внимание комплексному развитию различных секторов экономики, что в итоге приводит, в том числе, к росту потребности абонентов в минимизации задержек с гарантией обеспечения требований в ряде сценариев (например, медицинский сектор) до 1 миллисекунды. В то же время, требуемые скорости для широкополосного доступа в 1-10 Гбит/с важны для следующих направлений [26]:

- умный город и связанные с ним системы городской безопасности, в том числе, услуги на базе технологий машинного зрения и машинного обучения;
- автоматизация производственных процессов. В данном направлении ожидается развитие/расширение концепции Индустрии 4.0/4.0+, о которой также упоминается в одном из сценариев построения сети 2030;
- управление БПЛА в режиме реального времени, в том числе при рассмотрении БПЛА как узлов единой сети связи;
- онлайн игры с расширенной возможностью погружения (так называемые иммерсивные технологии);
- онлайн образование (интерактивные уроки). Здесь также стоит обратить внимание на развитие концепции Интернета навыков;
- телемедицина. В перспективе рассматривается также возможность телехирургии с поддержкой видеостриминга в высоком качестве и поддержкой технологий дополненной и виртуальной реальности;
- автономный транспорт или беспилотный транспорт, который взаимодействует с придорожной инфраструктурой, другими автомобилями и объектами.

В стратегии [26] также приводится прогноз дальнейшего увеличения объема глобального Интернет-трафика в среднем на 30% в год, что может привести к росту в 30 раз в 2035 году, если сравнивать с 2022 годом. Таким образом, вышеприведенные тенденции указывают на возрастающую роль цифровых

решений для обеспечения эффективности в других отраслях экономики. Это, в свою очередь, приводит к росту требований к услугам связи, особенно в части покрытия, скорости, задержки и надежности передачи данных. Кроме того, данные услуги существенным образом дополняются такими инновационными решениями, как системы рекомендаций, основанных на анализе цифрового следа потребителя, а также технологиями генеративного искусственного интеллекта. Стоит отметить одну из самых значимых тенденций развития связи - включение негеостационарных спутниковых систем связи в общую сеть Интернет. Такой ход, как полагается, позволит достичь сокращения цифрового разрыва в части предоставления услуг. В стратегии развития отрасли связи РФ данному вопросу уделяется особое внимание, при этом называется такой вид сетей “гибридные орбитально-наземные сети связи”. На международной научно-технической арене такие сети получили название “интегрированные”, что по сути не меняет основного принципа сетей следующего поколения: конвергенция всех сетей связи, вне зависимости от области их применения: на земле, в воздухе, море или ближайшем космосе. Ожидается, что объем трафика в широкополосной сети доступа Интернет с применением негеостационарных спутниковых систем превысит объем трафика геостационарных спутниковых систем к 2030-му году и при этом к 2035 году сможет превысить его уже в два раза. Следует отметить, что консорциум 3GPP (3rd Generation Partnership Project) в 2022 году стандартизировал использование спутникового сегмента как части мобильной сети доступа [26].

В стратегии развития сети Российской Федерации также одними из ключевых тенденций развития технологий построения сетей определены следующие:

- Смещение вычислительных систем/мощностей к “границе сети”, то есть де-факто декомпозиция централизованных систем вычислений с распределением в ядре сети и на границе сети. Учитывая переход к виртуализации модулей систем управления сетями, размещение систем вычислений на границе сети является естественным решением. При этом данная тенденция приведет к росту числа небольших центров обработки данных (ЦОД), расположенных в области последней

мили, что в итоге позволит разгрузить центральные вычислительные облака, а также уменьшить нагрузку на ядро сети. Уменьшение нагрузки на ядро сети, учитывая вышеприведенную статистику, является достаточно актуальной задачей. Развитие данного тренда также влияет на существующие бизнес-модели в части ролей и их функций. Классический телеком-оператор 3-го уровня уже имеет свои облачные решения и развивает их совместно с сетью, предусматривая интеграцию на уровне архитектуры общей платформы с сервисами для предоставления пакетов услуг (здесь имеется в виду услуг формата b2b). Таким образом, к 2030-2035 году граница между двумя понятиями сервис-оператор и телеком-оператор будет полностью нивелирована.

- Второй важной тенденцией развития сетей является их виртуализация. Существует и на момент 2024 года активно используется стандарт ETSI NFV MANO, который определяет функциональную архитектуру систем управления и оркестрации виртуальными сетевыми сущностями/элементами. Виртуализация органично вошла в сегмент сетей связи из мира облачных серверных технологий. В настоящее время сервер с достаточно производительным аппаратным обеспечением и необходимым числом сетевых интерфейсов может вполне выполнять роль ядра сети или иных других узлов. В сетях пятого поколения модули управления базовой станцией, например, контроллер или шлюз являются уже программными продуктами и могут быть развернуты удалённо на NFV-сервере вблизи базовой станции. Технологии виртуализации сетевых функций также активно развиваются в кластерных системах облачных вычислений и продуктах операторов, например, vCPE (virtual Customer Primary Equipment).

- Существует также тенденция на использование открытых сетевых решений (OpenSource). Эта тенденция подкреплена сложившейся конъюнктурой на рынке разработки программного обеспечения. Существующие программные продукты основаны на принципе модульности и платформенности. Эти же принципы перешли в программное обеспечение мониторинга и управления сетями связи. В основе построения программного продукта для сетей связи лежит платформа. Принцип платформенности позволяет разрабатывать пользовательские услуги

очень быстро, что в итоге сокращает операционные затраты на введение новых функций. Платформа позволяет в режиме “онлайн” реагировать на изменения рынка, а также на обратную реакцию потребителя на те или иные функции. Применяя метод а/б-тестирования, владелец продукта/платформы улучшает уровень “потребительского опыта”, тем самым повышая лояльность потребителя – пользователя услуг. В условиях сложившейся конкурентной борьбы за пользователей у операторов данное преимущество является одним из главных. Таким образом, на данный момент сложилась следующая практика. Разработчики программного обеспечения объединяются в консорциумы, разрабатывая совместно открытый исходный код платформ и набора типовых услуг, а потом благодаря возможности открытой лицензии на программное обеспечение разрабатывают частные функции и реализуют в виде полноценных продуктов для операторов связи. Данная модель позволяет ускорить развитие технологий, а также обеспечить равенство для всех участников рынка на уровне использования единых открытых программных платформ. При этом данный бесплатный исходный код открыт для всех разработчиков и может быть использован любой страной, что, в том числе, учитывает сформированные цели устойчивого развития.

Исследуя особенности развития сетей связи в Российской Федерации, стоит учесть следующие факты. Как это было отмечено выше, важнейшей компонентой телекоммуникационной инфраструктуры являются системы ЦОД. Только за 2017-2022 годы число стойко-мест российских ЦОД выросло в 1,6 раза, а подведенная электрическая мощность - почти более чем в два раза. Существующая структура ЦОД отличается высокой неоднородностью, соответственно является не столь эффективной. Тому есть свои причины: быстрый рост рынка, мульти-вендорная проблема, возникшие санкции и прочее. При этом стоит отметить, что около 85% ЦОД на данный момент расположены вокруг крупнейших городов европейской части России. Учитывая дальнейший рост объемов ЦОД, часть из которых будут реализовывать функции виртуализации сегментов сетей, необходимо учесть естественный рост потребления электроэнергии и спрос на сопутствующие инженерные системы. Данная проблема уже остро стоит в ЕС, где стоимость

электроэнергии достаточно высока. Однако, даже при существующих ресурсных возможностях РФ все-таки необходимо искать более эффективный путь повышения вычислительной способности инфраструктуры РФ, без кардинального увеличения потребления электроэнергии. Одной из таких технологий, позволяющих в корне пересмотреть подход к использованию сетевых и вычислительных ресурсов, и посвящена данная диссертация [26].

В стратегии развития отрасли связи Российской Федерации выделены следующие проблемы, которые необходимо учесть в предстоящем десятилетии [26]:

- необходимость технологического обновления сетей с учётом тех решений, которые будут стандартизированы в сетях 2030. На основе заложенных архитектурных и технологических возможностей в сетях пятого поколения технологическое обновление возможно реализовывать с помощью программного обеспечения соответствующих модулей. Технологии SDR, SDN, NFV фундаментально обеспечивают данную возможность;

- уменьшение цифрового разрыва при предоставлении услуг для труднодоступных регионов, в том числе в части инженерной/энергетической инфраструктуры, а также для объектов транспортной инфраструктуры;

- существующий дефицит радиоресурсов, в условиях непрерывного увеличения трафика, в том числе пересечение требуемых ресурсов (согласно международным стандартам) с ресурсами, выделенными для других сегментов потребителей;

- существующий дефицит кадров в отрасли связи, а также неэффективные модели труда в организациях, инерция которых также мешает развитию перспективных технологий комплексно: начиная от науки, электронной базы, завершая внедрением и администрированием в перспективных сетях связи;

- необходимость обеспечения технологического суверенитета в области систем и сетей связи. Данная задача является достаточно сложной ввиду ее зависимости от других существующих проблем, некоторые из которых приведены выше.

- необходимость обеспечить более полное присутствие РФ в международных стандартизирующих организациях, например, Международном Союзе Электросвязи, с целью донесения национальных решений и их защиту на международном уровне, что в конечном итоге напрямую влияет на технологический суверенитет и безопасность РФ.

Международный взгляд на перспективные сети 2030

Переходный процесс между поколениями сетей связи обычно имеет достаточно мягкий характер, учитывая различные факторы, такие как: инерционность рынка (от производителя до пользователя), разрывы в общем составе технологий (в частности обратной совместимости), а также в стандартизирующих документах по ряду ключевых вопросов предоставления услуг (например, междоменные взаимодействия VoLTE). Вследствие этих и других факторов рынка переход к поколению сетей 5G/IMT-2020 относительно изначальных планов существенно увеличился по времени [27-32]. При этом принятая концепция построения сетей 2030 (неформально 6G) в 2020 году Международным Союзом Электросвязи (МСЭ-Т) получила колоссальный отклик среди представителей международной стандартизации и науки.

Ниже будут рассмотрены некоторые основные документы МСЭ-Т, относящиеся к актуальным вопросам исследования архитектуры сети 2030, а также те, которые представляют решения как для сетей 5G/IMT-2020 [33-35], так и с поддержкой последующего поколения сетей 2030. В рамках МСЭ была создана специальная Фокус группа “FG NET-2030” в рамках деятельности основной Исследовательской комиссии (ИК) 13, исследовавшая основные вопросы создания сетей 2030/6G [36-38] и их приложений, таких как: голографический тип коммуникаций (НТС - Holographic Type Communications), роботы-аватары и т.д. Фокус группа провела исследовательскую работу, результаты которой были представлены в виде Технических отчётов (TR-Technical Report) и спецификаций.

Стоит отметить отдельно то определение, которое приведено в одном из основополагающих документов ИТУ по сетям 2030.

Сети 2030 - это Система, системные компоненты и связанные с ними аспекты, относящиеся к интегрированным, высоко автоматизированным, интеллектуальным сегментам инфраструктуры (в том числе, включая разнородные ресурсы связи, вычислений, хранения и сетевых услуг/приложений), которые содержат ряд операционных доменов оператора во всех сегментах сети (проводной/беспроводной доступ, ядро, граничная часть, космос или смесь этих сегментов), к которым пользователь может получить доступ из одного или нескольких местоположений [20].

Ниже в таблице 1.1 представлен анализ основных документов Международного Союза Электросвязи по архитектурным проблемам построения сетей 2030 по результатам исследований Фокус группы, а также по высокоуровневым технологическим основам: концепциям, принципам, методам, требованиям.

Таблица 1.1 – Анализ актуальных спецификаций МСЭ-Т по сетям 2030

Название	Группа/ год	Вопрос	Суть документа
FG-NET2030-Arch Network 2030 – Architecture Framework	FG NET 2030/ 2020	Архитектура	Данный документ МСЭ является одним из базовых для сетей 2030/6G. Техническая спецификация описывает архитектурные принципы для сетей общего пользования 2030/6G. Также планируется, что данная спецификация будет использована и уточнена по следующим вопросам: интегрированная архитектура граничных вычислений,

Название	Группа/ год	Вопрос	Суть документа
			<p>маршрутизация и адресация в сети, обеспечение безопасности каналов передачи медиаданных, качество услуг (QoS), сегментация сети и управление сетью 2030/6G.</p> <p>Данный документ описывает также пользовательские сценарии и требования, которые должны будут реализовывать сети 2030.</p> <p>Далее определим основные разделы документа, которые представляют собой первоочерёдный интерес относительно темы проводимого исследования:</p> <ul style="list-style-type: none"> - clause 6. “Architecture principles”. В данном пункте определены фундаментальные принципы, которые необходимо учесть в общей архитектуре сети 2030, а также в частных ее сегментах. - clause 7. “Overall architecture”. В данном пункте определена концепция высокоуровневой

Название	Группа/ год	Вопрос	Суть документа
			<p>архитектуры сети 2030/6G. Основная идея - это глубоко интегрированная сеть (сеть сетей) космоса, мобильных, фиксированных сетей, включая водные сегменты сети, а также сеть автоматизированная (концепция автономных сетей - прикладной ИИ).</p> <p>- clause 8. "Access network and edge". В данном пункте приводится анализ и рекомендации по технологиям уровня доступа и граничных вычислений, как неотъемлемой части сетей 2030.</p> <p>- clause 9. "Space Networking". Сеть 2030 будет включать в себя сегменты, расположенные на LEO (Low Earth Orbit) и призваны реализовывать как сетевые, так и вычислительные функции. Например, набор спутников сможет представлять "созвездие граничных вычислений" - распространение</p>

Название	Группа/ год	Вопрос	Суть документа
			<p>серверов архитектуры МЕС в пространство сети космоса.</p> <p>- clause 10. “Routing and addressing”. В этом разделе основное внимание уделяется новым требованиям к протоколам маршрутизации для сети 2030/6G с учётом новых видов услуг сети.</p> <p>- clause 11. “Security, Privacy and Trust”. В данном разделе рассматривается один из самых важных вопросов сети будущего - обеспечение безопасности и доверительной среды услуг. Учитываются возросшие возможности ИКТ технологий: кибер-физическая среда, распределенный искусственный интеллект и другие, на основе которых целесообразно развивать новые решения в области обеспечения информационной и кибер-физической безопасности с учётом распространения в</p>

Название	Группа/ год	Вопрос	Суть документа
			<p>ближайшее время квантовых вычислительных систем.</p> <p>Данный раздел также содержит ответы на следующие вопросы: принципы систем управления, а также внедрение квантовых коммуникаций (систем безопасности).</p> <p>Вывод: данная рекомендация является фундаментальным документом, который определяет видение, принципы, методы, функции и характеристики сетей 2030/6G. Определённые в документе ключевые метрики должны быть учтены в процессе проектирования архитектуры сети 2030, а также её частных (относительно услуг) сегментов.</p>
<p>FG-NET2030 – Technologies for Network 2030</p>	<p>FG NET 2030 / 2020</p>	<p>Анализ технологий для стандартизации Net2030</p>	<p>Данный документ МСЭ носит ключевое значение в области формирования видения технологического разрыва между текущим и будущим поколениями сети. Определены</p>

Название	Группа/ год	Вопрос	Суть документа
			<p>множество векторов, по которым необходимо вести активную исследовательскую деятельность для последующей разработки решений, их формализации в виде международных стандартов и рекомендаций.</p>
FG-NET2030-Terms	FG NET 2030 / 2020	Термины и определения для сетей 2030	<p>Данный документ содержит ключевые термины и определения, применяемые в рамках концепции сети 2030/6G. Стоит отметить, что данный документ уточняет уже ряд существующих принятых терминов.</p> <p>Например, сеть доступа - это последняя миля для подключения пользовательских устройств. Сетью доступа могут быть: мобильные радиосети, медные линии, оптоволокно, спутниковая или плавающая сеть.</p> <p>Также определено множество других понятий, таких</p>

Название	Группа/ год	Вопрос	Суть документа
			как: backhaul, burst forwarding, controller (включая его значение на базе сети спутников LEO).
FG-NET2030-Sub-G1	FG NET 2030 / 2020	Ключевые требования и примеры использования сети 2030	<p>Данный технический документ определяет следующие семь сценариев:</p> <ul style="list-style-type: none"> - связь голографического типа (НТС); - тактильный интернет для удаленных операций (TIRO); - интеллектуальная операционная сеть (ION); - сетевая и вычислительная конвергенция (NCC); - цифровой двойник (ДТ); - наземно-космическая интегрированная сеть (STIN); - промышленный IoT (IIoT). <p>Также указаны их соответствующие ключевые сетевые требования. Сценарии для услуг сетей 2030 и соответствующие требования будут рассмотрены в следующем разделе диссертации.</p>

Название	Группа/ год	Вопрос	Суть документа
			<p>Во второй части данного документа предложены пять параметров требований, которые оцениваются относительно друг друга для сравнения с требованиями для каждого сценария. С помощью методологии кластеризации эти измерения также представлены графически. На основе этого документа можно легко выделить наиболее важные требования для каждого случая, чтобы предоставить будущим проектировщикам сетей высокоуровневую перспективу различных проблем, предусмотренных в качестве требований будущих вариантов использования новых сетей.</p>

К основным документам, относительно архитектуры сетей 2030 можно отнести технический отчет МСЭ FG-NET2030-Arch "Network 2030 - architecture Framework". В рамках анализа работ, выполняемых МСЭ, были проанализированы самые актуальные проекты рекомендаций, рассмотренных в 11 и 13 ИК в текущем исследовательском периоде, который завершился в 2024 году.

В Секторе стандартизации телекоммуникаций международного союза электросвязи (МСЭ-Т) существует десять исследовательских комиссий (ИК), в рамках которых рассматриваются проекты международных рекомендаций/стандартов. С точки зрения объекта исследования (перспективные архитектуры сетей 2030/6G) основной интерес представляют результаты работы следующих исследовательских комиссий:

1. ИК 11. Специализируется на вопросах протоколов, междоменному взаимодействию (к примеру VoLTE/ViLTE interconnection), тестированию и борьбе с контрафактными и краденными устройствами телекоммуникаций/ИКТ, а также с контрафактным или измененным программным обеспечением. Одним из важнейших направлений исследований ИК 11 являются протоколы, необходимые для поддержки роуминга и инновационных услуг в реальном времени, таких как интерактивные услуги в сетях LTE/5G(IMT-2020) и следующего поколения (Сети 2030/6G). Текущие работы также включают в себя 5G/IMT-2020 и сети 2030/6G с рассмотрением вопросов интеграции инструментов ИИ в процессы взаимодействия систем телекоммуникаций и предоставления инновационных услуг.

2. ИК 13. Специализируется на разработке требований к будущим сетям связи (5G/6G), архитектурам, функциональным возможностям будущих сетей и услуг, а также прикладных программных интерфейсов. Ключевые вопросы ИК: сетевое программное обеспечение и оркестрация сетей, информационно-ориентированные сети, контент-ориентированные сети и применение машинного обучения в сетях будущего. Данная комиссия также отвечает за исследования, касающиеся будущих вычислений, включая облачные вычисления и обработку данных в сетях ИКТ. Эта ИК охватывает сетевые возможности и технологии для поддержки использования данных, обмена данными, совместного использования и оценки качества данных.

На основе первичного анализа был сформирован ряд критериев, по которым выполнялся дальнейший детальный анализ каждого из проектов рекомендаций МСЭ-Т. В таблице 1.2 сформированы критерии анализа рекомендаций МСЭ-Т и комментарии к ним.

Таблица 1.2 – Критерии оценки тематики работ в МСЭ-Т

Критерии	Комментарии
Архитектура	Рекомендации, которые определяют архитектурные решения от верхнеуровневых концепций до низкоуровневых деталей, определяющие так называемые структуры (frameworks).
Методы и модели	Рекомендации, определяющие принципы, модели и/или методы в рамках верхнеуровневых концепций.
QoS & другие требования	Рекомендации, определяющие различные функциональные, нефункциональные, системные и иные требования к будущим услугам, сетям. В том числе определение QoS (качество обслуживания) и QoE (качество восприятия).
Квантовые коммуникации	Рекомендации, так или иначе связанные с технологиями квантовых коммуникаций и управлением доверенных сред на основе квантовой криптографии.
LEO	Рекомендации, описывающие сегмент будущих сетей связи на базе группировки низкоорбитальных спутников.
Cloud & Orchestration	Рекомендации, связанные напрямую или косвенно с устройством облачных технологий, в том числе MEC, Edge, Туманные вычисления (с англ., Fog computing).
Test specifications	Рекомендации, описывающие процессы, методы, инструменты и т.п. в области тестирования технологий, систем и сетей. В том числе тестирование на соответствие, тестирование на совместимость и другие виды тестирования.
New protocols	Рекомендации, которые определяют новые протоколы и/или расширения существующих для предоставления перспективных услуг.

Критерии	Комментарии
Previously generations	Рекомендации, которые уточняют проблемные вопросы существующих и прошлых поколений сетей. Например, вопросы в IMS, LTE. Существуют ряд проектов рекомендаций, посвящённых вопросам безопасности сети ОКС №7. Одним из актуальных вопросов, в том числе, является исследование и определение междоменных взаимодействий в рамках услуги VoLTE.
AI/ML	Рекомендации, содержащие вопросы внедрения инструментов Искусственного интеллекта в сети связи. Все рекомендации разрабатываются с учётом спецификаций и технических отчётов специальной Фокус группы по Автономным сетям при 13 ИК МСЭ-Т.
Security & trust	Рекомендации, относящиеся к вопросам обеспечения информационной и кибер-физической безопасности в сетях и услугах как в текущих поколениях, так и в перспективных сетях и услугах 2030/6G.

На следующем рисунке (рис. 1.1) представлена диаграмма, отображающая актуальные направления разработки проектов рекомендаций в исследовательской комиссии 11 МСЭ-Т. Для анализа были взяты действующие проекты рекомендаций 2022-2024 исследовательского

периода из базы данных документооборота МСЭ-Т. Проекты рекомендаций представляют собой документы с нестабильным текстом, то есть те, которые ещё дорабатываются в рамках заседаний соответствующих исследовательских комиссий.

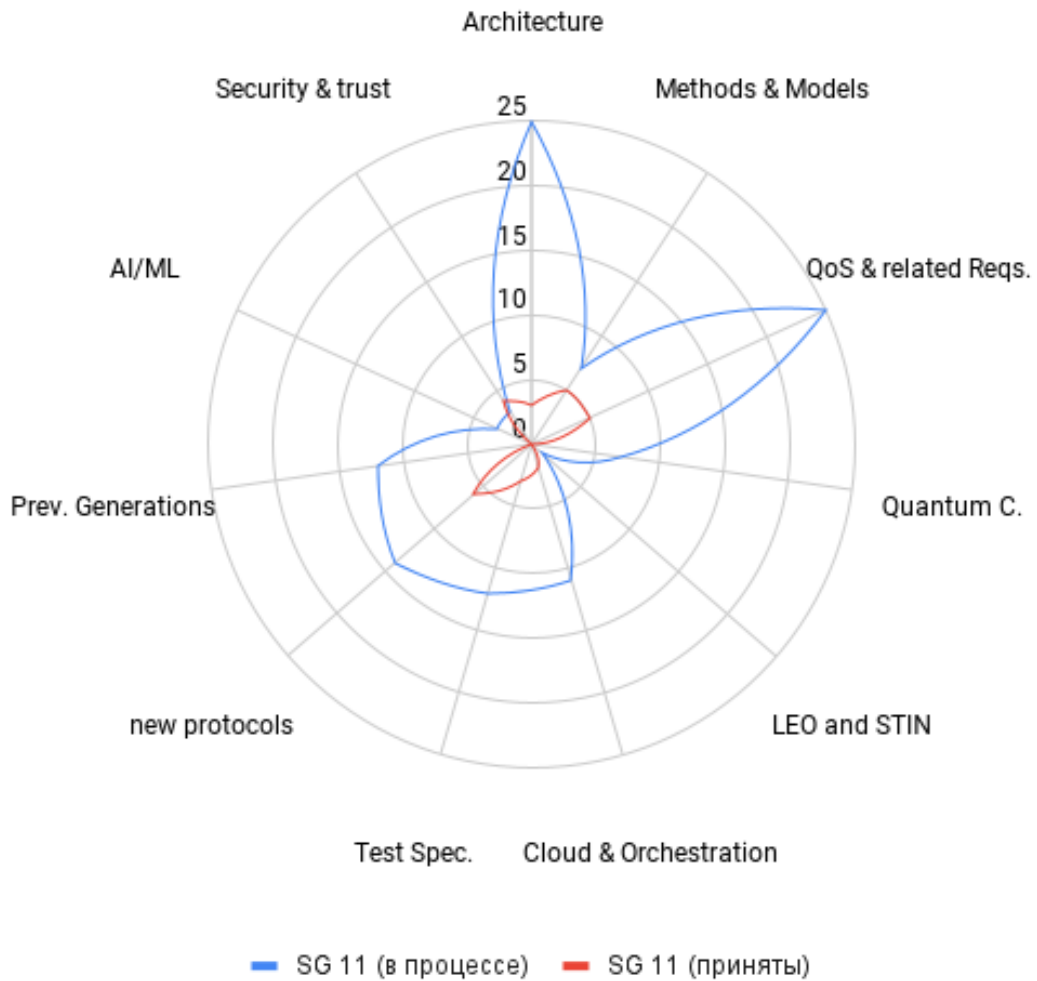


Рисунок 1.1 – Анализ документов ИК 11 МСЭ-Т.

В процессе анализа актуальных направлений существующего пула проектов рекомендаций МСЭ-Т было отмечено, что ряд документов содержат определённую синергию исследовательских задач, например, проект рекомендаций, описывающий требования и фреймворк систем распределения квантовых ключей на базе низкоорбитальной группировки спутников, которая в свою очередь представляет собой глубоко интегрированный сегмент сети 2030/6G. Таким образом, данный проект рекомендации был отнесён к нескольким критериям, учтён в соответствующей статистике и отражён на графиках.

Полученные результаты на рисунке 1.1 позволяют оценить в том числе и актуальность разработки решений в тех областях, в которых ещё не ведутся достаточно активные работы для комплексного развития технологий. В частности,

было установлено, что отсутствуют проекты рекомендаций, которые описывают частные случаи архитектуры сети для комплекса услуг, предоставляемого поверх роботизированных сетей 6G. Определены только принципы, которым должна соответствовать архитектура, а также требования к обеспечению качества при инжиниринге времени (3 категории: on-time, in-time, coordinative services).

На следующем рисунке (рис. 1.2) представлена диаграмма, отображающая соответствующие актуальные направления разработки проектов рекомендаций и уже принятых рекомендаций в исследовательской комиссии 13 МСЭ-Т.

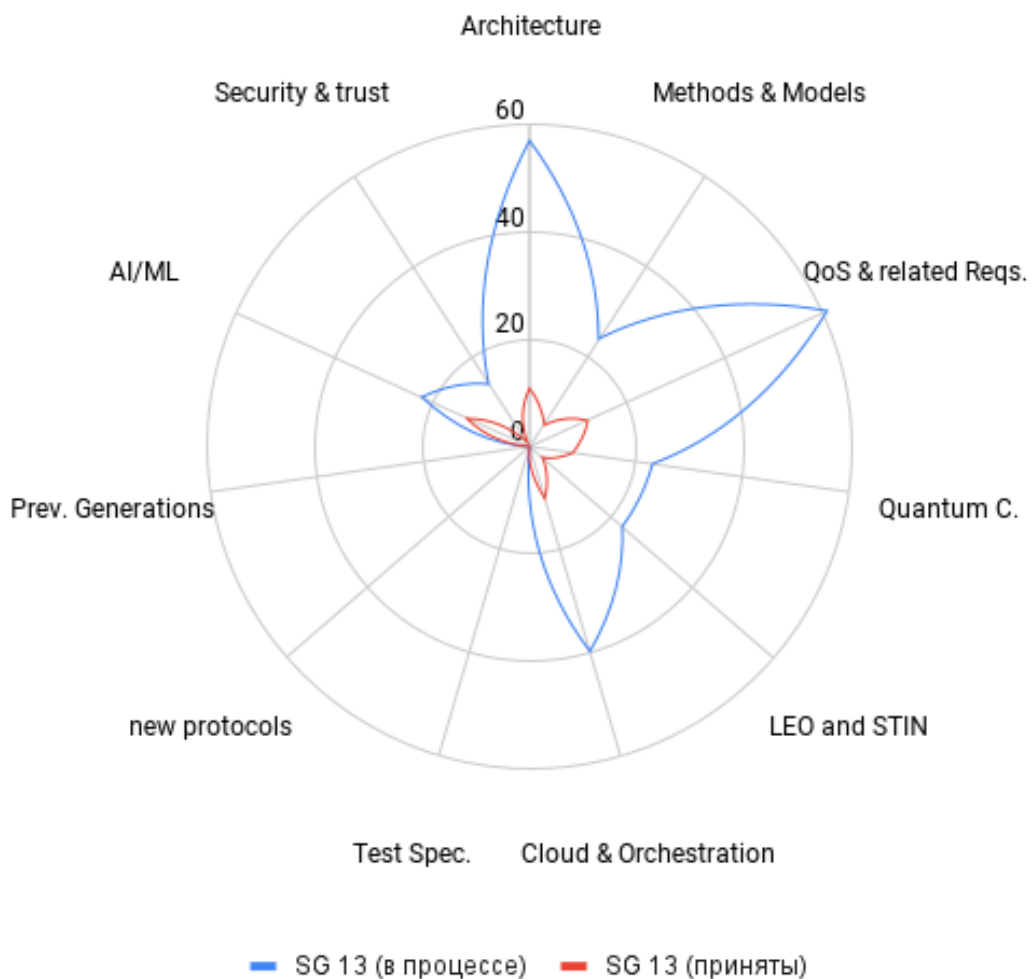


Рисунок 1.2 – Анализ документов ИК 13 МСЭ-Т

На рисунке 1.2 представлены результаты анализа направлений разработки проектов рекомендаций ИК 13 МСЭ-Т за 2022-2024 исследовательский период. В большинстве случаев в 13 ИК основное внимание было уделено следующим

направлениям: Искусственный Интеллект (ИИ) и машинное обучение, архитектура сети и облачных систем, обеспечение качества предоставляемых услуг и разработка новых требований (от архитектурных до функциональных), а также Облачным вычислениям и оркестрации. ИК 11 МСЭ-Т (рис.1.1) за этот период выпустила основные рекомендации в следующих направлениях: новые протоколы, безопасность (в первую очередь для предыдущих поколений сетей), обеспечение качества в сетях для существующих и перспективных услуг.

В условиях ведущихся работ в 2022-2024 исследовательском периоде в 13 Исследовательской комиссии был создан вопрос Q23/13 “Networks beyond IMT-2020: Fixed, mobile and satellite convergence”. Как можно заметить, в названии данного вопроса приведен объект стандартизации – сети после IMT-2020: конвергенция фиксированных, мобильных и спутниковых сетей. Как видим, международный взгляд на развитие сетей связи вполне очевиден и совпадает с концепцией сетей 2030, принятой фокус группой в 2020-ом году МСЭ-Т, а также совпадает со стратегией развития сетей Российской Федерации и концептуальным взглядом со стороны ученых. В большинстве публикаций по сетям будущего отмечена их конвергенция и в литературе такие сети имеют следующее название - SAGSIN (Space-Air-Ground Sea Integrated Network).

Рассмотрим процесс перехода к сетям 2030 от сетей 2020. Ассамблея радиосвязи 2023 года (AP-23) утвердила пересмотренную версию Резолюции МСЭ-Р 56, подтвердив название следующего поколения IMT (также известного как «6G») как «IMT-2030», а также Резолюцию МСЭ-Р 65, в которой описываются принципы развития IMT сетей. Наряду с этими изменениями AP-23 также утвердила новую рекомендацию по «Структуре IMT-2030», которая теперь станет рекомендацией МСЭ-Р М. 2160 “Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond” В данной рекомендации МСЭ-Р описываются структура и общие цели развития наземной сети как компонента международной мобильной сети (IMT - International Mobile Telecommunications) на 2030 год и последующий период (IMT-2030). В текущем документе рассматривается основа развития IMT-2030, включая широкий спектр возможностей сети связи, связанный с

предполагаемыми сценариями использования. Кроме того, в этом документе приводятся цели развития ИМТ-2030, которые включают дальнейшее совершенствование и развитие существующих систем ИМТ. Также рассматриваются проблемы взаимодействия с другими сетями связи.

Согласно представленным исследованиям по архитектурным вопросам сетей 2030 (в том числе на базе анализа пакета технических отчетов и спецификаций МСЭ, а также анализу документов формата White Paper от ведущих компаний-разработчиков/вендоров), были определены следующие принципы создания сетей 2030. Данным принципам необходимо следовать при разработке и развитии архитектуры сети 2030, а также ее суб-систем или доменов:

1. Простота (Один из важных принципов построения сетей ИМТ-2030, который требуется учитывать при возрастающей сложности и наборе новых услуг, а именно: необходимо стремиться к упрощению технологических решений от протоколов до архитектур);

2. Программно-конфигурируемые сети (декомпозиция функций сети и обеспечение их программируемости через высокоуровневые программные интерфейсы - API);

3. Обратная совместимость (при сохранении функциональных и нефункциональных преимуществ сети 2030/6G);

4. Гетерогенность (свойство будет распространяться не только на сеть, но и на область вычислений, хранения данных, услуг и их взаимодействия);

5. Сетевой слайсинг (Сетевой слайсинг представляет собой набор сетевых функций и инфраструктурных ресурсов (то есть: управляемые ресурсы подключения, вычислительные ресурсы и ресурсы хранения данных).

6. Однозначное наименование сетевых функций и услуг. (пользователь или пользовательские системы обращаются больше не к конкретному серверу, а к контенту, функции или услуге, которые будут размещены на сервере. Таким образом, в ИМТ-2030/6G должно поддерживаться однозначное наименование/описание сетевых функций, виртуальных сетевых функций и услуг).

7. Внутренняя анонимность и поддержка безопасности для всех сетевых операций. (В сетях ИМТ-2030 анонимность представляет собой способность сети предоставлять возможность связи, при которой одна конечная точка не уведомляется о какой-либо личности другой стороны связи. Поддержка всех сетевых операций должна быть встроена во все данные (малые и большие данные), а также непосредственно в услуги. Таким образом, ИМТ-2030 будет включать в себя два важных аспекта: (а) анонимность предлагаемых сетевых услуг и (б) более высокий уровень защиты инфраструктуры. Это включает в себя высокую степень внутренней анонимности (т. е. защиту сетевых операций от злонамеренных атак или сбора конфиденциальной информации посредниками).

8. Устойчивость инфраструктуры. (Взросшие функциональные возможности сети расширяют круг возможных угроз кибер-физического характера, предоставляют больше доступа для потенциальных злоумышленников).

Архитектурные принципы сети связи и услуг - это проектные решения, используемые в качестве основы для работы системы. Каждый принцип применим к определенному набору точек зрения на архитектуру. С точки зрения пользователя принципы построения системы понимаются как существенные характеристики системы, отражающие назначение системы и ее эффективное функционирование.

МСЭ-Т выделяют также следующие дополнительные новые характеристики и возможности сети 2030:

- Детерминизм в задержках и передача без потерь;
- Встроенная поддержка нескольких типов услуг, своевременная активация и доступность услуг;
- Гибкость настройки сетевых сервисов и сетевых функций;
- Эффективный программируемый сетевой протокол;
- Безопасные и доверительные сети;
- Более высокий уровень устойчивости перед отказами;
- Глубокая интеграция множества Интеллектуальных методов (на базе ИИ) в сетевую инфраструктуру для задач мониторинга, управления и автономизации.

Концептуальная схема сети ИМТ-2030 приведена на рисунке 1.3, где представлены сценарии сети (главные технологические направления) и их взаимосвязь с предыдущим поколением 5G/ИМТ-2020, которые де-факто являются продолжением соответствующих технологических направлений развития ИМТ-2020. Эти технологические сценарии/направления являются естественной преемственностью, кроме того, стоит учесть их наукоемкость. При этом некоторые из них породили новые представления о потенциале сетей и услуг и расширение возможностей пользователя.

Далее рассмотрим более подробно основные приложения для ИМТ-2030.

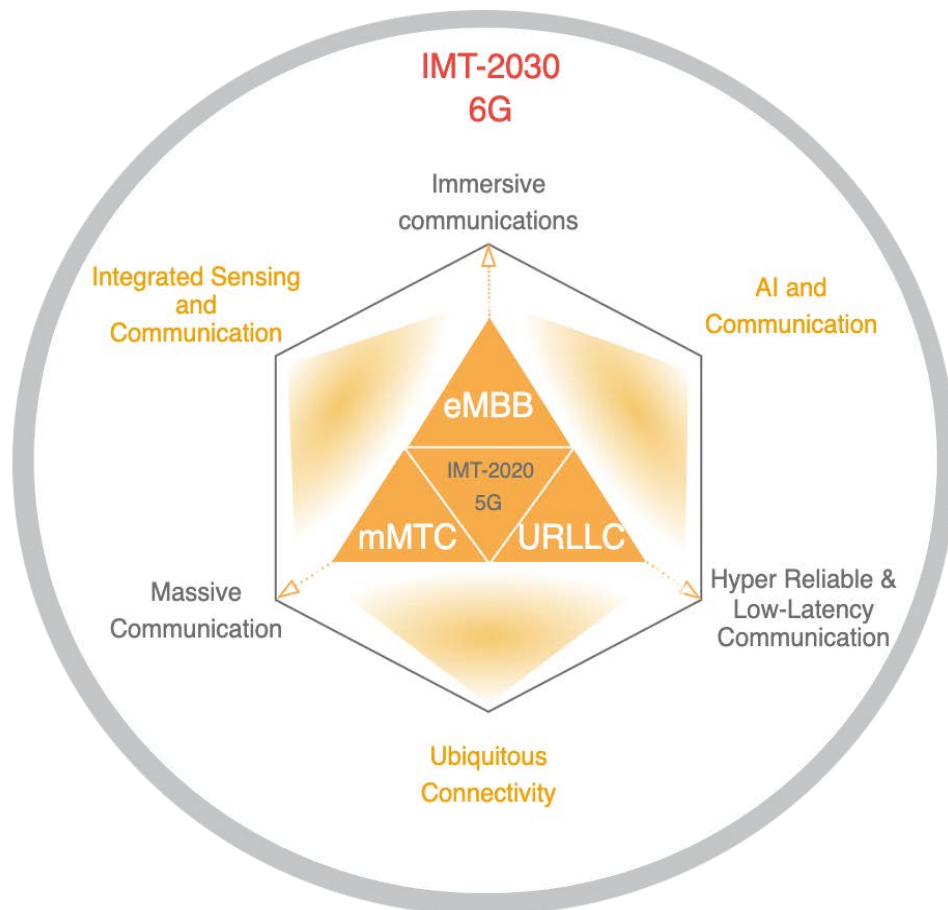


Рисунок 1.3 – Концепция сети ИМТ-2030.

На рисунке 1.3 приведены основные приложения ИМТ-2030, которые имеют прямую связь с приложениями ИМТ-2020:

1. *Massive Communication* (с англ., массовые коммуникации), что представляет собой расширение mMTC (massive Machine Type Communication, с

англ., Массовые машинные коммуникации), в том числе рассматриваются всевозможные коммуникации между роботами и людьми-пользователями, а также роботами-роботами, устройствами Интернета вещей в рамках концепции Умного и безопасного города и многие другие;

2. *Immersive Communication* (с англ., иммерсивные коммуникации или коммуникации с более глубоким погружением пользователя в цифровой мир/реальность), что в свою очередь представляет расширенные направления eMBB (enhanced Mobile Broadband, с англ., широкополосная мобильная связь). При этом можно также определить то, что новое приложение включает в себя и части направления mMTC и URLLC (Ultra-reliable and Low-Latency Communication, с англ., сверхнадежная сеть связи с ультрамалой задержкой), что де-факто представляет собой конвергенцию ранее принятых технологических направлений, о чем выше было упомянуто.

3. *Hyper Reliable & Low-Latency Communication* (HURLLC - с англ., гипер надежные сети связи с ультра-малой задержкой), что представляют собой расширенное направление URLLC. При этом HURLLC включает в себя URLLC для ряда услуг и, в том числе, более высокие требования для одного из приложений сети 2030.

На рис.1.3 также приведены новые приложения, которые определены в концепции ИМТ-2030, а именно:

4. *Artificial Intelligence (AI) in Communication* (с англ., Искусственный Интеллект в связи). На самом деле данное приложение является естественным продолжением заложенной в ИМТ-2020 концепции автономных сетей связи, которыми в свое время начинала заниматься фокус-группа МСЭ-Т при 13 ИК (Исследовательской комиссии) “Автономные сети” в рамках процесса престандартизации. При этом в настоящее время можно обнаружить достаточно большой набор разработанных Рекомендаций МСЭ-Т и в самой 13 ИК, где определены фундаментальные вопросы реализации технологий ИИ в сети связи для достижения автономности сети. Учитывая связность технологий и принципов между двумя поколениями ИМТ-2020 и ИМТ-2030, естественным является и

преимущество работ по автономным сетям и в качестве отдельного приложения сетей 6G/ИМТ-2030.

5. *Ubiquitous Connectivity* (с англ., повсеместная/всепроницающая связь). Данное направление раскрывает концепцию МСЭ-Т сетей 2030 - STIN (Space-Terrestrial Integrated Network) и является предложением по решению ряда ЦУР, в том числе для сокращения цифрового разрыва с удаленными районами и поселениями, о котором говорится как в целях устойчивого развития ООН, так и в стратегии развития сетей связи Российской Федерации.

6. *Integrated Sensing and Communication* (с англ., интегрированное зондирование и связь). Данное направление, в первую очередь, формирует целый пакет задач в области позиционирования в сети ИМТ-2030 и тесно связано с другими приложениями ИМТ-2030. При этом уточняется требование по позиционированию объектов - до 10см.

Таким образом, архитектура сетей и услуг ИМТ-2030 будет учитывать несколько сегментов: морской, наземный, воздушный и космический (в первую очередь низкоорбитальный с развитой сетью на геостационарной орбите, а также на негеостационарных орбитах) [39, 40]. В условиях гетерогенности технологий услуг пользовательский трафик может быть маршрутизируемым в различных плоскостях интегрированной сети и при этом с соблюдением требований качества обслуживания и качества восприятия. Данная цель может быть достигнута только при успешном решении большого набора задач [41]. В рамках научных исследований в области ИМТ-2020 исследовались и решались множество задач по летающим сенсорным сетям (сетям FANET), а также задач декомпозиции вычислительных облачных структур. На данный момент развития технологий 5G/ИМТ-2020 многие из приведенных решений находят свое применение в современных услугах. В тоже время, в условиях интегрированных сетей ИМТ-2030 и тех приложений, которые предложены в МСЭ и во множестве научных статей, необходимо учитывать архитектурные особенности и физическую динамичность ряда сегментов сети при разработке новых моделей и методов реализации услуг.

Рассмотрим далее развитие концепции МЕС (Multi-access Edge Computing, с англ., многоуровневых распределенных вычислений). Можно найти немало работ, где предлагается размещение узлов МЕС на динамических платформах, которые, в свою очередь, могут перемещаться в физическом пространстве. Например, использование БПЛА (включая привязной тип БПЛА) в качестве мобильных узлов-координаторов [42, 43], которые принципиально отличаются ресурсами энергии и другими характеристиками. Для сетей ИМТ-2030 роль БПЛА является одним из уровней трехмерной интегрированной сети, связывающий наземный воздушный и низкоорбитальный сегменты. Развивая направление декомпозиции облачных структур, мировое сообщество ученых и инженеров сформировало следующий уровень декомпозиции вычислительных систем, который позволяет учитывать малообъемные, с точки зрения ресурсов, устройства и распределять соответствующие вычислительные задачи на данные вычислительные кластеры. Учитывая характеристику сверхплотности сетей ИМТ-2030, туманные вычисления смогут представлять собой достаточно массивный вычислительный кластер, который, в свою очередь, может быть интегрирован в сеть связи общего пользования. В настоящее время существуют различные научные публикации по данной тематике. Диссертация направлена на исследования и разработки моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений для предоставления услуг телеприсутствия в сетях ИМТ-2030.

Общая идея интегрированной сети с морским, наземным, воздушным и космическим сегментом концептуально представлена на рисунке 1.4.

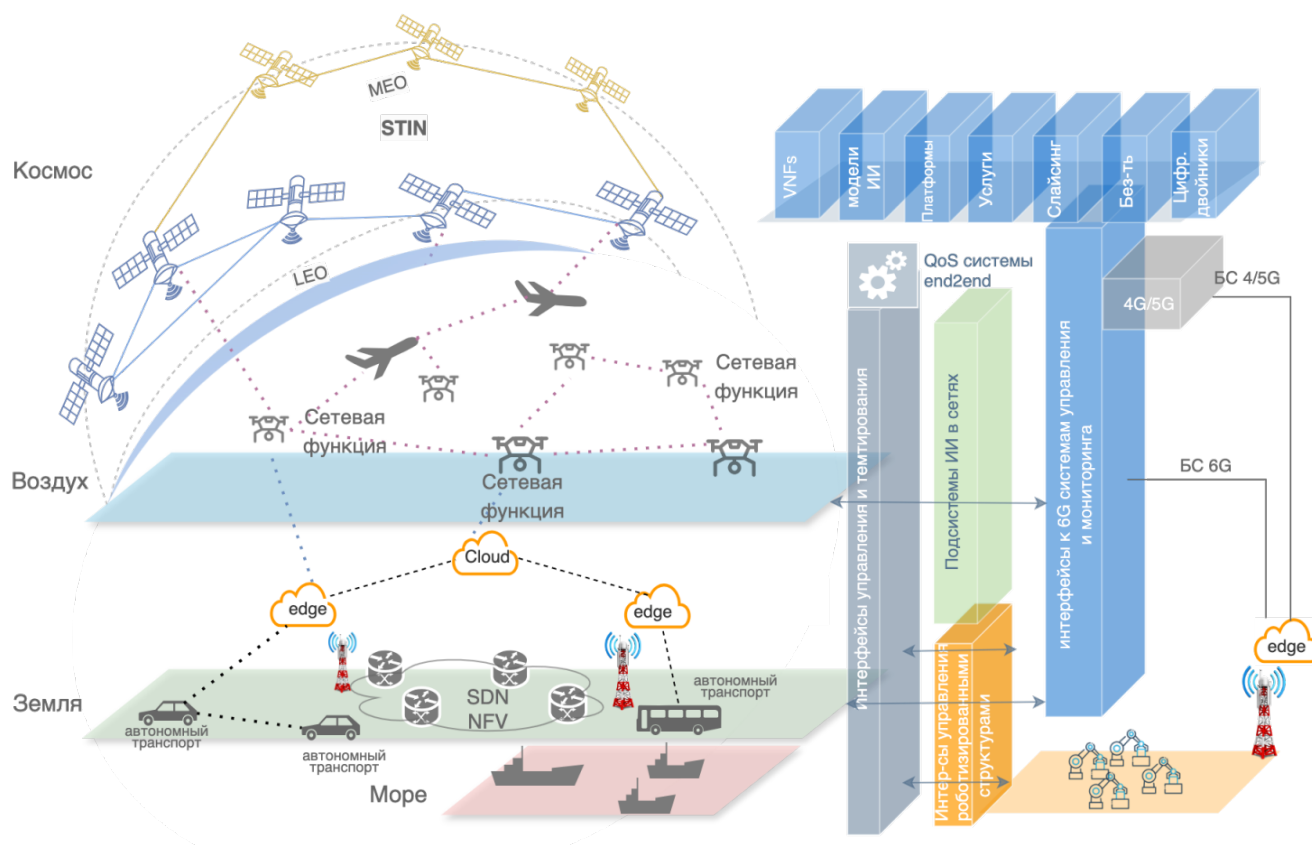


Рисунок 1.4 – Концепция интегрированных трёхмерных сетей

На рисунке 1.4 туманные вычисления представлены в различных практических сценариях реализации. Например, устройство туманных вычислений может быть представлено в виде пользовательского устройства, а также транспорта (в том числе автономного) и БПЛА, при этом данные устройства взаимодействуют с основной статической архитектурной многоуровневых облачных вычислений. На рис.1.4 представлены в том числе и другие модули сети, которые соответствуют развитию систем мониторинга и управления сетей 5G/IMT-2020. Например, подсистема VNFs (Virtual Network Functions, с англ. виртуальные сетевые функции) или подсистема сетевого слайсинга [44, 45], который должен стать более естественным при применении сетей IMT-2030. Отдельной задачей научных исследований в области туманных вычислений является изучение их форм и структур для систематизации и повышения уровня детерминированности. Данному вопросу посвящено одно из положений настоящей диссертации.

1.2. Услуги телеприсутствия и их требования

Как уже ранее было отмечено, появление в своё время Интернета Вещей привело к новой эре развития сети связи и услуг. О глобальном эффекте было сказано в определении ИВ, где данной концепции отводится инфраструктурная роль в создании и развитии информационного общества. Развитие ИВ привело и к исследованию новых методов взаимодействия между человеком (пользователем) и сетью.

Сети ИМТ-2030 призваны обеспечить новый уровень взаимодействия людей, машин и различных других объектов (цифровых и физических). Ожидается, что возможности сетей и услуг ИМТ-2030 будут обеспечены достижениями в области человеко-машинных интерфейсов, интерактивных видеосистем и видеосистем высокого разрешения, таких как дисплеи расширенной реальности (XR), тактильные датчики и исполнительные механизмы и/или мультисенсорные (слуховые, визуальные, тактильные или жестовые) интерфейсы. Таким образом, сети ИМТ-2030 предложат людям новый опыт взаимодействия с сетью, в том числе на основе виртуальных или удаленных коммуникаций. Ожидается, что в физическом мире люди и машины (устройства ИВ, роботы, беспилотный транспорт и т.п.) будут постоянно взаимодействовать друг с другом и с цифровым миром, который, в свою очередь, расширяет реальный мир за счёт использования большого числа современных датчиков, актуаторов и технологий искусственного интеллекта. Такой цифровой мир не только копирует реальный мир, но и влияет на него, предоставляя людям виртуальный/“цифровой” опыт.

Учитывая данные тенденции, ожидается, что ИМТ-2030 предоставит широкий спектр приложений и услуг, продолжая при этом обеспечивать, среди прочего, поддержку услуг по передаче речи в качестве основной услуги. Кроме того, ожидается что внедрение ИМТ-2030 будет стимулировать следующую волну цифрового экономического роста, а также устойчивые, далеко идущие социальные изменения, цифровое равенство и всепроникающую связь [365]. При этом сети и

услуги ИМТ-2030 должны быть обеспечены большим уровнем безопасности и отказоустойчивости [46].

Рассмотрим основные тенденции в области услуг сетей ИМТ-2030.

1. *Глубоко интегрированные технологии Искусственного Интеллекта.* Ожидается, что благодаря устойчивому прогрессу и быстрому распространению технологий искусственного интеллекта и, в частности, машинного обучения, инструменты/методы ИИ будут присутствовать в каждом модуле и системе инфокоммуникационной сети. Будущие пользовательские оконечные устройства смогут стать полностью контекстно-зависимыми для более эффективного взаимодействия между людьми, машинами и окружающей средой. Такое взаимодействие уже в какой-то мере реализовано в существующих сетях и услугах. Контекстная реклама, проактивный контент, основанные на предпочтениях пользователя и анализе его поведенческой характеристики, маршруты перемещения в физическом мире, а также анализе цифрового следа пользователя являются примерами взаимодействия современной сети и пользователя. Данные методы активно используются в современном маркетинге при развитии цифровых продуктов, что позволило получить достаточно высокий уровень контакта с оконечным пользователем, в том числе через инструменты цифрового интерактивного взаимодействия. В тоже время, возможное интеллектуальное управление сетями с помощью инструментов ИИ и машинного обучения может в существенной степени обеспечивать самоконтроль, самоорганизацию, самооптимизацию и самовосстановление сети и услуг без вмешательства человека-администратора. Ожидается, что также радиоинтерфейс может быть улучшен моделями искусственного интеллекта. В вопросе развития ИИ как части систем мониторинга, управления сетями и услугами может быть использован подход распределенного искусственного интеллекта, который на данный момент имеет форму систем федеративного обучения (с англ., FL - Federated Learning). При этом федеративное обучение может задействовать инфраструктуру динамических туманных вычислений, что позволиткратно увеличить вычислительные возможности, а также обеспечить устойчивость сетей связи.

2. Всепроникающие облачные вычисления. В рамках ИМТ-2030 будет расширяться повсеместное использование распределенных вычислительных систем. Новые тенденции в этом вопросе включают расширение методов и моделей обработки данных в сетевой инфраструктуре до сетевых облаков и устройств (на базе многоуровневых облачных вычислений), которые находятся ближе к источнику данных, что, в том числе, позволит распространить подходы глубоко интегрированного ИИ в сети ИМТ-2030. Эта тенденция также способствует реализации приложений и услуг, требовательных к задержке передачи данных. Ожидается, что внедрение систем распределенных вычислений в сетях ИМТ-2030 позволит эффективно использовать сетевые и вычислительные ресурсы и приведёт к уменьшению нагрузки на ядро сети, что в свою очередь будет способствовать более гибкому масштабированию услуг.

3. Иммерсивные мультимедийные и мультисенсорные взаимодействия. Ожидается, что будущее мультимедийных и ориентированных на человека коммуникаций, ставших возможными благодаря ИМТ-2030, обеспечит необходимый иммерсивный опыт для пользователя посредством мультисенсорного взаимодействия и глубокой интеграции между физическим и цифровым мирами. Иммерсивные технологии можно отметить, как одно из ключевых решений при предоставлении услуг в сетях ИМТ-2030. Это такие технологии, которые позволят пользователю нивелировать границу между физическим и виртуальным мирами при использовании мультисенсорных интерфейсов. Расширенная реальность будет персонализирована и превращена в потенциально постоянно применяемый пользовательский интерфейс, что обеспечит визуальную интеграцию между физическим и цифровым мирами. В дополнение к этим тенденциям голографическое телеприсутствие может стать обычным явлением для конференц-связи, социального взаимодействия, развлечений, в образовательных процессах, удалённых выступлениях и других сценариях. Также ожидается, что человеко-машинные интерфейсы, например, на базе костюмов телеприсутствия и нейрокомпьютерных интерфейсов, обеспечат новые иммерсивные взаимодействия, при которых управление будет

осуществляться удалённо. Данные типы интерфейсов могут быть использованы для проведения удалённых операций, как это отмечено в документах фокус-группы сетей 2030 Международного Союза Электросвязи.

4. *Цифровые двойники (ЦД)*. Анализ документов МСЭ-Т, документов формата White paper от ведущих компаний, а также научных публикаций показал, что сети ИМТ-2030 будет использоваться для копирования физического мира в цифровой виртуальный мир в виде точных представлений в реальном времени, что напрямую связано с технологией цифровых двойников. Технология цифровых двойников обладает большим потенциалом и сможет предоставить мощный инструмент накопления и получения знаний в области мониторинга, управления, анализа и моделирования физических активов, ресурсов, сред и ситуаций. Технология цифровых двойников уже на данный момент нашла своё применение во многих отраслях, повышая эффективность и результативность проводимых исследований. Цифровые двойники также используются в задачах исследования и разработки методов и моделей сетей ИМТ-2030, позволяя ускорить процесс исследований и получить системный взгляд с учётом временных и других характеристик систем. При этом используется следующий комплекс решений: интегрированные сети, насколько это возможно, с искусственным интеллектом, продвинутой сенсорикой и распределёнными вычислениями, цифровые двойники, что позволит синхронизировать цифровой мир с физическим миром и обеспечить связь уже между компонентами цифровых копий. Таким образом, цифровые двойники не только будут воспроизводиться, но и влиять на физический мир, предоставляя людям знания о физическом мире, которые до этого были труднодостижимы вследствие масштабности данных. Предполагается, что цифровые двойники станут мощным инструментом в развитии многих отраслей, включая здравоохранение, сельское хозяйство и строительство. При этом, технология цифровых двойников уже на данном этапе развития показывает достаточно высокие результаты и эффективность.

5. *Умная индустрия*. Сети ИМТ-2030 могут поддерживать возможность обмена аналитическими данными в реальном времени для обеспечения работы

интеллектуальных промышленных приложений, что обеспечит более эффективное использование ресурсов и энергии, а также позволит оптимизировать производство, следуя философии бережливого производства. Промышленные приложения также чрезвычайно требовательны к надёжным соединениям с малой задержкой (URLLC) и к актуальным данным об окружающей среде. Например, задача более точного позиционирования, решение которой позволит обеспечить повсеместный сбор и обмен информацией в режиме реального времени, а также интеллектуальный контроль и обратную связь с физическими объектами на производстве в условиях сверхплотных сетей. При этом обеспечивается точное трёхмерное измерение и моделирование окружающей среды с поддержкой зондирования, что найдет применение в промышленности и роботизации.

6. Цифровое здоровье. Сети ИМТ-2030 будут и дальше способствовать совершенствованию услуг цифрового здравоохранения, как этому способствовали сети 5G/ИМТ-2020 и концепция Интернета Вещей. Цифровое здравоохранение эффективно использовалось во время пандемии COVID во многих странах и однозначно доказало свою эффективность. Ожидается, что сети ИМТ-2030 будут способствовать предоставлению цифровых медицинских услуг, включая интерактивный и удалённый мониторинг здоровья, теледиагностику, удалённую телемедицину (включая машины скорой помощи с подключением к цифровым платформам), телереабилитацию, цифровые клинические испытания, осмотр и лечение пациента, в том числе с применением роботизированных систем. Следовательно, ожидается увеличение числа подключений носимых устройств и датчиков тела, что сможет сделать эту технологию повсеместной и доступной для всех, уменьшая тем самым цифровые и социальные барьеры. В общем случае, цифровое здоровье является естественным продолжением развития технологий и решений, полученных в сетях 5G/ИМТ-2020, только в данном случае возможно будет широкое использование технологий цифровых двойников, федеративного интеллекта/обучения, иммерсивных сенсорных коммуникаций и многих других. Это позволит в конечном итоге достичь новых возможностей и изменить ряд устоявшихся моделей в медицинской отрасли.

7. Всепроникающая связь. Повсеместное подключение к сети имеет решающее значение для предоставления широкого спектра услуг, таких как доступ к образованию, здравоохранению, технологиям сельского хозяйства, транспорту, логистике и возможностям для бизнеса. При этом сети ИМТ-2030 будут способствовать достижению целей устойчивого развития ООН и преодолению цифрового неравенства посредством внедрения новых эффективных услуг для всех территорий путём решения проблем подключения, покрытия, ёмкости, скорости передачи данных и мобильности пользовательских терминалов. Сети ИМТ-2030 продолжат поддерживать дальнейшее развитие широкополосного подключения, которое обеспечит цифровую доступность для всех сельских и отдалённых поселений, а также дальнейшего распространения таких подключений на малонаселённые районы. Таким образом, интегрированные сети позволят решить ряд накопившихся проблем благодаря своему архитектурному принципу и задействованию в качестве сетей доступа - сетей на базе БПЛА и низкоорбитальных спутников.

8. Высокоточные сенсорные системы или зондирование в сетях. Ожидается, что зондирование в сетях ИМТ-2030 будет поддерживать различные инновационные приложения, такие как высокоточное позиционирование и локализация устройств и объектов, высокое разрешение в 3D-карте пространства в реальном времени для автоматизированного и безопасного вождения транспорта (в том числе для автономного транспорта), цифровых двойников (как уже было отмечено выше) и промышленной автоматизации. Другие возможности включают в себя распознавание активности человека (например, жестов), определение состояния здоровья человека, спортивную аналитику, мониторинг окружающей среды и проверку характеристик материалов.

9. Устойчивость. Устойчивость является основополагающим требованием будущих систем ИМТ, в том числе ИМТ-2030. Ожидается, что ИМТ-2030 поможет удовлетворить потребность в повышении экологической, социальной и экономической устойчивости, а также поддержит цели Парижского соглашения Рамочной конвенции Организации Объединённых Наций об изменении климата.

Реализация ИМТ-2030 будет направлена на достижение минимально возможного воздействия на окружающую среду и эффективное использование ресурсов за счёт минимизации энергопотребления, эффективного использования энергии и сокращения выбросов парниковых газов. Использование принципов экономики замкнутого цикла помогает сохранить и восстановить ценность ресурсов, а также продлить срок службы за счёт таких важных факторов, как повторное использование, ремонт, перепрофилирование или переработка. Более того, ИМТ-2030 обеспечит эффективное развёртывание и эксплуатацию сетей и систем, тем самым улучшая как экологическую устойчивость, так и доступность, необходимую для поддержки социальной устойчивости. Также ожидается, что помимо собственного воздействия на окружающую среду, ИМТ-2030 будет способствовать расширению возможностей других отраслей/секторов по снижению воздействия на окружающую среду через их цифровую трансформацию и обеспечение передовыми цифровыми инструментами, например, иммерсивными мультисенсорными интерфейсами, а также цифровыми двойниками.

Таким образом, проведя анализ тенденций в области перспективных технологий и услуг сетей ИМТ-2030, можно оценить основные возможности и характеристики будущих сетей и услуг.

Следует отметить, что потенциальные возможности сетей 2030 обладают в ряде случаев противоречивыми характеристиками, которые были определены специальной фокус группой “Сети 2030” МСЭ при 13 Исследовательской комиссии. В настоящее время, если опираться на базу аналитических документов фокус группы, сети 2030 будут иметь семь основных приложений:

1. Индустриальный Интернет Вещей (ИИВ);
2. Взаимодействие голографического типа (НТС, с англ. Holographic Type Communications);
3. Тактильный Интернет для удаленных операций (ТИРО, с англ. Tactile Internet for Remote Operations);
4. Искусственный интеллект в сетях связи (ИОН, с англ. Intelligent Operation Network);

5. Объединение/конвергенция сетей и вычислительных систем (NCC, с англ. Network and Computing convergence);

6. Цифровые двойники (DT, с англ. Digital Twins),

7. Интегрированные сети (STIN, с англ. Space-Terrestrial integrated network).

Для данных приложений определены следующие высокоуровневые требования по пяти характеристикам, каждая из которых оценивается по десятибальной шкале:

1. Скорость. Данная характеристика представляет группу параметров, например таких как: гибкость сети и адаптируемый транспорт, полоса, ёмкость, качество обслуживания (QoS), качество восприятия (QoE);

2. Безопасность. Данная характеристика включает следующие параметры: надёжность, устойчивость, конфиденциальность и законный перехват трафика;

3. Время. Включает следующие параметры: джиттер, точность, задержка, точность геолокации, синхронизация, координация, планирование;

4. Искусственный интеллект (ИИ). Характеристика в области сбора и аналитики данных, программируемости сетевых и вычислительных сред сетей и услуг, является важным элементом в исследовании и развитии интегрированных сетей 2030;

5. ManyNets. Эта характеристика сети включает следующую группу параметров: сетевые интерфейсы и конвергенция гетерогенных сетей (интегрированные сети), адресация, мобильность;

Вышеприведённые приложения и соответствующие оценки приведены на рисунке 1.5.

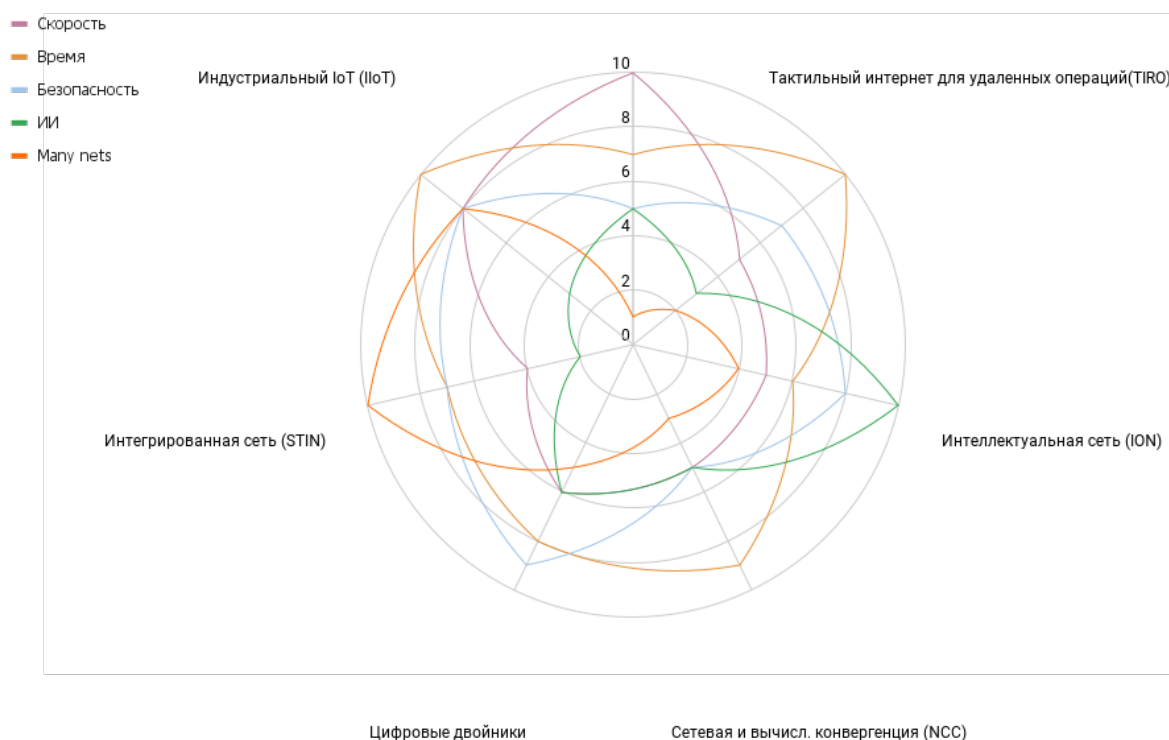


Рисунок 1.5 – Приложения и их характеристики.

Лепестковая диаграмма на рисунке 1.5 позволяет визуально оценить “важность” соответствующих характеристик для каждого приложения сети IMT-2030.

При этом, как было отмечено выше, ряд приложений, например, TIRO (относится к HLRRC - Hyper Reliable & Low-Latency Communication, с англ., гипернадёжные сети связи с ультрамалой задержкой), и ION предъявляют к сетям связи требования, достижение которых в существующих сетях связи невозможно.

Ниже в таблице 1.3 представлен сравнительный анализ требований сетей 5G/IMT-2020 и сетей IMT-2030. Данный анализ основан на тех характеристиках и их требованиях, которые представлены в концепциях сетей IMT-2020 [10] сетей IMT-2030 [24] МСЭ-Т.

Таблица 1.3 – Сравнение требований ИМТ-2020 и ИМТ-2030

Показатели	5G/ИМТ-2020	ИМТ-2030
Пиковая скорость передачи данных для пользователя	20 [Гбит/с]	[100-200 Гбит/с]
Скорость передачи данных пользователю - среднее значение на практике	1 [Гбит/с]	10 [Гбит/с]
Эффективность спектра	3x раза от ИМТ-А	1-3x раза от ИМТ-2020
Пропускная способность на квадрат площади (Мбит/с/м ²)	10	5-1000
Плотность подключенных устройств к сети (устройств/км ²)	10 ⁶	10 ⁶ -10 ⁸
Мобильность устройств (км/ч)	500	500-1000
Задержка (мс)	1	0.1 - 1
Надежность	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁷
Безопасность, конфиденциальность и отказоустойчивость	-	Повышена
Сенсорные возможности	-	Новое требование/показатель
Возможности, связанные с ИИ	-	Новое требование/показатель

Показатели	5G/ИМТ-2020	ИМТ-2030
Устойчивость	-	Новое требование/показатель
Точность позиционирования	-	Повышена (1-1[см])

Анализ требований показал, что в сетях связи ИМТ-2030 были введены новые характеристики/показатели, такие как: сенсорные возможности (здесь подразумевается глубина интеграции сенсорных сетей в предоставление услуг сети, в первую очередь, с целью повышения иммерсивности потребительского/пользовательского опыта), возможности ИИ в сетях связи (создание, внедрение и развитие автономных сетей связи), устойчивость и точность позиционирования. При этом точность позиционирования в сетях связи ИМТ-2030 может быть основана на комплексе технологий и совместно взаимодействующих для этих целей систем/модулей сети. Точность позиционирования как никогда важна на этапе развития сетей, где применение роботизированных платформ, в частности роевых БПЛА, роботизированных решений в закрытых помещениях является одной из важных составляющих услуг сетей ИМТ-2030.

В общем виде требования к характеристикам услуг сетей ИМТ-2030, которые были в том числе рассмотрены в п.1.1 диссертации и раскрыты в п.1.2., представлены на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Система требований к характеристикам услуг IMT-2030

На рисунке 1.6 требования к каждой из возможных услуг сетей IMT-2030 представлены в виде единой карты формата MindMap. Таким образом, для реализации той или иной услуги необходимо обеспечить выполнение соответствующих высокоуровневых, с точки зрения формализации, требований.

Услуги IMT-2030 комплексно охватывают множество направлений предоставления услуг пользователям, что приводит к формированию единой сетевой среды с интегрированными вычислительными ресурсами, базирующимися

на принципе распределенности, устойчивости, безопасности, равноправия доступа, гетерогенности, эффективного использования. Такая инфраструктура в последующем будет развиваться точечно без резких и фундаментальных изменений. Будущее развитие сети и услуг будет в чем-то схоже с принципами открытого программного обеспечения (OpenSource) при планомерном совместном развитии платформы и ее точечным обновлением без влияния на внутренние и внешние процессы. При этом будут разрабатываться отдельные услуги на базе модульного принципа, что обеспечит быструю реакцию операторов на потребности пользователей и возникающую конъюнктуру рынка.

1.3. Декомпозиция и конвергенция сетей и систем вычислений

Рассмотрим одну из важнейших технологических тенденций, которая обеспечит реализацию требований и комплекса услуг, представленных выше в п.1.2, а также реализацию архитектурных принципов, приведенных в п.1.1 главы 1 настоящей диссертации.

В условиях роста парка оборудования центров обработки данных (ЦОД), развития услуг ИМТ-2020 и предстоящим появлением услуг телеприсутствия для сетей ИМТ-2030 особо актуальным направлением современных исследований является поиск нестандартных решений в области обеспечения вычислительными и сетевыми ресурсами. Повышение спроса на вычислительные мощности является естественной реакцией рынка на общее стремление к цифровизации бизнеса и системных процессов в обществе, бизнесе и государстве. Появление в своё время концепции Интернета вещей, как уже было ранее отмечено, привнесло фундаментальные изменения во множество моделей, сформировало технологическую основу построения информационного общества. Однако в то же время, развитие платформ ИВ и их услуг, в том числе на базе ИИ, привело к росту рынка ЦОД. Кроме того, как это было отмечено в п.1.1 данной диссертации, появление частных сценариев применения технологий ИВ и 5G/ИМТ-2020, таких как: Тактильный Интернет, Интернет Навыков, дополненная (AR) и расширенная

(XR) реальности, автономный транспорт сформировало новые требования к требуемому уровню качества обслуживания и качества восприятия. Весь спектр требований к сетям был определен в Международном Союзе Электросвязи в рекомендации М.2083-0, где была представлена концепция IMT-2020 [48, 49], а также, соответственно, в спецификации 3GPP по сетям 5G. Одним из принципиальных требований явилось требование по достижению задержки величиной в 1мс для ряда услуг, в том числе услуг на базе Тактильного Интернета. Данное требование естественным образом перешло к сетям 6G/IMT-2030, при этом улучшив позиции для ряда услуг величиной в 0,1мс-1мс.

Еще 10 лет назад, когда активно обсуждалось требование к задержке в 1мс, было понятно, что на физическом уровне существуют на данный момент развития науки и техники вполне определенные ограничения. Скорость распространения света в оптическом волокне ограничена. Вследствие сложившиеся условий учеными и инженерами было предложено, сохранив исследования в области новых технологий физического уровня, найти и разработать новые нетривиальные, нестандартные подходы для обхода ограничения и приближения реализации новых типов услуг на базе функциональной возможности - передачи тактильных ощущений через сеть, обеспечив при этом необходимый уровень качества обслуживания. Был также предложен принцип абстрагирования управления от уровня передачи данных [50], который лег в основу множества решений [51-77], где была доказана эффективность подобных архитектурных моделей.

Таким образом, было определено, что данный тип услуг может быть реализован на ограниченном расстоянии, и для этого необходимо увеличить плотность установки центров обработки данных, которые принимают непосредственное участие в обработке данных и предоставлении услуг. Декомпозиция центров обработки данных стала естественной тенденцией, которая сформировала отдельные направления исследований и разработок [78 - 111].

В настоящее время официально принята в эксплуатацию система многоуровневых облачных вычислений [112-128], определённая в стандарте ETSI. При этом существует несколько поколений данного стандарта, а также дополнений

к базовому архитектурному стандарту. Последнее обновление, представленное ETSI, датировано апрелем 2024 года и имеет следующий номер ETSI GS MEC 003 V3.2.1. В этой версии стандарта MEC определяется как “Multi-access Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture”. В стандарте представлена структура и эталонная архитектура для многоуровневых вычислений с множественным доступом, которая описывает систему MEC, обеспечивая приложениям MEC эффективную и бесперебойную работу в сети с множественным доступом. Настоящий стандарт, в том числе, описывает функциональные элементы и интерфейсы между ними, а также ряд типовых услуг MEC. В актуальной версии стандарта в приложении документа представлен ряд ключевых концепций, связанных с многоуровневой облачной архитектурой [129-131].

Данная архитектура естественным образом перекликается с сетями 5G, что подтверждается перекрестными документами [132], например, ETSI TS 123 558: "5G; Architecture for enabling Edge Applications (3GPP TS 23.558 Release 17). Существует также целый набор Рекомендаций МСЭ-Т и проектов будущих Рекомендаций МСЭ-Т, которые разрабатываются в 13 Исследовательской комиссии.

Рассмотрим некоторые из архитектурных решений, определённых ETSI. Стоит отметить, что базовая архитектура была определена еще в первой версии документа. На данный момент она расширена и обладает большим потенциалом для предоставления перспективных услуг.

Более того, в документе ETSI GR MEC 035 введена концепция федеративного MEC (Federated MEC), определяемая как «федеративная модель систем MEC, обеспечивающая совместное использование услуг и приложений MEC» [133].

В этой среде различные заинтересованные стороны сотрудничают для достижения совместных целей и объединяют свои многоуровневые вычислительные ресурсы, предлагая/раскрывая возможности услуг MEC, не только для взаимного потребления, но и для предоставления их разработчикам приложений и конечным потребителям (вертикальным сегментам рынка). На

решения, определённые ETSI GR MEC 035, также влияют требования к платформе оператора и ее архитектуре (официальный документ GSMA OPG.02 [134]).

В текущей версии документе архитектура федеративного MEC представлена в следующем виде (рис. 1.7).

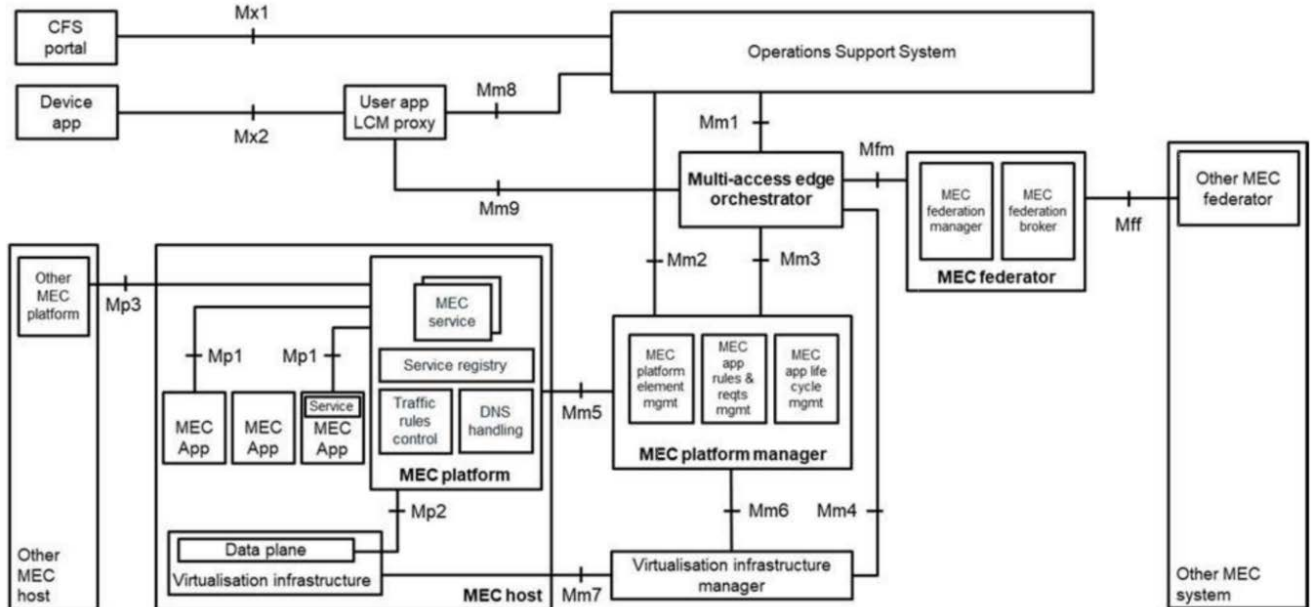


Рисунок 1.7 – Архитектура с поддержкой федеративного MEC

На рисунке 1.7 показан вариант эталонной архитектуры многоуровневой облачной системы с поддержкой федеративного взаимодействия, иными словами - объединённой (федеративной) инфраструктуры многоуровневых облачных вычислений MEC [135].

В дополнение к общей эталонной архитектуре был добавлен функциональный элемент MEC Federator (MEF), включая функциональные возможности MEC Federation Broker (MEFB) и MEC Federation Manager (MEFM). MEF обеспечивает функциональность, необходимую для взаимодействия с другими MEF, и в этом качестве может выступать в качестве посредника между MEF. Данный функциональный элемент взаимодействует по крайней мере с одним МЕО (MEC Orchestrator, с англ. Оркестратор MEC). Системы, не относящиеся к MEC, могут поддерживать интерфейс Mff для взаимодействия с одной системой MEC или ее федерацией (объединённой инфраструктурой MEC различных

провайдеров). Например, через данный интерфейс могут взаимодействовать системы управления инфраструктурой туманных вычислений, сущность которых будет проанализирована ниже. Рассмотрим некоторые функциональные элементы систем и интерфейсы их взаимодействия немного подробнее:

1. *Хост MEC*. Хост MEC — это объект, на котором развёрнута платформа MEC, обладающий инфраструктурой виртуализации, которая в свою очередь предоставляет вычислительные и сетевые ресурсы. Инфраструктура виртуализации при этом включает в себя плоскость передачи данных, которая реализует правила управления трафиком, полученные системой управления MEC (т.н. платформой), и маршрутизирует трафик между приложениями, службами, DNS-сервером/прокси, сетью 5G (в будущем - 6G), другими сетями доступа, в том числе локальными сетями.

2. *Платформа MEC*. Платформа MEC обеспечивает выполнение следующих функций [135]:

а) обеспечение среды для развертывания различных услуг MEC. В том числе услуг (если поддерживаются) MEC, доступных через другие платформы (которые могут находиться в той же или другой системе федеративного MEC);

б) установка правил управлением трафиком (менеджер платформы MEC), приложениями или службами и обеспечение их выполнения на плоскости “передачи данных” системы.

в) получение записей DNS от менеджера платформы MEC и дальнейшая соответствующая настройка прокси-сервера/сервера DNS;

г) хостинг услуг MEC, возможно включая услуги, переданные сторонним MEC в рамках инфраструктуры федеративного MEC;

д) предоставление доступа к постоянному хранилищу служб и услуг, а также к серверу времени (NTP);

е) поддержка регистрации экземпляра приложения MEC на платформе, позволяющая другим экземплярам предоставлять информацию о времени его развертывания (т.н. “runtime”).

Платформа МЕС может реализовывать также функциональность программного шлюза API для экземпляров приложений МЕС, в том числе для доступа к API-интерфейсам внутренних служб МЕС.

3. *Приложение МЕС*. Приложение МЕС создаётся и запускается как виртуализированное программное приложение, например, внутри виртуальной машины (VM, Virtual Machine) или контейнеров операционной системы (ОС), предоставляемых как часть пакета приложения в виде образа(ов) программного обеспечения поверх инфраструктуры виртуализации системы МЕС. Экземпляр приложения МЕС также потенциально может взаимодействовать с платформой МЕС для использования и предоставления услуг МЕС, в том числе с внутренними службами (если предусмотрено системой доступа/безопасности). В определенных случаях экземпляр приложения МЕС также может взаимодействовать с платформой МЕС для выполнения определенных процессов, связанных с жизненным циклом самого приложения, таких как настройка доступа, подготовка перемещения состояния при живой миграции и другие. Приложения МЕС могут иметь определенное количество связанных с ними правил и требований, таких как требуемые ресурсы, максимальная задержка, требуемые службы и т.д. Эти требования проверяются системой управления на уровне платформы МЕС и могут быть присвоены значениям по умолчанию, если они отсутствуют в файлах инициализации образа.

4. *МЕС Оркестратор (МЕО)*. Оркестратор является одним из ключевых функциональных элементов системы. От ответственен за реализацию следующих функций:

а) формирование общей системы МЕС на основе кластера развёрнутых хостов МЕС, доступных ресурсов (вычислительных, хранения и сетевых), доступных услуг МЕС и ее топологии;

б) Развёртывание приложений, включая проверку их целостности и аутентичности, проверку правил и требований приложений и, при необходимости, их корректировку в соответствии с политиками оператора

(владельца данной системы МЕС), ведение учета встроенных приложений и подготовку менеджера(ов) инфраструктуры виртуализации).

с) выбор подходящего хоста(ов) МЕС для реализации приложения на основе требований к ним, таких как задержка, доступные ресурсы и доступные услуги;

d) инициирование создания и завершения приложения;

e) обеспечение процесса живой миграции приложений по мере необходимости, если это поддерживается;

f) координация с OSS (Operation Support System, с англ. Система поддержки операций) оператора по вопросам управления жизненным циклом и создания экземпляров приложений, в том числе их копий.

5. Система поддержки операций относится к OSS оператора. Она получает запросы через портал CFS (Customer Facing Service, с англ. служба по работе с клиентами) и от приложений устройств на создание или прекращение приложений МЕС. Удовлетворённые запросы передаются в МЕО для дальнейшей обработки. OSS также получает запросы от приложений устройств на перемещение приложений между внешними облаками и непосредственно самой системой МЕС.

6. Служба обслуживания клиентов (CFS) позволяет сторонним клиентам операторов (например, в модели b2b коммерческим предприятиям) выбирать и заказывать набор приложений МЕС, отвечающих их конкретным потребностям, а также получать обратную информацию об уровне обслуживания QoS.

7. МЕС Federator (MEF). Федератор МЕС обеспечивает функции объединения между различными системами МЕС. Каждый MEF обеспечивает обмен информацией по меньшей мере с одним другим MEF посредством программного интерфейса Mff. Более того, MEF может служить единой точкой контакта (опять же через интерфейс Mff) для нескольких MEF в федерации МЕС, действуя тем самым в качестве посредника между различными MEF. Такой MEF считается «брокером» и в этом случае поддерживает функциональные возможности MEFB (MEF Brocker). MEF поддерживают функции управления, и, соответственно, содержат функциональные возможности MEFM и поддерживают

интерфейс взаимодействия Mfm. MEF с функциями MEFM и MEFB может быть как «менеджером», так и «брокером». В общей сети Federated MEC (объединённого MEC) может быть более одного MEF, который является «брокером». MEF предоставляет услугу включения в объединённую инфраструктуру, которая подробно рассмотрена в ETSI GS MEC 040.

Анализируя высокоуровневую функциональную архитектуру, элементы и некоторые из интерфейсов актуальной многоуровневой архитектуры облачных вычислений можно прийти к выводу о продолжающейся декомпозиции системы. Создание и стандартизация Federated MEC [135] говорит о том, что централизованная система вычислений может полностью уйти с рынка. Объединённые или так называемые федеративные архитектуры современных решений позволяют обеспечить горизонтальное взаимодействие систем без необходимости взаимодействия с вертикалью.

На этом декомпозиция систем не остановилась. Последующее масштабное внедрение MEC [136, 137] осталось только вопросом времени, где повышение эффективности распределения ресурсов может быть достигнуто благодаря совершенствованию алгоритмов мониторинга и управления, а также совершенствованию самого программного обеспечения облачных платформ, обеспечивающих виртуализацию и контейнеризацию. В тоже время, многоуровневые облачные вычисления при всей эффективности самой модели являются статическим решением. То есть заранее спроектированным и внедренным на сеть связи, где каждый из уровней обладает жёстко закрепленным вычислительным и сетевым ресурсом тех серверов/хостов, которые были установлены оператором на свою сеть. Данная особенность имеет как положительные стороны (устойчивость, предсказуемость/детерминированность), так и недостатки (необходимость предварительного проектирования, внедрения и последующего обслуживания систем, ограниченность ресурсов и прочее).

В тоже время, благодаря развитию микроэлектроники, что привело к повышению мощности вычислительных чипов (в том числе для пользовательских устройств), объёму и скорости чтения-записи компонентов памяти систем,

созданию графических процессоров с нейромодулями/нейропроцессорами, появилась возможность перехода к следующему уровню декомпозиции архитектуры облачных вычислений. Использование сетевых устройств последней мили, а также конечных пользовательских устройств в качестве вычислительных хостов определили новый тип архитектуры облачных вычислений - Туманные вычисления (с англ. Fog Computing). Туманные вычисления на концептуальном уровне были утверждены во вновь созданном консорциуме OpenFog [138] в качестве спецификации в феврале 2017 г. Само соглашение о создании данного консорциума было подписано в 2015 году такими участниками рынка как: ARM холдинг, Cisco, Dell, Intel, Microsoft и Princeton University. Стоит отметить, что в июле 2018 года, данный документ был уже принят в IEEE в качестве спецификации эталонной архитектуры “OpenFog Reference Architecture”. Данный документ заложил только технологический базис в области Туманных вычислений. В большинстве случаев в современных научных публикациях по данной тематике основное внимание уделяется исследованиям и разработкам в области динамических туманных вычислений, базирующихся на множестве пользовательских устройств и устройств ИВ.

Для таких туманных вычислений существует целый комплекс взаимосвязанных научных проблем и задач: архитектурные, алгоритмические, интеграционные, протокольные и другие. Рассмотрим некоторые из архитектурных и функциональных положений, приведённых в данном документе консорциума. Туманные вычисления обеспечивают недостающее звено натуровневоздействия «облако-вещь».

В настоящее время существует следующее официальное определение туманных вычислений, приведенное в спецификации OpenFog от 2017 года (дословно, без перевода) [138]:

“A horizontal, system-level architecture that distributes computing, storage, control and networking functions closer to the users along a cloud-to-thing continuum”.

В переводе же на русский язык туманные вычисления представляют собой горизонтальную архитектуру, которая позволяет распределить вычислительные

функции, функции хранения, управления в сети ближе к пользователям в рамках взаимодействия «облако-вещь». Данное определение звучит глобально, под него также может быть подведена система многоуровневых облачных вычислений. В тоже время, в рекомендации/стандарте NIST.SP.500-325, зарегистрированном в Национальном Институте Стандартов и Технологий (НИСТ, с англ., NIST - National Institute of Standards and Technology.) приводятся отличия Туманных вычислений (Fog) от многоуровневых или граничных облачных вычислений (MEC). Рассмотрим эти отличия в национальном стандарте США по концепции туманных вычислений [139]:

граничные вычисления — это сетевой уровень, охватывающий окончательные устройства и их пользователей, обеспечивающий, например, локальные вычислительные возможности для датчиков, счетчиков или некоторых других устройств, доступных по сети доступа.

Туманные вычисления часто ошибочно путают с граничными вычислениями, однако между этими двумя концепциями существуют ключевые различия. Туманные вычисления реализуют приложения в многоуровневой архитектуре, которая разделяет и объединяет аппаратные и программные функции, позволяя динамически реконфигурировать различные приложения/услуги, одновременно выполняя интеллектуальные вычисления и услуги передачи. Граничные вычисления запускают определенные приложения в фиксированном логическом месте (где установлен сервер) и предоставляют услугу непосредственно.

С точки зрения модели услуг для туманных вычислений в данном национальном стандарте приводится следующая информация:

- уровень “*Software as a Service*” (SaaS, с англ. Программное обеспечение как Услуга). Предоставление заказчику/потребителю службы/услуги тумана, которое заключается в использовании приложений поставщика тумана, работающего в кластере объединенных узлов тумана, управляемых провайдером. Этот тип услуги аналогичен программному обеспечению для облачных вычислений как услуги (SaaS) и подразумевает, что окончательное устройство пользователя или устройство ИВ получает доступ к приложениям узла туманных вычислений через интерфейс

тонкого клиента или программный интерфейс API. Оконечный пользователь не управляет и не контролирует инфраструктуру и настройки базового узла Туманных вычислений, включая сеть, серверы, операционные системы, хранилище или даже возможности отдельных приложений за возможным исключением ограниченных настроек конфигурации приложений, специфичных для конкретного пользователя.

- уровень *“Platform as a Service”* (PaaS, с англ. Платформа как Услуга). Возможности, предоставляемые заказчику туманного сервиса, аналогичны платформе облачных вычислений как услуги (PaaS) и позволяют разворачивать на платформах туманных вычислений, образующих кластер, разработанные или приобретённые клиентом приложения, созданные с использованием языков программирования, библиотек, услуг. Заказчик услуги Туманных вычислений не управляет и не контролирует базовую(ые) туманную платформу(ы) и инфраструктуру, включая сеть, серверы, операционные системы или хранилище, но имеет контроль над развёрнутыми приложениями в Туманных вычислениях и, возможно, параметрами конфигурации для среды размещения приложений.

- уровень *“Infrastructure as a Service”* (IaaS, с англ. Инфраструктура как Услуга). Предоставление возможности обработки, хранения, передачи и других основных вычислительных ресурсов с использованием инфраструктуры туманных вычислений, образующих федеративный кластер. Подобно услугам облачных вычислений «Инфраструктура как услуга» (IaaS) клиент может развертывать и запускать произвольное программное обеспечение, которое может включать в себя операционные системы и приложения. Потребитель не управляет и не контролирует базовую инфраструктуру кластера туманных узлов, но имеет контроль над операционными системами, хранилищем и развёрнутыми приложениями, и, возможно, ограниченный контроль над избранными сетевыми компонентами (например, межсетевыми экранами хостов).

Как видно из приведенных положений стандарта, общая модель облачных вычислений сохранилась в полной мере и в концепции туманных вычислений. При этом для туманных вычислений организация вышеприведенной модели и возможностей соответствующих уровней, является более сложной и

нетривиальной задачей ввиду особенностей туманных вычислений: ограниченные вычислительные и сетевые ресурсы хостов/устройств туманных вычислений, их гетерогенность, возможная подвижность и т.п.

Поскольку туманные вычисления позиционируются как расширение традиционной модели облачных вычислений, рассмотрим модели развертывания узлов Туманных вычислений:

1. *Private Fog node* (с англ. частный узел туманных вычислений). Узел, предоставленный для индивидуального/эксклюзивного использования одной организацией, включающей нескольких потребителей (например, бизнес-подразделения). Он может принадлежать, управляться и эксплуатироваться организацией, третьей стороной. Может находиться в помещении или за его пределами.

2. *Community Fog node* (с англ. узел туманных вычислений сообщества). Туманный узел, который предоставляется для эксклюзивного использования определенным сообществом потребителей из организаций, имеющих общие интересы (например, миссия, требования безопасности, соглашение о сотрудничестве). Он может принадлежать, управляться и эксплуатироваться одной или несколькими организациями в сообществе, третьей стороной. Узел может находиться в помещении или за его пределами.

3. *Public Fog node* (Общественный узел туманных вычислений). Узел, предназначенный для открытого использования в сети связи общего пользования. Он может принадлежать, управляться и эксплуатироваться коммерческой, академической или государственной организацией или их комбинацией. Узел находится на территории провайдера туманных вычислений.

4. *Hybrid Fog node*. (Гибридный узел туманных вычислений). Это сложный узел туманных вычислений, представляющий собой композицию двух или более отдельных туманных узлов (частных, общественных или общедоступных), которые остаются уникальными объектами, но связаны между собой стандартизированной или запатентованной технологией, которая обеспечивает переносимость данных и приложений.

Такое деление типов узлов туманных вычислений продиктовано задачей обеспечения безопасности и разграничения инфраструктуры.

Рассмотрим теперь архитектурные решения для туманных вычислений, приведенные в спецификации консорциума, которая раскрывает основные положения, представленные в национальном стандарте, рассмотренном выше. Предложенная архитектура также учитывает международный стандарт ISO/IEC/IEEE 42010:2011 как руководство по описанию архитектуры [140]. Концептуальный вид архитектуры представлен на рисунке 1.8.

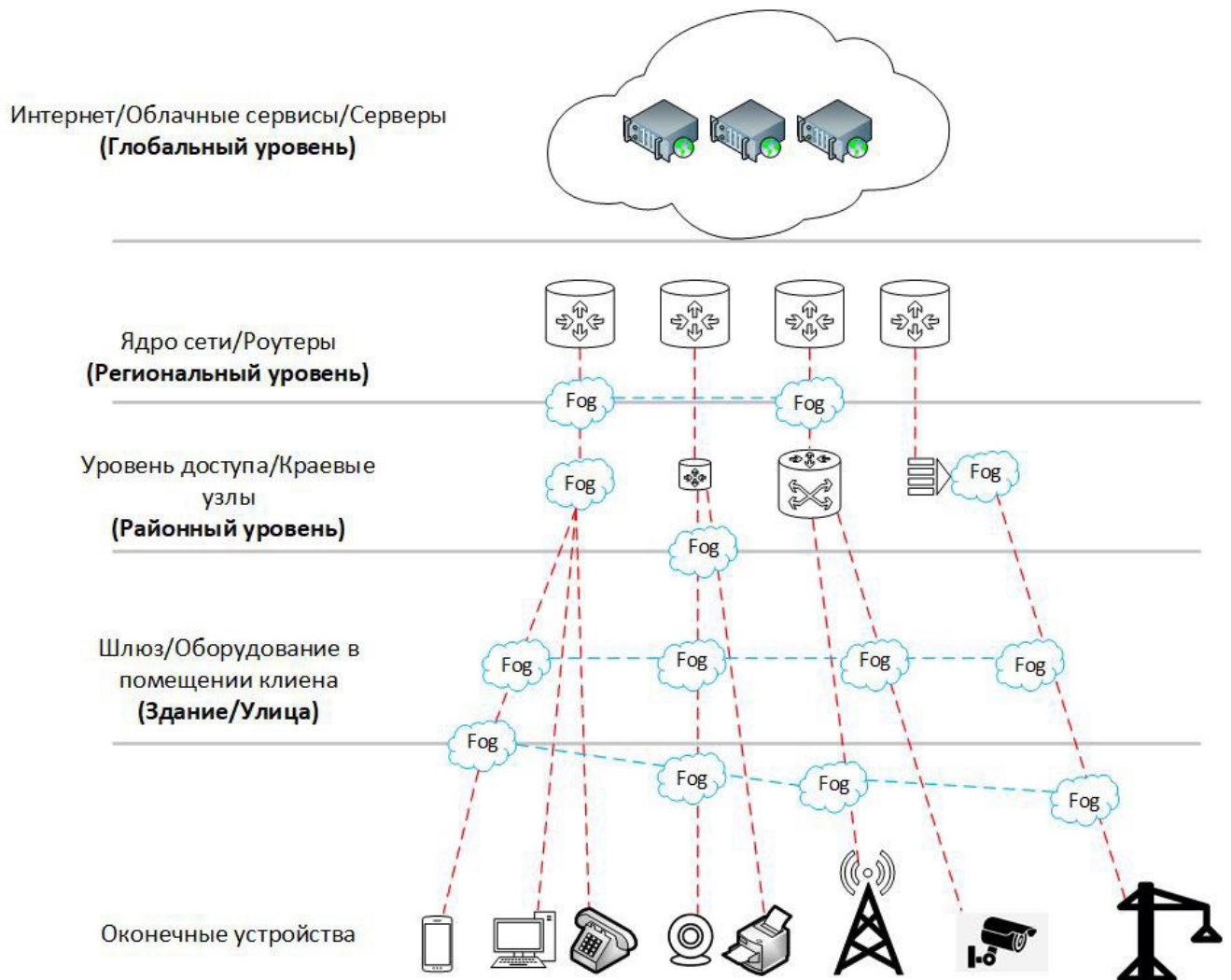


Рисунок 1.8 – Концепция архитектуры туманных вычислений

Как видно из представленной концепции консорциума OpenFog, туманные вычисления призваны охватить все уровни доступа, объединяя буквально все устройства в единую сеть. Стоит также обратить внимание, что большая масса

устройств туманных вычислений базируется в сети доступа и сети агрегации (между доступом и ядром), и для этого предлагается использовать операторское оборудование (маршрутизаторы, экраны, коммутаторы и другие), которое обладает большим вычислительным потенциалом и при этом не использует его на все 100%. В качестве устройств туманных вычислений в том числе могут быть использованы и оконечные устройства и устройства ИВ, как это видно на рисунке 1.8.

Рассмотрим системную архитектуру туманных вычислений, представленную в спецификации OpenFog.



Рисунок 1.9 – Системная архитектура туманных вычислений

Системная архитектура обладает несколькими уровнями, рассмотрим некоторые из них:

1. Hardware Platform Infrastructure (с англ. аппаратная платформа). Аппаратные платформы устройств туманных вычислений должны обеспечивать надежную инфраструктурную поддержку и защиту своих внутренних компонентов/модулей. Во многих случаях аппаратные платформы туманных вычислений должны выдерживать условия окружающей среды. Некоторые требования к корпусам аппаратной платформы туманных вычислений (называемые инфраструктурой аппаратной платформы в системной архитектуре) включают:

- a) Соответствие местным нормам и стандартным практикам;
- b) Защита от факторов окружающей среды (промышленные или коммерческие термостойкие компоненты);

- c) Устойчивость к физическому воздействию, вандализму или краже;
- d) Приемлемые габариты, энергопотребление и весовые характеристики;
- e) Механическая защита внутренних компонентов;
- f) Управление охлаждением внутренних компонентов;
- g) Поддержка модульности на уровне узлов и возможность создания и изменения множества конфигураций.
- h) Обеспечение удобства обслуживания аппаратной платформы.

Согласно рисунку 1.9 архитектура включает такие модули как:

1. Network (сеть). Данный модуль аппаратной платформы устройств туманных вычислений должен обеспечивать стабильное сетевое подключение по проводным и беспроводным технологиям. В том числе по технологиям связи, позволяющим организовывать архитектуру ячеистой сети с возможностью взаимодействия между устройствами D2D (Device-to-Device).

2. Accelerators (ускорители). Данный модуль является встроенным модулем, реализованным заводом изготовителем чипов, устанавливаемых на аппаратную платформу устройства туманных вычислений.

3. Compute (вычислительные модуль). Данный модуль обеспечивает необходимую вычислительную мощность устройства, представлен одним или совокупностью процессоров (чипов), например: CPU, GPU и другие.

4. Storage (модуль хранения/памяти). Данный модуль является естественной стандартной частью вычислительной системы, обеспечивающий функции постоянной (ПЗУ) и временной/операционной памяти (ОЗУ).

5. OpenFog Security (Безопасность). Данный модуль обеспечивает безопасность системы на уровне ее однозначной идентификации, выполнения функции безопасности в рамках процессов коммуникации с другими системами туманных вычислений.

6. OpenFog Msnagement (Модуль управления). Модуль системы, отвечающий за управление другими модулями аппаратной платформы устройств туманных вычислений.

7. Hardware Virtualization (Модуль виртуализации). Данный модуль системы обеспечивает виртуализацию всех ресурсов аппаратной платформы устройства туманных вычислений, для последующего их выделения в виде виртуальных машин для развертывания служб/услуг туманных вычислений. Данный компонент (виртуализация) является уже компонентом оркестрации систем туманных вычислений, таким же компонентом, который реализуется в архитектуре классических облачных вычислений или многоуровневых облачных вычислений. Стоит также отметить, что данный модуль может быть представлен еще модулем контейнеризации, позволяющим запускать услуги/службы в изолированном пространстве операционной системы устройства туманных вычислений.

Анализ архитектуры туманных вычислений показал инвариантность изначальной классической архитектуры облачных вычислений [141-150]. При этом благодаря модульности классической модели облачных вычислений с разграничением уровней платформ и ресурсов существует возможность дополнения архитектуры как по вертикали, так и по горизонтали подобных систем. Туманные вычисления при этом являются естественным расширением классической модели, реализуя принципы горизонтального масштабирования систем, используя в качестве узлов вычислений те устройства, которые изначально предназначались для других задач: сетевые устройства, пользовательские устройства.

Стоит также отметить, что спецификация туманных вычислений, утверждённая OpenFog и затем IEEE, описывает, в основном, высокоуровневые функциональные архитектуры, возможности, принципы и требования, опираясь при этом, в первую очередь, на устройства, находящиеся на последней миле. В тоже время, возможны и частные архитектуры туманных вычислений, которые могут быть в условиях развертывания кластеров туманных вычислений на базе только пользовательских устройств (смартфонов, ноутбуков) и устройств Интернета Вещей [151-158]. Вследствие этого на данный момент существует немало научных публикаций, направленных на исследование особенностей такого вида тумана.

Ранее в кандидатской диссертации [159] мною был предложен фреймворк динамических туманных вычислений, который был также опубликован в соответствующих статьях. Данный фреймворк DD-Fog (Distributed Dynamic Fog computing framework) направлен только на сегменты туманных вычислений, базирующиеся на динамических устройствах, то есть устройствах, которые перемещаются в пространстве, обладают характеристикой гетерогенности и достаточно ограниченными ресурсами. Архитектура данного фреймворка ранее была опубликована и дополнена в настоящей диссертации набором систем федеративного MEC, а также систем ядра сетей пятого поколения (рис. 1.10).

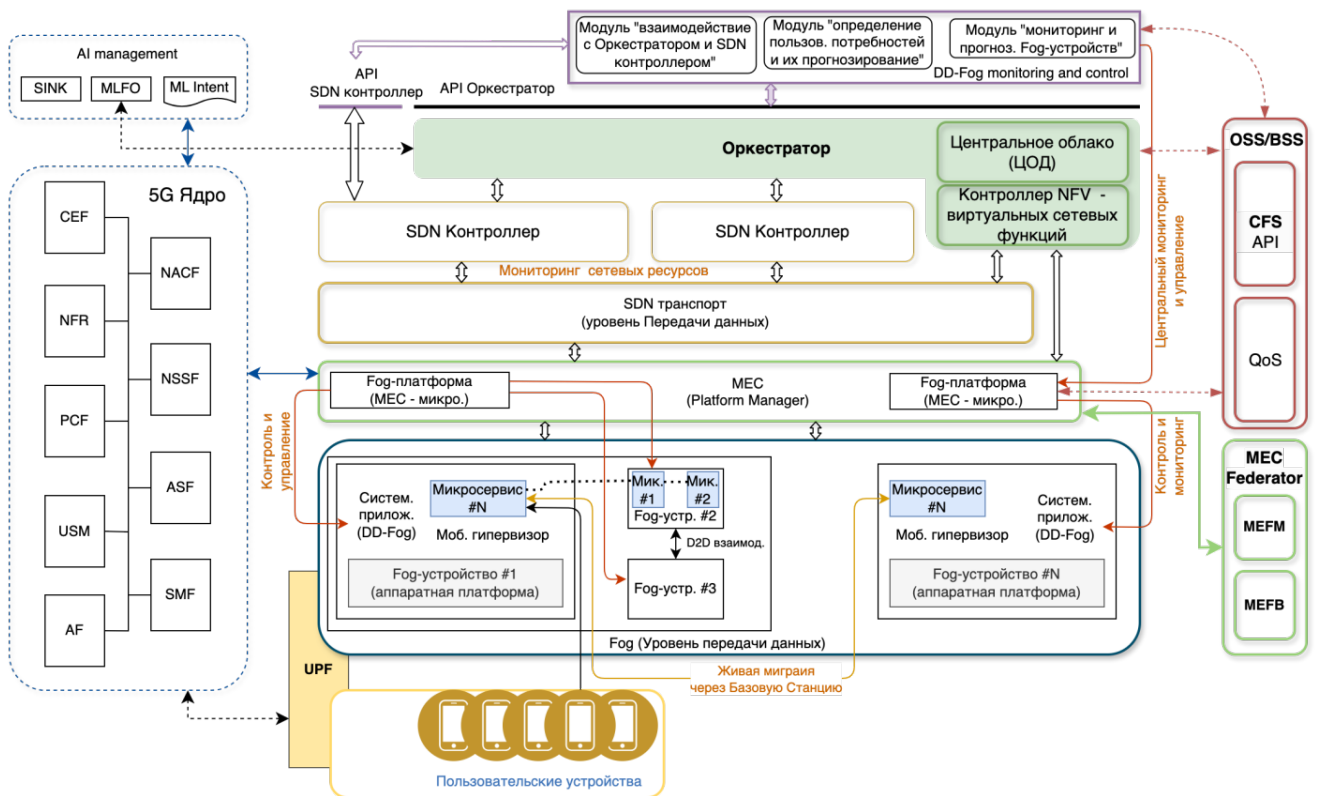


Рисунок 1.10 – Архитектура DD-Fog

Более подробная информация про данный фреймворк распределенных динамических вычислений приведена ранее в диссертации и соответствующих публикациях автора [159]. Основной отличительной особенностью предложенного фреймворка является использование пользовательских устройств и устройств Интернета Вещей в качестве вычислительных узлов, а также глубокая интеграция

на уровне платформы Fog с процессами системы с микросервисной архитектурой программного обеспечения для современных и перспективных высоконагруженных услуг/служб, учитывая в том числе возможность поддержки CI/CD-процессов. Как уже ранее было отмечено, динамические туманные вычисления с поддержкой микросервисной архитектуры ПО конечных услуг позволяют достичь положительного синергетического эффекта [160-165] вследствие более рационального перераспределения ресурсов, с минимизацией миграции и т.д. В настоящей диссертации будет решен ряд задач для развития такой архитектуры.

Рассмотрим ряд модулей, которые приведены на рис.1.10 и не были приведены выше, такие как модули MEC и Fog. На рисунке приведены следующие модули ядра сети 5G/IMT-2020 из Рекомендации МСЭ-Т Y.3102 [166], а также представленные и в других рекомендациях [167-171]):

1. NACF (Network Access Control Function, с англ. Функция контроля доступа в сеть) – Функции подсистемы NACF включают управление регистрацией, управление соединением, а также выбор функции управления сеансом (SMF).

2. SMF (Session Management Function, с англ. функция/подсистема управления сессиями)

3. AF (Application Function, с англ. функции приложения) – Подсистема AF предоставляет информацию о сеансе в PCF для того, чтобы SMF мог использовать эту информацию с целью управления сеансом. AF также взаимодействует со службами приложений, которым требуется динамическое управление политиками. AF получает информацию, относящуюся к сеансу (например, требования QoS) из данных служебной сигнализации приложения, и далее предоставляет ее подсистеме/модулю PCF для поддержки правил;

4. UPF (User Plane Function, с англ. функция уровня пользовательских устройств) - эта подсистема обеспечивает функции маршрутизации трафика, управления туннелями сеанса PDU (IP или не-IP протокольная единица – с англ. Protocol Data Unit) и достижение обеспечения требований QoS;

5. CEF (Capability exposure function, ил Функция предоставления доступа к сетевым функциям третьим лицам) – эта функция предоставляет возможности для сетевых сегментов, требующих предоставление услуги третьим сторонам;

6. PCF (Policy control function, с англ. Функция контроля политик). Данная функция предоставляет функциональные возможности для контроля и управления правилами политики, включая правила обеспечения качества обслуживания QoS, биллинга и маршрутизации трафика;

7. NFR (Network function registry function, с англ. Функция регистрации сетевой функции). Данная функция позволяет обнаруживать и выбирать требуемые сетевые функции. Каждый экземпляр сетевой функции регистрируется при создании и обновляет свой статус, в том числе для того, чтобы функция NFR могла поддерживать информацию о доступных экземплярах сетевых функций;

8. NSSF (Network Slice Selection Function, с англ. Функция выбора сетевого слайса). Данная функция обеспечивает функциональные возможности для выбора подходящих экземпляров сетевого сегмента (то есть «Слайса») для пользовательского устройства UE. В момент, когда пользовательское устройство (UE) запрашивает регистрацию в сети, подсистема NACF отправляет запрос выбора сетевого сегмента в подсистему NSSF с предпочтительной информацией о выборе сетевого сегмента. При этом, подсистема NSSF отвечает сообщением, которое включает в себя список подходящих экземпляров сетевого сегмента для данного пользовательского устройства (UE).

9. USM (Unified Subscription Management function). Данная подсистема хранит информацию и управляет унифицированным пользовательским устройством UE, а также информацией о подписке услуг, включая, помимо того, информацию о регистрации пользовательского устройстве, в том числе управлении его мобильностью, информацию о сетевых функциях, которые обслуживают UE, и информацию об управлении сеансом для установления сеанса PDU. При этом подсистема USM также предоставляет информацию об аутентификации UE в ASF.

На рисунке 1.10 приведены несколько модулей, относящиеся к архитектуре автономных сетей, определённых в рекомендации МСЭ-Т [172], и реализующих

процессы и алгоритмы управления сетью связи на основе инструментов искусственного интеллекта: моделей машинного обучения, так называемого конвейера моделей и др. Следующие модули приведены на рисунке 1.10:

10. MLFO (Machine Learning Function Orchestrator, с англ. оркестратор функций машинного обучения). Это подсистема представляет собой логический узел с функциями, которые управляют и координируют узлы конвейеров ML (машинного обучения) на основе данных ML и/или динамических сетевых условий;

11. ML Intent - это декларативное описание, которое используется для определения приложения машинного обучения (ML). Данное декларативное описание ML Intent не определяет какие-либо сетевые функции, а обеспечивает основу для сопоставления приложений ML с различными сетевыми функциями. Стоит отметить, что ML Intent может использовать метаязык или специальный язык разметки, специфичный для систем машинного обучения, для определения соответствующих приложений машинного обучения (ML);

12. SINK - это узел вывода ML. Например, пользовательское устройств (UE), действующее в роли узла SINK, может регулировать периодичность измерения канала на основе вывода ML.

Примечание: «Точка выхода службы» узла - это интерфейс/точка, где возможно получить доступ к службам, предоставляемым узлом (обеспечивает производитель). «Точка входа службы» узла - это точка, откуда могут запрашиваться службы других узлов (обеспечивает производитель);

Основная архитектура представлена в одной из базовых Рекомендаций Международного Союза Электросвязи по автономным сетям, утверждённой в рамках 13 ИК МСЭ-Т Y.3172 «Архитектура для машинного обучения в будущих сетях, включая ИМТ-2020 и последующие». На данный момент разными ИК были разработаны около 220 Рекомендаций в области Искусственного интеллекта в сетях связи.

Ранее (в п.1.1) были представлены архитектурные принципы построения сетей ИМТ-2030, где был также озвучен принцип конвергенции вычислительной и сетевой инфраструктуры. В декабре 2013 года была принята Рекомендация МСЭ-Т

Y.3400 “Coordination of networking and computing in IMT-2020 networks and beyond – Requirements” [173]. Появление новых услуг сформировало необходимость одновременной поддержки критически важных сервисных требований к вычислительным, сетевым и ресурсам хранения. Рекомендация МСЭ-Т Y.3400 определяет требования к координации сетевых и вычислительных операций в сетях IMT-2020 и за их пределами (CNC - Computing & Networking Coordination, с англ. вычислительная и сетевая конвергенция). Рассмотрим некоторые из требований данной рекомендации [173]:

- требования к измерению ресурсов, в том числе при масштабировании точек измерений;

- требования к идентификации и адресации ресурсов;

- требование к осведомлённости о ресурсах (наличие актуальной и полной информации, в том числе у систем управления: тип ресурсов, характеристики ресурсов, местоположение ресурсов, принадлежность ресурса к тому или иному кластеру);

- требования к совместному планированию ресурсов. (В целях оптимизации инфраструктуры и достижения требований QoS перспективных услуг необходима координация сетевых, вычислительных ресурсов и ресурсов хранения, в том числе от разных поставщиков ресурсов);

- требование к унификации и единству менеджмента и оркестрации ресурсов. (Для повышения эффективности полезно прийти к унифицированности управления и оркестровки ресурсов посредством обеспечения координации сетевых, вычислительных ресурсов и ресурсов хранения данных);

- требования к транзакции (передаче и распределению) ресурсов. (Пользователи ресурсов и поставщики ресурсов согласовывают условия торговли ресурсами посредством контрактов, включая, помимо прочего, сумму транзакции ресурсов, производительность транзакции ресурсов и цену транзакции ресурсов);

- требования к сохранению энергии. (С целью снижения выбросов и нанесения вреда окружающей среде необходимо учитывать концепцию GreenICT

в реализации поставленной задачи по конвергенции ресурсов, их оптимальному перераспределению и т.д.);

- требования к обеспечению качества обслуживания QoS. (В контексте сетей ИМТ-2020 и ИМТ-2030 координация сетевых и вычислительных операций подразумевает новые требования к обеспечению QoS, включая аспекты планирования QoS, обеспечения QoS, мониторинга QoS и оптимизации QoS. Координация ресурсов в данном вопросе может быть выражена через оптимизацию механизма слайсинга в сети, включая процессы OSS/BSS);

- требование к интеллектуализации и повышению уровня автономности систем. (Данное требование означает постепенный переход к полностью автономным сетям связи, то есть сетям, где технологии ИИ займут лидирующую позицию в задачах мониторинга и управления);

- требование к повышению уровня безопасности систем. (Данное требование в Рекомендации МСЭ-Т раскрывает те задачи, решение которых должно быть учтено при конвергенции сетевых и вычислительных ресурсов. Конвергенция ресурсов приведёт к взаимному проникновению систем, процессов, моделей и данных, что повышает риск устойчивости системы с точки зрения безопасности);

- требования в рамках конвергенции фиксированной, мобильной и спутниковой связи. Конвергенция фиксированной, мобильной и спутниковой связи (FMSC, Fixed Mobile Sattelite Convergence) [174, 175] касается возможностей, которые предоставляют услуги и приложения окончательным пользователям независимо от используемых технологий фиксированного, мобильного или спутникового доступа, определённых в рекомендации МСЭ-Т Y.3200;

В последнее время вследствие скорости появления новых технологий международная стандартизация вынуждена изменять привычные модели. В частности, в последнее время наблюдается формирование специальных форумов, площадок при МСЭ, которые направлены на консолидацию работ в перспективных технологиях, форсирование диалога между участниками рынка, науки, стандартизирующих институтов. Специальные инструменты престандартизации, такие как Фокус группы, охватывают все больше и больше направлений

исследований и разработок. В тоже время, наблюдается такая модель работ, когда в текущем исследовательском периоде (который и так был сокращён по времени) начинается активная разработка проектов будущих стандартов по тем технологиям, которые напрямую не озвучены в соответствующем мандате ИК или Исследовательского Вопросы, и находятся официально на стадии престандартизации. Например, такой подход можно отнести к развитию технологий ИИ в сетях связи: 13 исследовательская комиссия уже второй период подряд активно занимается разработкой соответствующих рекомендаций, при этом существует специальная фокус группа по автономным сетям, занимающаяся вопросами престандартизации. Такая модель способствует ускорению решения поставленных задач и поддерживает основной процесс стандартизации на более высоком уровне с точки зрения готовности рассматриваемых технологий.

Одним из таких примеров может быть также вопрос стандартизации интегрированных сетей - сетей ИМТ-2030. Стандартизация в данной области началась еще в текущем исследовательском периоде МСЭ в 13 ИК в специальном вопросе Q23/13 “Networks beyond IMT-2020: Fixed, mobile and satellite convergence (FMSC)”. Основная цель конвергенции фиксированной, мобильной и спутниковой сети для сети с множественным доступом заключается в объединении всех существующих средств доступа, включая фиксированный, мобильный и спутниковый доступ [173-185]. Тем самым пользователям предоставляется возможность повсеместного доступа к сети и услугам, в том числе перспективным. Пользователи и операторы получают следующие преимущества от конвергенции сетей: бесперебойное обслуживание, повышение надежности соединения, обеспечение непрерывности обслуживания, повышение эффективности ресурсов сети, обеспечение балансировки нагрузки и т.д.

В некоторых сценариях использования сетей, выходящих за рамки концепции ИМТ-2020, сети фиксированного доступа, сети мобильного доступа и сети спутникового доступа взаимодействуют, образуя тем самым конвергентную сеть. Конвергентная базовая сеть, не зависящая от доступа, которая объединяет фиксированную, мобильную и спутниковую базовую сеть, а также поддержку

инструментов управления на базе технологий ИИ и других инновационных технологий, рассматривается как направление развития сетей после ИМТ-2020, то есть на данный момент - сетей ИМТ-2030. Таким образом, этот исследовательский вопрос (Q23/13 МСЭ-Т) фокусируется на изучении требований, вариантов использования, сетевых возможностей, инновационных технологий и усовершенствований услуг для поддержки конвергенции фиксированной, мобильной и спутниковой связи, обеспечения беспрепятственного взаимодействия пользователей в фиксированной, мобильной и спутниковой областях. В сферу охвата данного Вопроса также входят вопросы конвергенции фиксированной подвижной связи в сетях после ИМТ-2020 без спутникового доступа.

Мандат данного вопроса охватывает следующие формализованные задачи:

- Разработка рекомендаций на основе исследования проблем конвергенции фиксированной, мобильной и спутниковой связи в сетях после ИМТ2020 с использованием фиксированного, мобильного и спутникового доступа и их сетевых возможностей в контексте приведённых выше вопросов;
- Определение требований и вариантов использования конвергенции фиксированной, мобильной и спутниковой связи для поддержки услуг мультимедиа и передачи данных;
- Развитие сетевых возможностей для поддержки конвергенции фиксированной, мобильной и спутниковой связи в сетях после ИМТ-2020, уделяя особое внимание пользовательскому опыту, поддержке услуг и повышению эффективности сети;
- Исследование применения инновационных сетевых и ИТ-технологий в задачах конвергенции фиксированной, мобильной и спутниковой связи в сетях после ИМТ-2020, таких как наземная и спутниковая конвергенция, AI/ML, DLT, квантовые информационные технологии и другие;
- Исследование интерфейсов для поддержки фиксированной связи, при конвергенции мобильной и спутниковой связи с упором на интерфейсы между UE (Use Equipment, с англ. - пользовательским оборудованием) и конвергентной сетью, а также между приложением и конвергентной сетью;

- Исследование новых услуг и возможностей, открывающиеся с появлением и развитием конвергенции фиксированной, мобильной и спутниковой связи;

- Разработка Рекомендаций МСЭ-Т по полноценной связности для различных типов пользовательского оборудования в рамках конвергентной сети.

Таким образом, скорость развития технологий вынуждает изменять устоявшийся уклад в стандартизации, заставляет сообщество ученых и инженеров быть более гибкими в разработке систем, приводит к объединению в сообщества, где разрабатываются открытые (бесплатные) платформы, что также способствует унификации базовых систем.

1.4. Автономные сети связи: на пути к интеллектуальной инфраструктуре

Как уже выше было отмечено, искусственный интеллект занял лидирующую роль в развитии технологий. Успехи в элементной базе позволили реализовывать те модели и методы ИИ, которые были разработаны еще в 70/80-х годах учёными математиками. Искусственный интеллект на данный момент является, в первую очередь, собирательным определением ряда классов математических методов и алгоритмов. Например, таких, как: искусственные нейронные сети (всех типов), алгоритмы больших данных, метаэвристические алгоритмы [186-188], алгоритмы кластеризации, алгоритмы нечёткой логики и т.д.

Рассмотрим некоторые методы Машинного обучения, которые могут успешно применяться в сетях связи: [189-192]:

1. Метод “Обучение без учителя” (или на англ. “Unsupervised Learning”). Этот метод включает широкий набор инструментов обработки данных, в которых известны только описания множества объектов выборки, и при этом стоит задача определить внутренние зависимости и закономерности, которые могут существовать между исследуемыми объектами. Обычно “обучение без учителя” противопоставляется системе “обучение с учителем”. Например, в сценариях, когда для каждого обучающего объекта в качестве исходных данных даётся «правильное решение», и требуется найти зависимость, соответственно, между

объектами и полученными ответами. К данному методу можно отнести следующие примеры: Метод кластеризации “К-средних” и метод кластеризации “С-средних”, Методы карт Кохонена, Метод скрытой Марковской модели, Метод ограниченной машины Больцмана и многие другие.

2. Метод “Обучение с учителем” (или на англ. “Supervised Learning”). Этот метод применяется в следующей задаче: существуют объекты и множество возможных ответов (реакций), а также существует вероятная зависимость между ответами и объектами, но она в исходных данных задачи неизвестна. Известна в данном случае только конечная совокупность прецедентов – пар «объект, ответ», называемая обучающей выборкой. Таким образом, требуется восстановить зависимость, а именно: построить алгоритм, который будет готов для любого объекта сгенерировать достаточно точный ответ. В данном виде машинного обучения для измерения точности сгенерированных ответов вводится функционал оценки качества. Таким образом, так называемым “учителем” является сама обучающая выборка, либо пользователь, который указал на заданных объектах маркированные (правильные) ответы. К данному методу можно отнести следующие примеры: методы Искусственных Нейронных сетей (ИНС), метод опорных векторов, метод дерева решений, метод ансамбля обучения, методы глубокого обучения.

3. Метод “Обучение с подкреплением” (или на англ. “Reinforcement learning”). Этот метод позволяет решить такие задачи, когда агент должен действовать в окружении, чтобы максимизировать некоторый долговременный выигрыш. При этом “алгоритмы с подкреплением” пытаются найти зависимость/воздействие, приписываемую окружающей средой, которую должен предпринять агент в этих состояниях.

4. Метод “обучение с частичным привлечением учителя” (или на англ. “Semi-Supervised Learning”). Текущий метод, используется в случае применения размеченных или неразмеченных датасетах. Здесь используется небольшой объем размеченных и достаточно значительный объем неразмеченных данных. Метод “частичного обучения” является в своём роде компромиссом между методом

“обучения без учителя” и методом “обучения с учителем”, представляя определенным образом их синергию. Практика показывает, что неразмеченные данные, будучи интегрированными в датасет с небольшим объёмом размеченных данных, могут способствовать значительному росту качества обучения моделей машинного обучения.

Как уже неоднократно было отмечено ранее, перспективные услуги сетей 5G/IMT-2020 и сетей будущего IMT-2030 [193,194] имеют достаточно сложные комплексные требования к качеству. Данные требования привели к тем технологическим решениям, которые были приняты в сетях 5G/IMT-2020: декомпозиция сетей, декомпозиция вычислительных систем, программно-конфигурируемые решения, модульность архитектуры, унифицированность, открытость стандартов и базовых платформ услуг (OpenSource) и т.д. В тоже время, одним из архитектурных принципов сетей IMT-2030, как уже было отмечено, является простота. В документе фокус группы МСЭ по сетям 2030 был озвучен призыв ко всем инженерам и учёным, занимающимся разработками и исследованиями в области сетей 2030 и услуг телеприсутствия, заключающийся в том, что дальнейшее развитие технологий должно учитывать тот лавинный эффект сложности систем и сетей связи, получившийся за последние 30 лет и приведший к неэффективности используемых ресурсов, отсутствию возможности реализации услуг URLLC, HURLLC.

В тоже время, интерес к внедрению технологий ИИ в сетях связи [195-199] связан, в первую очередь, с потребностью обеспечения гибкого и молниеносного управления ресурсами, в том числе основываясь на прогнозных моделях и данных. Реализация автономных сетей позволит достичь положительного синергетического эффекта от конвергенции сетевой и вычислительной инфраструктуры, конвергенции мобильной, наземной, воздушной и низкоорбитальной сетью. Потребность в инструментах ИИ для автономных сетей заключается также в том, что сети связи на данный момент обладают динамическими характеристиками некоторых сегментов, например, таких как: рой БПЛА, автономный транспорт и V2X, динамические туманные вычисления. Динамичность сегментов сети

выражается в отсутствии стабильной архитектуры сегмента сети - узлы перемещаются в пространстве с разной скоростью, связность строится на основе ячеистой топологии. В тоже время, требование к мобильности пользователей (скорости перемещения абонентского устройства) возрастает. Если в сетях 5G/IMT-2020 скорость пользователя доходила до 500 км/ч (скорость быстрых поездов), то в сетях IMT-2030 пользователю должны предоставляться услуги телеприсутствия при условии, что он может двигаться со скоростью до 1000 км/ч (скорость движения рейсовых авиалайнеров). При этом пользователем может быть тот же самый робот в виде БПЛА и т.д.

Итак, вышеприведённые сценарии и существующие требования сформировали существенные проблемы перед научным и инженерным сообществом - обеспечить работу сети и услуг на базе алгоритмов ИИ таким образом, чтобы сеть связи представляла собой полностью автономную систему, которая может сама реагировать на внешние и внутренние воздействия (в том числе подстраиваться под различные сценарии реализации), развиваться (изменять архитектуру, определять и реализовывать методы QoS), обучаться.

Реализация таких требований невозможна без ряда архитектурных и технологических решений, которые были приняты в сетях 5G/IMT-2020. Автономность сети может быть достигнута на основе автономных и программно-конфигурируемых систем, которые не зависят друг от друга (имеют соответствующий уровень логической и системной абстракции) [200-208], инвариантных к нескольким поколениям сети (имеют обратную совместимость с предыдущим поколением, а также возможность программного обновления для реализации функций системы/подсистемы для следующего поколения). Таким образом, становятся необходимыми решения по внедрению таких подходов как: программируемость, виртуализация сетевых функций, абстракция передачи данных от управления этими потоками, унификация и открытость программных интерфейсов и протоколов. Такие технологии, как SDN/NFV/SDR легли в основу построения сетей сетей, позволили ускорить развитие сетей и сформировали

технологическую возможность внедрения решений, основанных на инструментах ИИ для достижения автономности сетей.

В настоящее время существует немало задач в исследованиях и разработке методов мониторинга и управления сетью и услугами на базе технологий ИИ. К ним относятся следующие актуальные задачи:

- типизация трафика в сети и его дальнейшая идентификация без необходимости прямого перехвата трафика и внесения дополнительных задержек в потоки. Данная задача коррелирует с теми требованиями услуг, которые были продиктованы для URLLC, а также услуг телеприсутствия сетей ИМТ-2030;

- долгосрочное прогнозирование нагрузки на сеть (автономное развитие сети). Данная задача подкреплена множеством данных, которые возможно получить с помощью существующих систем управления, в том числе программно-конфигурируемых систем через высокоуровневые программные интерфейсы API;

- краткосрочное прогнозирование потоков, как пользовательских, так и служебных. Данные прогнозные модели позволяет реализовывать более эффективно операционные процессы в сети, быстро реагировать на внутренние или внешние воздействия;

- обеспечение эффективного распределения радиоресурсов, в том числе на основе перераспределения трафика (выгрузки трафика) на системы соседних сот;

- обеспечение прогнозов передвижения пользователей, в том числе с учётом маятниковой миграции людей в крупных городах, потоков на федеральных трассах. Такие прогнозные модели позволят подкрепить актуальными данными системы распределения сетевых и вычислительных ресурсов, в том числе эти данные могут повысить эффективность в рамках реализации динамических туманных вычислений и федеративного MEC;

- прогнозирование и оценка рисков атак злоумышленников. Решение данной задачи также позволит оценивать активность приложений, пользователей и сетей, для минимизации рисков атак и в итоге - повышения устойчивости и безопасности сетей связи;

- прогнозирование спроса на те или иные типовые микросервисы в рамках сети динамических туманных вычислений. Решение данной задачи также позволит проводить более эффективную оценку в распределении ресурсов туманных вычислений и более равномерно нагружать сети.

В решении некоторых из выше представленных задач на данный момент развития технологий может быть также использован подход создания специальных цифровых двойников систем. Технология цифровых двойников достаточно требовательна к вычислительным ресурсам. Однако, в тоже время, позволяет комплексно исследовать объект, получить полноту знаний о нем, в том числе в рамках прогнозирования его развития. При этом, цифровой двойник может развиваться отдельно от физической системы. А системы управления реальной “физической” системы могут параллельно подкреплять свои решения теми данными, которые можно получить от цифрового двойника. В тоже время, при этом можно подкреплять цифровой двойник актуальными значениями отслеживаемых физических параметров. Такая конвергенция призвана улучшить, в том числе, и модели машинного обучения, позволить перейти от данных к знаниям (если провести аналогию с пирамидой Маслоу).

Одним из главных стандартов в автономных сетях является рекомендация МСЭ-Т Y.3172 “Architectural framework for machine learning in future networks including IMT-2020”, принятая в июне 2019 года. В данной рекомендации определяется архитектурная схема для реализации машинного обучения в будущих сетях, включая IMT-2030. В документе представлен набор архитектурных требований, который, в свою очередь, описывает архитектурные компоненты системы. А также приводится архитектурная основа для интеграции таких компонентов в сети IMT-2020 и последующие, включая руководящие указания по применению этой архитектурной структуры в сетях, зависящих от конкретной технологии. Данная рекомендация также приводит ряд терминов в области ИИ в сетях связи. Рассмотрим некоторые из них:

1. Машинное обучение (ML - Machine Learning): процессы, которые позволяют вычислительным системам понимать данные и получать из них знания

без необходимости явного программирования. Это определение было также адаптировано из стандарта ETSI GR ENI 004 V1.1.1 (2018), *Experiential Networked Intelligence (ENI); Terminology for Main Concepts in ENI* [209].

2. Оркестратор функций машинного обучения (MLFO - machine learning function orchestrator): логический узел с функциями, которые управляют узлами и оркестрируют их в конвейере машинного обучения.

3. Песочница машинного обучения (machine learning sandbox): среда, в которой можно обучать, тестировать модели машинного обучения и оценивать их влияние на сеть.

В данной рекомендации также представлены следующие высокоуровневые требования, которые необходимо учитывать в развитии систем автономной сети:

- Рекомендуется использовать архитектуру машинного обучения для поддержки данных, поступающих из нескольких источников. (В сетях источники данных могут быть разнородными, интегрированными с различными NF (Network Functions, с англ. Сетевыми функциями) и могут также передавать данные в различных форматах. Соответственно, необходимо предусмотреть общие архитектурные компоненты, которые позволят функциям машинного обучения получать и сопоставлять данные из различных источников в сети);

- Архитектура систем машинного обучения должна поддерживать несколько технологий будущих сетей, включая IMT-2020 и IMT-2030;

- Архитектура ML должна взаимодействовать с внешними функциональными объектами, не относящимися к IMT-2020. (В сетях сосуществует одновременно множество технологий, например, лицензированные и нелицензированные беспроводные технологии, технологии конвергенции фиксированной мобильной связи и спутниковой связи (FMSC), устаревшие и будущие технологии. Появление слайсинга сети, представленного в МСЭ-Т Y.3111, является одним из примеров, в котором важны инвариантные технологические решения с точки зрения поддержки нескольких поколений и сопутствующий технологий);

- Архитектура систем машинного обучения, должна обеспечивать возможность гибкого размещения функций ML в сети. Размещение подсистем должно осуществляться с учётом наиболее эффективного для производительности приложений ML, а также с учётом ограничений, определённых в спецификациях приложений ML;

- Конфигурация функций машинного обучения в сети должна обеспечивать подключение и извлечение новых данных или конфигураций на основе метаданных источников данных (например, одним из таких вариантов использования является анализ зарегистрированных данных для обнаружения аномалий в сетях);

- Архитектура системы машинного обучения должна обеспечить интерфейсы для обмена обученными моделями между функциями системы машинного обучения нескольких уровней;

- При разработке интерфейса взаимодействия с системами управления базовых сетей в архитектуре системы ML рекомендуется использовать существующие стандартные протоколы там, где это возможно, с необходимыми расширениями (при необходимости). Данное требование также согласуется в архитектурным принципом сетей IMT-2030 - “о простоте”. Например, некоторые интерфейсы могут быть реализованы путём повторного использования существующих протоколов (например, управления радио ресурсами (RRC) - МСЭ-Т Y.3104, MEC (ETSI MEC 003), службы управления MnS (3GPP TS 23.501) [210], или, например, модуль-источник, работающий в пользовательском устройстве, может использовать определённые API для извлечения данных от клиента передачи голоса по технологии VoLTE, на базе GSMA IR.92 (VoLTE) (2018) – IMS Profile for Voice and SMS, и так далее [211].

Как видим, в 2019 году была представлена функциональная схема системы машинного обучения для сетей связи, которая также была интегрирована в архитектуру сети 5G/IMT-2020, согласованную МСЭ-Т как рекомендация Y.3104 : Architecture of the IMT-2020 network (с англ. Архитектура сети IMT-2020). На рисунке 1.11 изображена данная архитектура [48]:

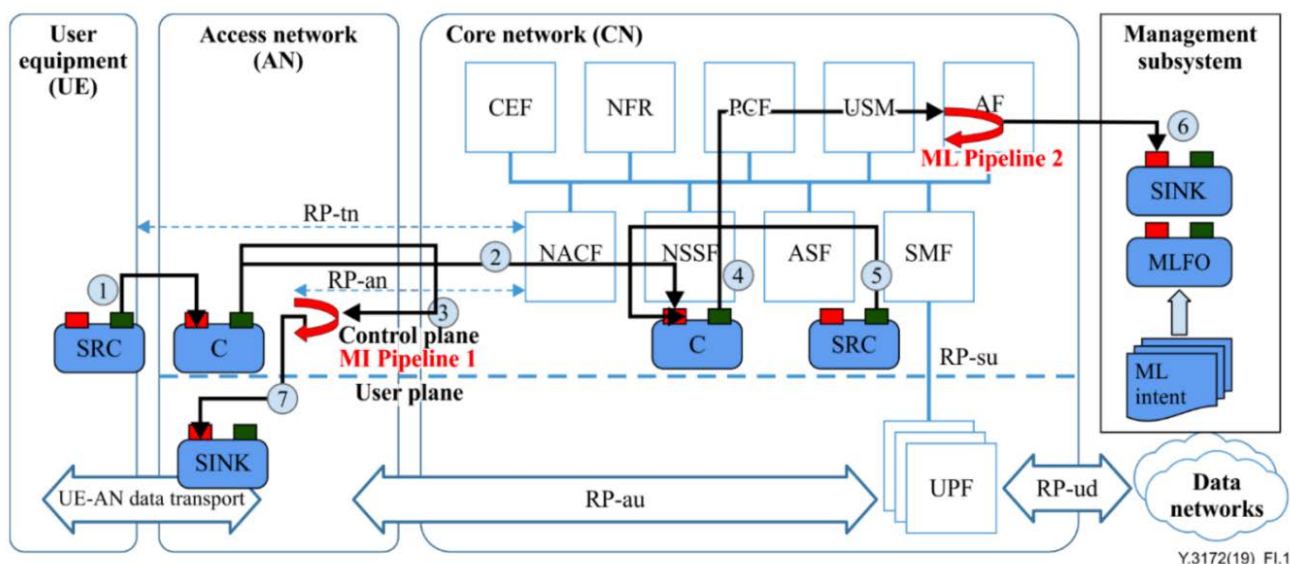


Рисунок 1.11 – Пример интеграции архитектуры систем ML в сети 5G/IMT-2020

Модули ядра сети 5G/IMT-2020 были представлены выше при рассмотрении федеративного MEC и фреймворка динамических туманных вычислений. Здесь приведём описания некоторых модулей системы ML:

- SRC (Source, с англ. источник). Данный узел является источником данных, которые можно использовать в качестве входных данных для конвейера машинного обучения. Потенциальные узлы SRC включают пользовательское оборудование, функцию управления сеансом (SMF, описанную в МСЭ-Т Y.3104, сущность которой была в том числе приведена ранее), а также функцию приложения (AF), описанную в рекомендации МСЭ-Т Y.3104

- C (Collector, с англ. сборщик): этот узел отвечает за сбор данных с одного или нескольких узлов SRC. Узел коллектора может конфигурировать также узлы SRC. Например, протокол управления радио ресурсами RRC, определённый в 3GPP TS 23.501 (2018) “System Architecture for the 5G System (Release 15)” может использоваться для настройки пользовательского оборудования (UE), действующего как узел SRC. Коллектор при этом может использовать протоколы операций, администрирования и обслуживания конкретного поставщика для настройки SMF, действующего как узел SRC. Стоит отметить, что такие

конфигурации могут, в том числе, использоваться для управления характером данных, их степенью детализации и периодичностью во время их генерации из SRC.

- Существуют также в более общей архитектуре системы машинного обучения такие модули как: “препроцессор”, отвечающий за очистку данных, агрегацию данных или выполнение любой другой предварительной обработки, необходимой для того, чтобы данные поступали далее в корректном формате для модели ML; “Модель машинного обучения” (M) в форме, которую можно использовать в конвейере машинного обучения системы; “дистрибьютор”, отвечающий за идентификацию подсистемы SINK (были представлены в разделе про динамические туманные вычисления) и распределение выходных данных узла M на соответствующие узлы SINK.

Конвейер машинного обучения (ML Pipeline) — это логический программный конвейер, который возможно интегрировать в существующие управляющие системы сети. Службы MLFO (оркестратора) используются для создания экземпляров и настройки моделей. Аспекты интеграции такого наложения конвейера ML в базовые сети для конкретной технологии могут потребовать расширения или определения конкретных протоколов и API, при этом необходимо учитывать требования по использованию существующих протоколов и API, представленные выше.

Из рисунке 1.11 видно, что предложенная архитектура с конвейером моделей машинного обучения охватывает все основные узлы ядра сети 5G/IMT-2020, а также инвариантна по отношению к системам будущего поколения IMT-2030 (благодаря архитектуре и наличию модулей таких, как SRC, C и прочие), что позволяет достичь необходимой прозрачности в мониторинге и управлении сетью, в том числе вычислительными ресурсами.

В настоящее время в рамках престандартизации и основного процесса стандартизации в различных исследовательских комиссиях МСЭ было разработано достаточно большое число рекомендаций. В частности, в декабре 2023 года, в рамках 13 ИК была принята рекомендация МСЭ-Т Y.3061 “Autonomous networks - Architecture framework”. В данном документе [212] представлены однозначные

требования, а также компоненты архитектуры, в том числе диаграммы взаимодействий, которые составляют фреймворк архитектуры для полностью автономных сетей (AN). Данный фреймворк учитывает предыдущие разработки как в области основной стандартизации, так и в процессе престандартизации, проходившей параллельно в рамках специальной фокус-группы (ФГ) “Автономные сети”.

Рассмотрим архитектуру и приведём описания основных модулей (рис. 1.12) [212]:

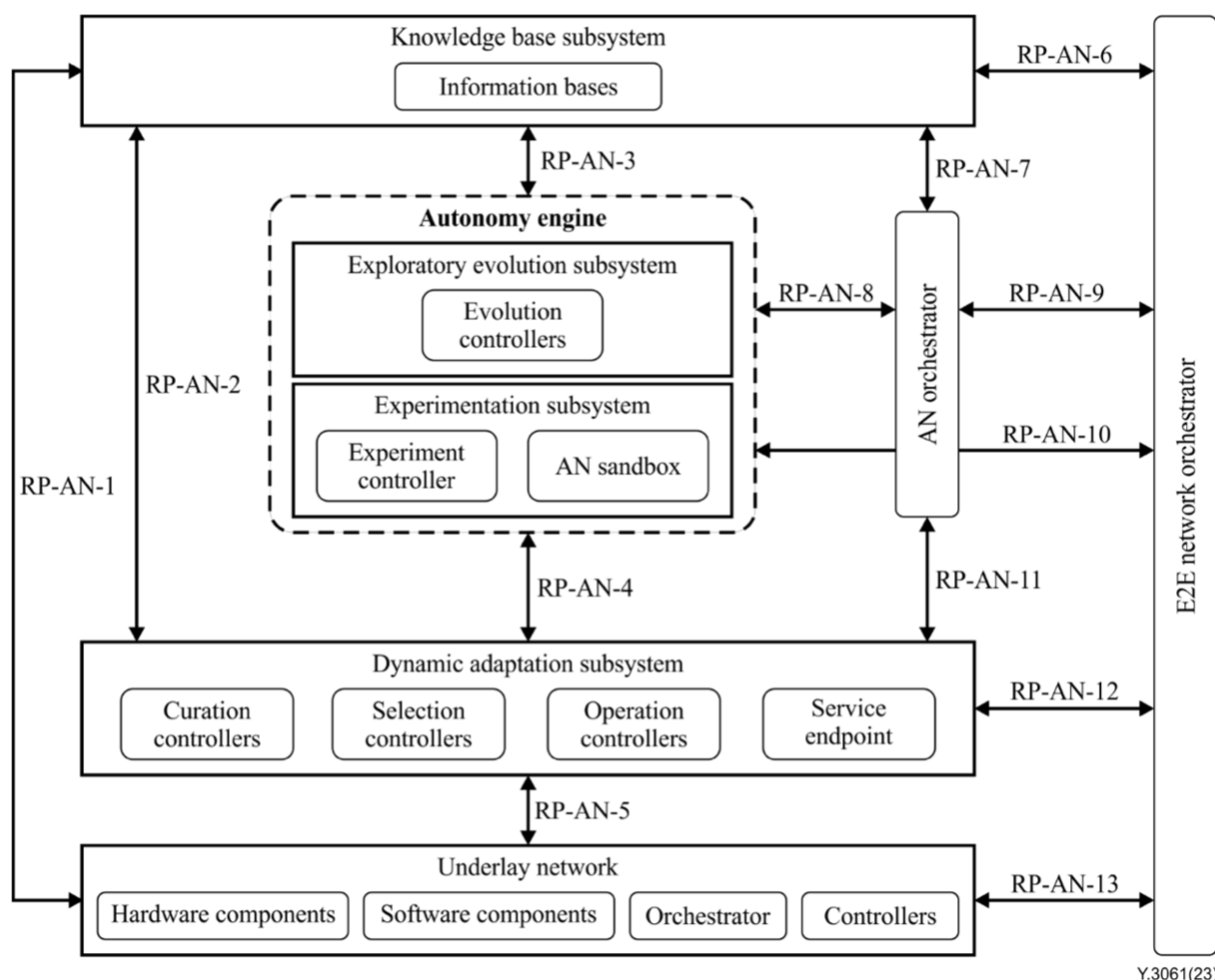


Рисунок 1.12 – Высокоуровневая архитектура автономных сетей

Как показано на рис.1.12, архитектура автономных сетей состоит из механизма(движка) автономности (с англ. “autonomy engine”), подсистемы

динамической адаптации (с англ. “adaptation subsystem”), системы базы знаний (KB - Knowledge base subsystem), оркестратора AN (с англ. “AN orchestrator”), базовой сети (с англ. “Underlay network”, которая может быть представлена как IMT-2020, так и интегрированной сетью IMT-2030), а также сетевым оркестратором E2E.

1. *Автономный механизм/движок* относится к группе подсистем исследований и подсистемы проведения экспериментов (Данная подсистема позволяет адаптировать контроллеры в ответ на изменения в базовой сети. Знания, хранящиеся в подсистеме базы знаний, используются в AN для поддержки непрерывного развития, в том числе, на постоянном обучении и совершенствовании моделей машинного обучения). Вместе эти архитектурные компоненты обеспечивают более общий процесс обучения. Эта подсистема напрямую направлена на выполнение требования об автоматических «процедурах разработки», представленного в рекомендации МСЭ Y.3177 “Architectural framework for artificial intelligence-based network automation for resource and fault management in future networks including IMT-2020” [214];

2. *Подсистема “Динамической адаптации”* обеспечивает базовой сети автономность, а также предоставляет функции обработки новых данных для формализации новых сетевых сценариев. Знания, хранящиеся в подсистеме KB, используются в AN для поддержки непрерывной динамической адаптации. При этом подсистемы “Оркестратор AN” и “сетевой оркестратор E2E” поддерживают функции оркестрации, необходимые для подсистемы “динамической адаптации” к базовой сети. Кроме того, данная подсистема ответственна за создание контроллеров, которые далее проверяются “подсистемой проведения экспериментов”. Эта подсистема также отвечает за то, какой из курируемых контроллеров следует выбрать для фактического развёртывания в управлении соответствующим объектом в базовой сети.

3. *Подсистема “База знаний”*. Подсистема AN требует сбора, описания, использования, хранения и анализа данных. Анализ данных и информации, приводящий к пониманию того, что означают эти данные и информация, часто называют знаниями (согласно принципу пирамиды Маслоу). Эти данные,

информация, а также знания необходимы контроллерам для управления объектами, в том числе, в целях поддержки непрерывного развития системы, проведения экспериментальной проверки в формате “на лету”, в реальном времени и для выполнения функций подсистемы “динамической адаптации”. База знаний — это подсистема, которая управляет хранением, запросами, экспортом и импортом, а также оптимизацией и обновлением полученных системой знаний.

4. *Оркестратор AN* — это подсистема, отвечающая за управление рабочими процессами и процессами в подсистеме AN, а также жизненным циклом контроллеров. Для управления рабочими процессами в AN “оркестратор AN” координирует работу с различными другими функциями внутри и за пределами AN. Примерами рабочих потоков и процессов в AN являются взаимодействия с сетевым оркестратором E2E, базой знаний и репозиториями компонентов AN. Приведём примеры экземпляров контроллера:

- a) набор объектов Java, которые будут выполняться на виртуальной машине Java;
- b) CL в рамках ZSM, определённой в [215] спецификации ETSI” GS ZSM 009-1 V1.1.1 (2021), Zero-touch network and service management (ZSM); Closed-loop automation; Part 1: Enablers” ;
- c) контроллер в рамках открытой платформы ONAP;
- d) конвейер ML, определённый в МСЭ-Т Y.3172, и приведённый в том числе выше.

Стадиями жизненного цикла контроллеров является: их создание или создание их экземпляров на основе проектов типовых контроллеров, хранение, проверка, обновление, удаление, обнаружение, конфигурация, развёртывание и дальнейший мониторинг, а также уничтожение экземпляра или непосредственно - контроллера. Стоит отметить, что ряд функций, применяемых к контроллерам, выходят за рамки основного жизненного цикла контроллеров, например, оптимизация контроллеров может быть достигнута с помощью функций, внешних по отношению к системе Автономной Сети. В тоже время, будучи частью плоскости управления, оркестратор AN предоставляет интерфейс

операторам/администраторам в виде отчётов о функционировании AN и пользовательских (с точки зрения администратора) интерфейсов для настройки AN.

5. *Базовая сеть*. Данная подсистема на рис.1.12 - это телекоммуникационная сеть со своими сетевыми функциями. Данная сеть предоставляет интерфейсы для контроллеров. Базовая сеть может состоять из аппаратных и программных компонентов, а также компонентов управления, таких как оркестраторы. Сеть IMT-2020 является примером базовой сети, как и сеть IMT-2030. Некоторые из интерфейсов взаимодействия при условии, что контроллером автономной сети может быть экземпляр конвейера модели машинного обучения, представлены выше в пункте, где анализировалась архитектура динамических туманных вычислений (например, модули SMF, NSSF, представленные в свою очередь в спецификации 3GPP). Примерами интерфейса взаимодействия могут быть также северный интерфейс мультиконтроллерного сегмента программно-конфигурируемой сети или сетевой модуль единой платформы OpenStack - Neutron, реализуемый, в том числе, в платформе ONAP (платформа с открытым исходным кодом);

6. Сетевой оркестратор E2E. Как определено в рекомендации МСЭ-Т У.3100 в контексте сетей 5G/IMT-2020, оркестрация — это набор процессов, направленных на автоматическое размещение, координацию, создание экземпляров и использование сетевых функций, а также сетевых и вычислительных ресурсов как для физической, так и для виртуальной инфраструктуры путём использования критериев и алгоритмов оптимизации. Оркестратор сети E2E, основанный на принципах оркестрации, представляет собой набор функций, взаимодействующих с подсистемами в структуре архитектуры AN для управления и оркестрации соответствующих физических и виртуальных объектов сети управления в AN, включая, в том числе подсистему “базовая сеть”.

Архитектура автономной сети (AN), приведённая на рис.1.12, используется для создания или адаптации контроллеров, проверки данных контроллеров и применения их к управляемому объекту. Несмотря на разные роли, данные контроллеры проходят одни и те же стадии жизненного цикла: исследование или

эволюция (на базе накопленных данных и знаний), экспериментирование и динамическую адаптацию в процессе работы подсистемы “динамической адаптации” при взаимодействии с базовой сетью ИМТ-2020 или ИМТ-2030 и их конкретной подсистемой. Архитектура предусматривает возможное развитие для более эффективной адаптации к текущей эксплуатационной ситуации без участия человека, а также к будущей, реализуя требования инвариантности к нескольким поколениям сети.

Как уже было отмечено ранее, на данный момент разработано более 220 рекомендаций МСЭ в области Искусственного интеллекта в части его применения в сетях связи, в том числе для достижения поставленных требований перспективных услуг 5G/ИМТ-2020 и услуг телеприсутствия сетей ИМТ-2030. Заложенные требования, архитектуры систем, принципы позволяют далее развивать технологии систем управления сетями и услугами точно, с точки зрения платформ - открыто, совместно с другими участниками рынка телекоммуникаций и услуг. Данная международная коллаборация действительно более напоминает модель, где происходит переход от “низких” данных к “знаниям”, которые основываются на опыте и знаниях, полученных благодаря инструментам искусственного интеллекта. Масштабность изменений сетей связи в условиях перехода к интегрированным сетям, внедрению инструментов ИИ, услуг Телеприсутствия, формирует новый этап/эру развития сети Интернет.

Стоит также отметить, что в рамках ООН под инициативой МСЭ был создан специальный глобальный саммит “AI for Good” (с англ. Искусственный интеллект во Благо), который направлен на объединение специалистов/представителей различных рынков, в частности рынка инфокоммуникационных технологий (базового рынка), учёных, политических и социальных деятелей с одной целью - командно достичь понимания целей, задач в области применения искусственного интеллекта, сформировать технологический задел, повысит вовлеченность стран, в частности в рамках повестки ЦУР, достижение которых также ожидается при использовании технологий ИИ. Глобальный саммит “AI for Good” форсирует решение тех проблем, которые стоят перед инженерами и учёными в сетях связи,

агрегируя решения, концепции, специалистов. В рамках “AI for Good” МСЭ создало отдельные соревнования “AI/ML in 5G Challenge”, где страны-участники и их представители (компании, академии/университеты) имеют возможность сформировать исследовательскую проблему/задачу для команд со всего мира и тем самым способствовать разрешению технических деталей в части интеграции ИИ в сети связи (от уровня радио интерфейсов до ядра сети и конечных услуг). Данный опыт позволил в 2018 - 2020 году в рамках Фокус группы “Автономные сети” при 13 ИК разработать немалое количество проектов спецификаций, аналитических обзоров и технических отчётов, которые в последующем легли в основу рекомендаций МСЭ по автономным сетям связи.

На данный момент данная фокус группа была перезапущена (ввиду ограничения времени функционирования, согласно правилам МСЖ), определены новые горизонты задач. В данную группу также входит СПбГУТ, где его специалисты принимают активное участие. В дополнение стоит отметить, что данная фокус-группа одна из групп по престандартизации, которая работает “на опережение” в то время, как ведётся уже ни один год основная стандартизация.

1.5. Концепция Мультивселенной

Появившаяся в своё время новость в средствах массовой информации (СМИ) о разработке “Метавселенной” одной из крупных международных компаний была неоднозначно встречена обществом (пользователями, государствами, бизнесом/компаниями). Озвученный проект метавселенной был определён как система, в которой реализуются следующие функции для пользователей: «общение, работа, игры, учёба и образование, e-commerce (онлайн покупки)». В дополнение были определены следующие 3 основных блока “Метавселенной”:

- Horizon Worlds;
- Horizon Workrooms;
- Horizon Venues.

Эти блоки раскрывают базовые потребности человека/пользователя в социальной жизни, на работе, а также в предоставлении развлечений [216, 217].

Ожидалось, что основным интерфейсом для взаимодействия “человек-метавселенная” будет выступать оборудование дополненной и/или смешанной реальности - AR/VR, например, шлем или очки Oculus. В настоящее время исследованиями и разработками в области метавселенных занимаются уже немало компаний-лидеров в области разработки передовых цифровых продуктов. Рассмотрим некоторые из этих разработок:

- Компания Microsoft в первую очередь нацелена на создание промышленной метавселенной. И в качестве интерфейса взаимодействия с метавселенной предлагает свою разработку интерфейса смешанной реальности - Microsoft HoloLens.

- Компания Apple также объявила о ведущихся исследованиях и разработках в области метавселенных. При этом, в качестве интерфейса взаимодействия с метавселенной предлагается AR/VR-шлем по технологии дополненной и виртуальной реальности со специально разработанной операционной системой (ОС), кодовое название которой - Oak.

- Компания Tesla занимается исследованиями и разработками в области интерфейса взаимодействия, предлагая при этом костюм присутствия TeslaSuit, который имеет наиболее продвинутый уровень взаимодействия с объектами физического и виртуального мира.

Анализ существующих работ в мире в области Метавселенных в ведущих технологических компаниях показал, что предлагаемые ими продукты и проекты метавселенных естественным образом максимально коррелируются с профилем компаний и их команд. То есть компании концентрируются на тех технологических областях, в которых имеют опыт:

- программное обеспечение (ПО) развлекательных услуг;
- оборудование в виде шлемов и/или очков;
- кибернетика;
- графический дизайн (например, компания Disney)

Стоит отметить, что на данный момент очень мало участников рынка следуют системному подходу и ставят основной целью в текущих исследованиях определить масштабы и границы разрабатываемых метавселенных. Анализ открытых источников показал, что в настоящее время произошла приостановка ряда коммерческих проектов с целью уточнения глобальных приложений метавселенных. Быстрый и достаточно “шумный” старт показал, что метавселенные обладают не только функциями развлечений, но, в первую очередь, определяют следующее поколение развития сетей связи и их услуг. При этом ожидается, что метавселенные изменят устоявшиеся модели как в экономике, социуме, так и других областях жизни человека [218–226].

Приостановка ряда проектов не говорит об остановке полностью работ по тематике метавселенных. Наоборот, в настоящее время наблюдается рост публикационной активности [227–260], а также формируются новые исследовательские группы. Международный Союз Электросвязи, как специальное агентство ООН, по поручению TSAG (центрального органа управления МСЭ-Т) инициировал создание специальной фокус-группы по исследованию метавселенных (FG-MV - Focus Group Metaverse) 16 декабря 2022 года. В предварительных результатах этой группы метавселенная(-ые) представляются как следующая глобальная версия Интернета и следующая эра развития сетей связи и услуг с формированием цифровой сетевой вселенной. Инициализация создания фокус группы руководящем органом МСЭ говорит о потенциале данной технологии и её влиянии на все стороны жизнедеятельности человека. Фокус-группа проводит предварительные исследования и анализ потенциальных технологий, реализуя тем самым стадию престандартизации основного процесса разработки проектов будущих рекомендаций. В июне 2024 года фокус группа завершила первый этап работ вследствие завершения исследовательского периода МСЭ-Т. При этом была признана необходимость продолжения её работы. Далее рассмотрим результаты работы этой фокус группы, которые были обсуждены широким кругом специалистов в области сетей связи и приняты в качестве рабочих документов, технических отчётов и спецификаций. Разработанные документы

позволяют системно взглянуть на концепцию Метавселенной, обозначить перспективные задачи в области науки. В диссертации уже рассматриваются технологии (динамические туманные вычисления, костюм телеприсутствия), которые относятся к наступающей новой эре сети Интернет - эре сетевых метавселенных и мультивселенной.

К настоящему времени фокус группа приняла более 55 документов, которые разрабатывались в специальных рабочих группах (WG, working group), каждая из которых была нацелена на соответствующее технологическое направление:

- *WG9 - Объединяющие вопросы.* Данная рабочая группа рассмотрела и приняла в июне 2024 года следующие документы: “Standardization roadmap for metaverse” и “Metaverse standardization landscape for gap analyses”. Эти документы имеют стратегический характер и призваны консолидировать общие процессы исследования и разработок, объединить коллективы исследователей и обозначить горизонты работ. В том числе в вопросе стандартизации были определены задачи для последующего процесса разработок новых стандартов в МСЭ-Т и в других международных стандартизирующих организациях [261, 262];
- *WG8 – Устойчивость, доступность и инклюзивность.* Данная рабочая группы рассмотрела и приняла за период с 2023г. по 2024г. 12 документов [263-274], в числе которых: “Guidelines to assess inclusion and accessibility in metaverse standard development”, “Requirements of accessible products and services in the metaverse”, “Design criteria and technical requirements for sustainable metaverse ecosystems”, “Accessibility in a sustainable metaverse”, “Requirements for communication between human-avatar languages in the metaverse”, “Metaverse Sustainability: Driving energy efficiency and GHG emissions reduction”. Из названий видно, что основным вопросом, который РГ8 изучала является вопрос доступности метавселенных для различных приложений, например, разработка требований для взаимодействия между человеком и аватаром, требования для устойчивых экосистем метавселенных и т.п.;

- *WG7 – Экономические, нормативные и конкурентные проблемы метавселенных.* Данная рабочая группа рассмотрела и приняла 3 документа за период 2023г. - 2024г [275-277]. Представлены следующие документы: “Policy and regulation opportunities and challenges in the metaverse”, “Regulatory and economic aspects in the metaverse: Data protection”, Economic Value Creation and Competition in metaverse. Из названий документов видно, что работы в РГ7 были направлены на решение социальных и экономических проблем. Проработка таких проблем для концепции Метавселенных является такой же важной, как и разработка архитектуры, интерфейсов и обеспечения кибер-физической безопасности. Как ранее было отмечено, работы в текущих коммерческих проектах по словам ответственных лиц в открытых общественных источниках информации были приостановлены, в том числе, для уточнения, оценки, проработки и стандартизации вопросов, касающихся социальной и государственной безопасности;
- *WG6 – Безопасность, защита данных и личной информации.* Данная рабочая группа рассмотрела и приняла 9 документов за период 2023г. - 2024г [278-286]. Некоторые из представленных документов: “Guidelines for consideration of ethical issues in standards that build confidence and security in the metaverse”, “Cyber risks, threats, and harms in the metaverse”, “Children's age verification in the metaverse”, “Responsible Use of AI for Child Protection in the metaverse”, “Considering online and offline implications in efforts to build confidence and security in the metaverse”, “Security for things across metaverses in aspects of data processing and management”, “The essential components of trusted data use in building a trustworthy metaverse”. По названиям ряда приведённых документов можно сделать вывод о том, что РГ6 разработала не только документы, касающиеся технологической безопасности (с технической точки зрения), но и затронула проблемы кибер-физической безопасности, в том числе, в вопросе взаимодействия детей с метавселенными и обеспечение доверенной среды метавселенных;

- *WG5 – Функциональная совместимость.* Данная рабочая группа рассмотрела и приняла 3 документа за период 2023г. - 2024г: “High-level interoperability architecture for cross-platform metaverse”, “nteroperability of identity of things across metaverse platforms”, “High-level interoperability architecture for cross-platform metaverse”. Исследования и разработка в области совместимости не менее важны в метавселенных, чем утверждение архитектурных решений [287-289]. Совместимость платформ, аватаров и других объектов метавселенных в условиях создания мультивселенной является одним из важнейших вопросов. Опыт внедрения новых поколений сетей связи показывает, насколько важным оказывается решение данной задачи, в том числе для обеспечения безопасности, устойчивости систем и повышения уровня пользовательского опыта. Совместимость, в том числе, так называемая обратная совместимость при разработке решений в метавселенных позволит начать их внедрение частично уже на сетях 5G/IMT-2020. Такая инвариантность позволит получить первые отзывы потребителей услуг и улучшить фундаментальные решения (протокольные, интерфейсные, архитектурные) для метавселенных и мультивселенных;
- *WG4 – Интеграция виртуального и реального мира.* Данная рабочая группа рассмотрела и приняла 2 документа: “Requirements for the metaverse based on digital twins enabling integration of virtual and physical worlds” и “Reference model for the metaverse based on a digital twin enabling integration of virtual and physical worlds” [290-291]. На сегодняшний день в качестве технологии интеграции двух миров (физического и виртуального) предложено взять за основу опыт исследований и разработок в области создания цифровых двойников (DT - Digital Twins). Эта технология уже упоминалась выше в диссертации, приводились её преимущества и возможности. Цифровые двойники действительно позволяют “стереть границу” между двумя мирами на уровне инфраструктур. При этом цифровой мир (метавселенная) будет подкреплён данными физического мира, расширенными благодаря моделированию, прогнозированию, анализу в цифровых двойниках. В тоже

время, физический мир и его процессы также будут дополнены на качественном уровне благодаря данным и знаниям, получаемым от цифровых двойников и метавселенных. В итоге получится достичь эффекта двунаправленной синергии;

- *WG3 – Архитектура и инфраструктура.* Данная рабочая группа рассмотрела и приняла 3 документа, а именно: “The reference framework of industrial metaverse”, “Multimedia aspect of metaverse architecture”, “Requirements, functional framework and capability of IoT for metaverse”. Результаты работ в этой рабочей группе [292-294] сводятся в основном к разработке высокоуровневого фреймворка/архитектуры, который отражает те модули и подсистемы, которые необходимы при разработке платформ “метавселенных”, а также требования к их характеристикам, в том числе функциональные. РГЗ также выполнила первый шаг в разработке фреймворка для индустриальных метавселенных. Ожидается, что такого типа метавселенные будут обладать собственными требованиями с целью обеспечения производственной и техногенной безопасности, как это было при разработке решений для индустриального Интернета вещей (ИИВ);
- *WG2 – Приложения и услуги.* Данная рабочая группа рассмотрела и приняла 8 документов за период 2023-2024гг. Представим некоторые из этих документов: “Power metaverse: Use cases relevant to grid side and user side”, “Capabilities and requirements of generative artificial intelligence in metaverse applications and services”, “Guidelines for metaverse application in power system”, “Overview of the application requirements of metaverse on emergency management in chemical industrial parks”, “Landscape and use cases for the industrial metaverse”, “Framework and requirements for the construction of human-driven 3D digital human application system for metaverse”, “The future of travel in the metaverse: landscape and use cases”, “Use cases and requirements for virtual and real fusion coding in metaverse applications”. Несложно заметить, что в настоящее время эти документы [295-302] представляют собой россыпь различных предложений, сценариев использования, обзоров.

Текущие предложения затрагивают только некоторые области возможного применения метавселенных. Планируется, что в дальнейшем тематику метавселенных будут изучать все исследовательские комиссии МСЭ-Т. В том числе и те, которые исторически специализируются на разработке архитектур, требований и других решений в области конечных приложений/услуг в сетях связи;

- *WG1 – Общие вопросы.* Данная рабочая группа рассмотрела и приняла 10 документов за период 2023-2024гг. Приведём некоторые из них: “Exploring the metaverse: opportunities and challenges”, “Metaverse: an analysis of definitions”, “Definition of metaverse”, “Principles for building concepts and definitions related to metaverse”, “A framework for confidence in the metaverse”, “Near-term and long-term Implications for people in the metaverse”, “Overview of metaverse”, “Glossary for metaverse”, “Definitions of CitiVerse”, “Building a People-centred CitiVerse” [303 - 312]. РГ1 нацелена на исследования общих вопросов о метавселенных, которые в итоге формируют конкретные направления исследований и разработок. Здесь также представлены аналитические обзоры и обоснование терминов в области метавселенных. Определены несколько концепций создания и развития метавселенных.

Термин метавселенная в 1992 году впервые использовал в своём научно-фантастическом романе «Snow Crash» N. Stephenson (NY: Bantam Books). При этом метавселенная определяется как параллельная виртуальная реальность, мир, в который люди могут войти через свой аватар, представляющий цифровую идентичность физического «Я». Идея метавселенной обсуждалась уже несколько десятилетий, но благодаря развитию цифровых технологий, таких как Интернет вещей, цифровые двойники, дополненная реальность, виртуальная реальность, искусственный интеллект и другие, метавселенная перешла от научной фантастики к научным исследованиям. Теперь стало ясно, что метавселенная займет своё место в ежедневном быте человека, охватывая все стороны жизни (от работы и образования до социального, общественного и личного).

В техническом отчёте [311] фокус группы приводятся результаты статистического анализа в области публикационной активности, а также рыночной ситуации на момент конца 2023 года - времени публикации данного документа. Рассмотрим некоторые из них. На рисунке 1.13 представлена статистика публикаций по группе ключевых слов, в рамках которых проводились исследования определения “метавселенная”. При этом предлагались различные концепции, основанные на перспективных технологиях. Для анализа были взяты базы цитирования Scopus, Web of Science, ScienceDirect. С 1994 по 2023 год в качестве ключевого слова “Metaverse” в базе ScienceDirect использовалось в 729 публикациях, с 1995 по 2023 года в базе Scopus - 1664 и в базе цитирований Web of Science - 774 раза.

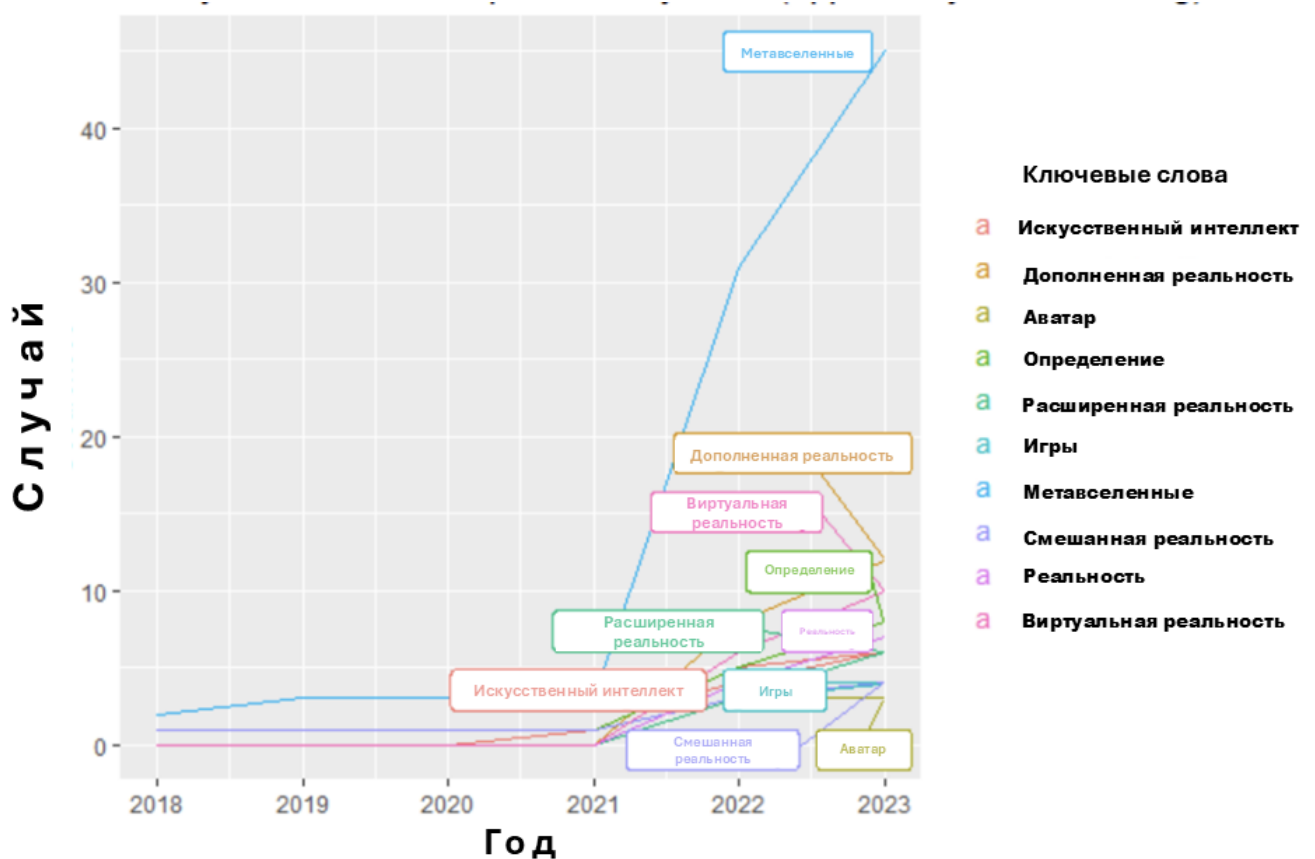


Рисунок 1.13 – Статистика публикаций по ключевым словам

В техническом отчёте специальной фокус-группы МСЭ также представлен графический анализ (в виде пузырькового графика) технологий в части

предложенных определений и, соответственно, видений концепции метавселенных. Рассмотрим некоторые из представленных тенденций (рис. 1.14).

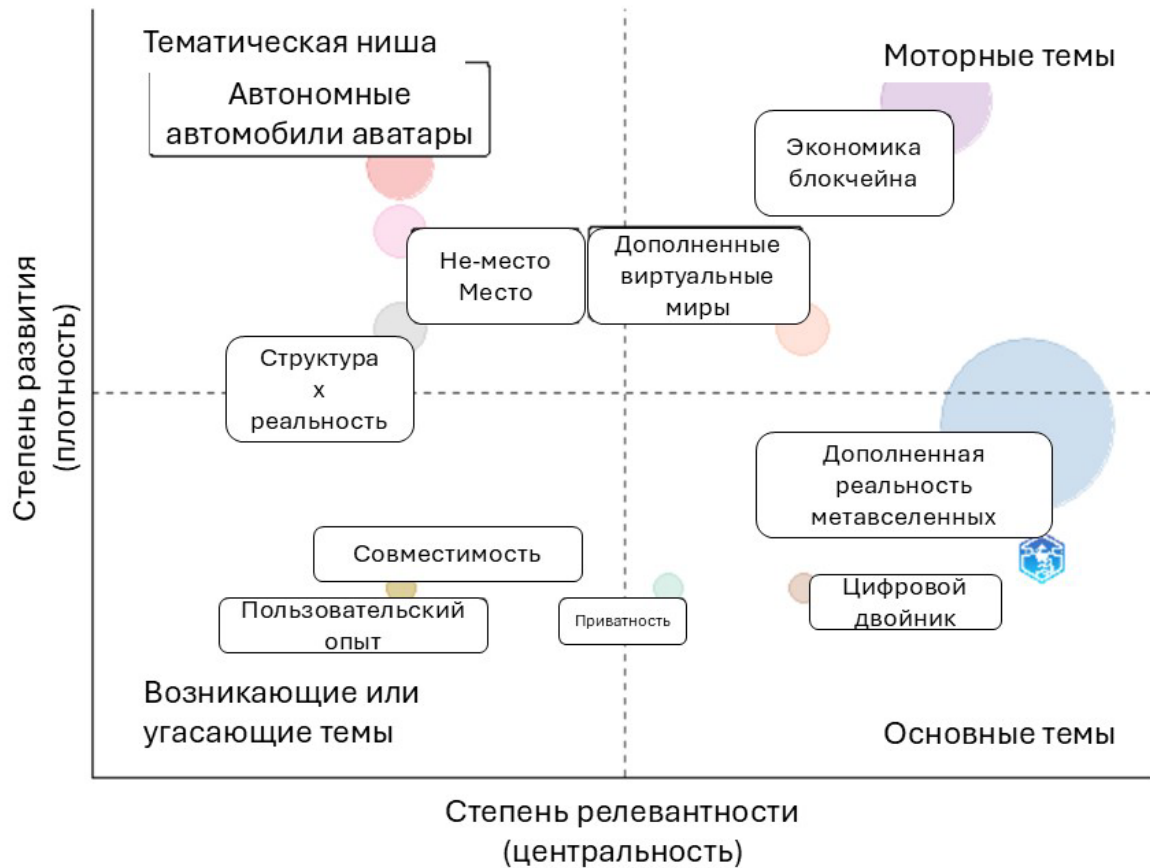


Рисунок 1.14 – Тенденции в определениях метавселенной

Как видно на рисунке 1.14, термин “метавселенная” включает в себя целый комплекс технологий от инфраструктурных (фреймворки/ автономный транспорт и т.п.), до прикладных (блокчейн, дополненная реальность, цифровые двойники и т.д.).

В итоге было принято следующее определение метавселенной [310].

***Metaverse:** An integrative ecosystem of virtual worlds offering immersive experiences to users, that modify pre-existing and create new value from economic, environmental, social and cultural perspectives.*

NOTE – A metaverse can be virtual, augmented, representative of, or associated with the physical world

В переводе на русский язык это определение звучит следующим образом: *Метавселенная - это интегрированная система виртуальных миров, которая предоставит более продвинутый уровень погружения/вовлечения пользователя, что заменит ранее существовавшие модели с экономической, экологической, социальной и культурной точек зрения и привнесет новые ценности. При этом, метавселенная может быть виртуальной, дополненной или являться представлением физического мира.*

В определении метавселенной от МСЭ-Т используется термин “виртуальный мир”, который ранее был утверждён в ISO/IEC 18039:2019 как: Пространственная организация множества виртуальных объектов, потенциально включая их глобальное поведение. На англ., virtual world, virtual environment: Spatial organization of multiple virtual objects, potentially including global behaviour [313].

Текущие исследования метавселенных, проведённые в фокус группе показали, что необходимо перейти от понимания метавселенной как единой цифровой среды для всех к частным метавселенным и представить объединение этих “вселенных” в виде мультивселенной. Такой подход позволит каждому создавать свою метавселенную, которая будет учитывать соответствующие требования и ограничения, предоставлять те функциональные возможности, которые будут заложены разработчиком. Многообразие метавселенных создает естественные проблемы перед инженерным и научным сообществом в части разработки решений по обеспечению безопасности, конфиденциальности, совместимости и переносимости объектов, унификации интерфейсов, форматов данных и обеспечения качества предоставляемых услуг в метавселенных и многие другие, которые отчасти были упомянуты при обзоре структуры фокус группы по метавселенным и их документов. Концептуально метавселенная и мультивселенная представлены на рисунке 1.15.

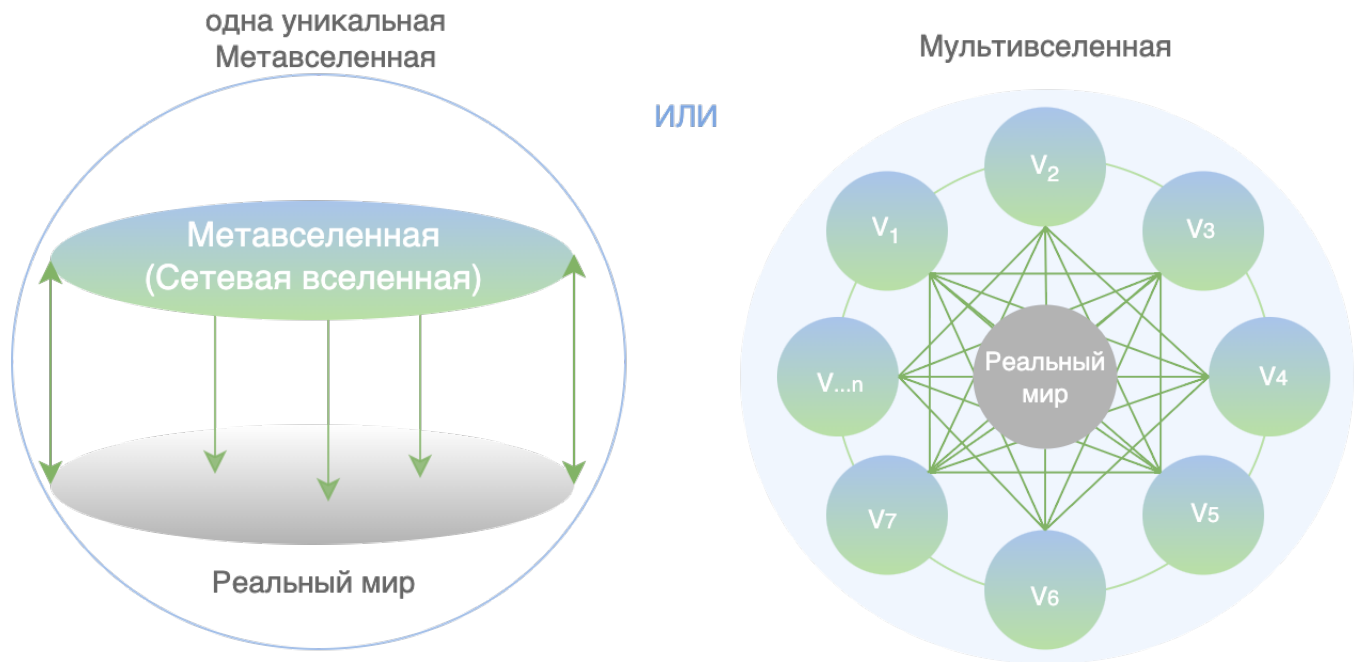


Рисунок 1.15 – Переход к мультивселенной

Стоит отметить, что создание метавселенных (как следующей эры сети), в частности сетевых вселенных, является одной из приоритетных задач в области безопасности и суверенности сети Интернет в Российской Федерации [216].

Масштабность влияния метавселенных недооценена и сложно будет приблизиться к этому пониманию в течение ближайших 3-5 лет. Исследователи, ученые, инженеры, разработчики, социологи и политологи, философы пытаются спрогнозировать это развитие, используя сценарный подход. Предлагаются различные сценарии развития и применения тех или иных технологий для метавселенной, создавая достаточно часто набор уникальных и иногда пересекающихся вариантов. Сценарии не позволяют комплексно спрогнозировать такого рода технологии, масштаб которых сравним с метавселенной. Однако являются инструментом поиска вероятного будущего с отсечением мало вероятных последствий, что позволяет формализовать и систематизировать знания о технологиях, приблизиться к уточнению терминов, и, в конечном счёте, требований, которые формируют облик решения и определяют его горизонт развития.

В техническом отчёте фокус группы предложено рассмотреть сценарии, которые были разработаны на основе спектра технологий и приложений (от AR (Augmentation) до Моделирования/Симуляции (Simulation)) и вариация спектра применения (от личного/персонального (Intimate) до внешнего (External)). Схематически это отражено на рисунке 1.16 [306].

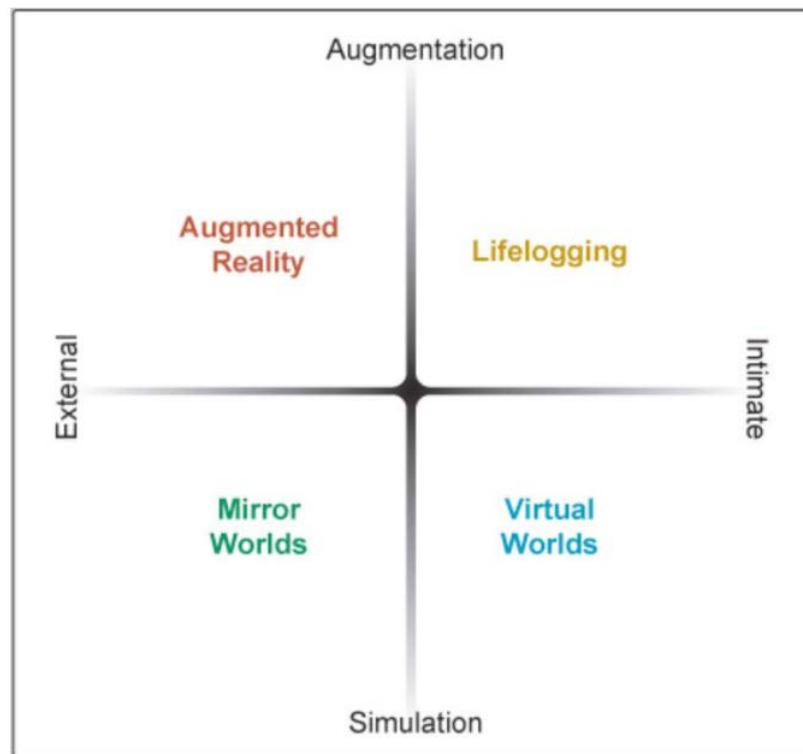


Рисунок 1.16 – Сценарии метавселенной

На рисунке 1.16 представлены также следующие 4 ключевых элемента, которые были определены в работе J. Smart “Metaverse Roadmap: Pathways to the 3D Web” [314].

1. Virtual Worlds (с англ., Виртуальные миры) могут быть представлены как личные/персональные, так и общественные/общие. Виртуальные миры, их объекты, данные и опыт все больше дополняют экономическую и социальную жизнь сообществ физического мира. В будущем граница между многими виртуальными и физическим миром будут размыты. В обоих пространствах вопросы идентичности, доверия и репутации, социальных ролей, правил и взаимодействия остаются на первом плане. Виртуальные

миры уже сейчас влияют на безопасность общества, личности и в конечном счёте - суверенитет государства.

2. Mirror Worlds (с англ., Зеркальные миры) могут быть как внешними, так и симуляционными, то есть смоделированными. Зеркальные миры представляют собой информационно расширенные виртуальные модели или «отражения» настоящего физического мира, для чего может быть использована технология цифровых двойников. Их создание включает в себя сложные инструменты виртуального картографирования, моделирования, геопространственные технологии и технологии определения местоположения, а также технологии регистрации жизни пользователя (записи его истории и его аватара).

3. Augmented Reality (с англ., Дополненная реальность) может быть как внешней, так и дополненной. В дополненной реальности технологии метавселенной улучшают внешний физический мир для человека за счёт использования систем и интерфейсов, учитывающих местоположение пользователя (вспомним требование к позиционированию в сетях ИМТ-2030), обрабатывая и накладывая дополнительную информацию, получаемую через сети связи поверх нашего повседневного восприятия мира.

4. Lifelogging (с англ. запись жизни/логгирование/журналирование) может быть представлено как личным/персональным, так и дополненным. Запись жизни пользователя позволяет отслеживать его историю, опыт, что дает возможность на новом уровне информировать о его состоянии, поддерживать память, формировать модели общения нового уровня с большим погружением. Кроме того, журналирование позволит формировать модели поведения пользователя, что должно уточнить процессы его взаимодействия как с физическим, так и с виртуальными/зеркальными мирами. Например, журналы жизни объектов (например, «spimes» и «blogjects») содержат описание использования окружающей среды и состояния физических объектов. Журналы жизни пользователей (например, «кэширование жизни», «документированная жизни») позволяют людям делать аналогичные записи

своей собственной жизни. Журналы также могут быть построены на основе данных, получаемых с помощью всепроникающих сенсорных сетей.

Matthew Ball в своей работе [315] определил, что метавселенная может быть представлена как «масштабно масштабируемая и совместимая сеть виртуальных трехмерных миров, визуализируемых в реальном времени, которые могут восприниматься синхронно и постоянно, практически неограниченным количеством пользователей с индивидуальным ощущением/опытом присутствия и с сохранением данных, таких как личность, история, права, объекты личности, ее коммуникации/взаимодействия и платежи». Каждый приведённый элемент описания включает в себя различные характеристики метавселенной. Данные характеристики уточняются в техническом отчёте [306] уже упоминавшейся фокус-группы, рассмотрим их:

- Virtual worlds / Immersive (с англ., виртуальные миры или иммерсивные, то есть с погружением пользователя): охватывают широкий спектр виртуальных сред, а именно: от иммерсивных 3D-пространств до текстовых областей, служащих разным целям. В частности, таким, как: образование и городское планирование, электронная коммерция и медицина, что отражает их растущую важность и универсальность в различных приложениях метавселенной;

- 3D/inter-dimensional (с англ, трёхмерное или межпространственное): представляет собой переход от традиционных 2D-интерфейсов к интерактивным 3D-пространствам (с большим уровнем погружения/иммерсивности пользователя), которые лучше отражают человеческий опыт и взаимодействие. При этом существенно влияют на то, как пользователи взаимодействуют с цифровыми объектами, в том числе с контентом, и потенциально преобразуют такие отрасли, как образование, в том числе за счёт более динамичного и иммерсивного опыта пользователя;

- Real-time rendered (с англ., рендеринг/вёрстка в реальном времени): имеет решающее значение для интерактивных виртуальных сред, в том числе зеркальных сред, позволяет виртуальному миру динамически реагировать на ввод пользователя, непрерывно генерируя визуальные эффекты на высоких скоростях, обеспечивая

актуальной информацией с требуемым уровнем качества обслуживания и качества восприятия;

- Interoperability (с англ., совместимость): позволяет пользователям беспрепятственно переносить контент, например, свои аватары и виртуальные предметы между разными метавселенными, в том числе разных производителей и операторов;

- Massively scaled (с англ., масштабируемость): метавселенная, как и привычная сеть Интернет, требует огромного масштаба с бесчисленными цифровыми мирами, чтобы по-настоящему воплотить свою концепцию, превосходя ограниченные возможности цифровых тематических платформ с небольшим числом функций (по сравнению с метавселенной);

- Persistence (с англ., постоянство): метавселенная увеличивает сложность управления данными и вычислительными ресурсами, при этом обогащает пользовательский опыт, делая виртуальные взаимодействия более значимыми и реалистичными для всех пользователей;

- Synchronicity (с англ., синхронность): для метавселенных имеет решающее значение для получения общего опыта в метавселенной, требуя высокой пропускной способности в сетях связи, низкой задержки и постоянного подключения к сети Интернет. Для этого необходимо эффективно управлять сетевыми и вычислительными ресурсами, стремиться к сокращению задержек, гарантируя, что пользователи смогут беспрепятственно взаимодействовать в этих виртуальных и зеркальных средах;

- Unlimited users и individual presence (с англ., неограниченное количество пользователей и индивидуальное присутствие): Метавселенная должна поддерживать более нескольких сотен пользователей одновременно по функциональности и качеству. Данное требование в настоящее время является больше рекомендацией и исходит из опыта разработок в области видеогейминга.

Метавселенная – это уникальная и динамичная среда, предлагающая новые возможности пользователям сети для социального взаимодействия, развлечений, работы, учебы и коммерции. Ее иммерсивный характер в сочетании с

децентрализованной и развитой инфраструктурой делают метавселенную прорывной/революционной технологией, которая сможет изменить взаимодействие с цифровым миром, а также привычным физическим миром. Метавселенная обладает такими характеристиками, как:

- Децентрализованность: метавселенная должна быть релизована на базе децентрализованных технологий, в частности технологиях формата “блокчейн”. Это позволит обеспечить формирование децентрализованной инфраструктуры, устойчивой к цензуре и возможным внутренним и внешним воздействиям. Данный фундаментальный подход позволяет пользователям иметь больший контроль над своей цифровой идентичностью (в том числе в виде аватара) и своими виртуальными активами;

- Совместная работа: метавселенная представляет собой среду для совместной работы, в которой пользователи могут взаимодействовать и работать вместе над созданием и разработкой виртуального контента, объектов, а также благ;

- Виртуальная экономика: предполагается, что метавселенная будет иметь свою собственную виртуальную экономику, где пользователи могут покупать, продавать и обменивать виртуальные товары и услуги. Такой вид транзакций может проводиться с использованием виртуальных валют и защищаться с помощью технологии блокчейн, что также формирует доверительную среду между участниками, сохраняя уникальность и идентичность объектов транзакций;

- Социальные сети: метавселенная в первую очередь является социальной средой, в которой пользователи могут общаться друг с другом и формировать сообщества по общим интересам на примере того, как это происходит в существующих известных социальных сетях. Это может включать в себя общение, игры, участие в виртуальных и иных мероприятиях;

- Творчество и внесение вклада в общество/мир: метавселенная представляет собой открытую среду, в которой пользователи имеют свободу творить и исследовать любым способом по своему выбору. Этот уровень творческой свободы открывает безграничные возможности, подкрепляя свой опыт теми знаниями, которые формируются в метавселенных на основе опыта других пользователей.

Пользователи могут делиться своим опытом в цифровом виде, передавать навыки, дополнять друг друга и так далее;

Рассмотрим, каким образом метавселенная представлена в документе МСЭ-Т [306] в виде функциональной блок-схемы. Метавселенная может быть сформирована из основных пяти фундаментальных составляющих: инфраструктура, расширение человеческого потенциала, цифровая идентичность, экономические факторы и экосистема. Пользователи могут беспрепятственно исследовать виртуальные, физические миры и, в том числе, зеркальные миры. В метавселенной это будет возможно благодаря развитой и децентрализованной телекоммуникационной и вычислительной инфраструктуре, различным программным и аппаратным платформам, а также технологиям иммерсивных интерфейсов для человека-пользователя. Благодаря поддержке технологий цифровой идентификации и децентрализованных финансов метавселенная все чаще будет существенно влиять на экономические и социальные аспекты, тем самым постоянно развивая и укрепляя свою экосистему и, соответственно, влияя на физический, привычный нам (на момент 2024 года) мир. Рассмотрим далее некоторые существенные понятия, приведённые в техническом отчёте:

- *экосистема метавселенной*: может быть представлена, в виде экономических, экологических, социальных и культурных перспектив;
- *экономические факторы метавселенной*: децентрализованные и цифровые финансы, блокчейн, криптовалюта, NFT, e-commerce, реклама, платежи, транзакции, юнит-экономика и персонализированный маркетинг;
- *идентификация в метавселенной*: цифровая идентификация, аватар, агенты, многопользовательская и многозадачная работа, социальные графики, рейтинг, социальное курирование, безопасность, конфиденциальность.
- *дополнительные возможности/интерфейсы пользователя*: мобильные устройства, гарнитуры (VR), очки дополненной реальности (AR), другие носимые устройства, тактильные, голографические терминалы, интерфейс «мозг-машина»; платформа создания, платформа взаимодействия, платформа модерации контента, 3D-дизайн/моделирование, игровые

движки, сервисы ИИ, инструменты создателя, поиск/визуальный поиск; 3D-совместимые активы, рынок активов.

- *Инфраструктура*: современные сети, высокоскоростное подключение, вычислительные мощности, графические процессоры, ёмкость хранилища данных, распознавание/восприятие, облачная/периферийная инфраструктура, полупроводники (чипы/процессоры).

В настоящее время существует несколько формализованных методов взаимодействия между физическим миром (физическими объектами) и метавселенной (виртуальными объектами и их представлениями). Данные методы приведены в технической спецификации [294]. Сначала обратим внимание на термины:

- **Физический мир** (утверждён в ISO/IEC 18039): пространственная организация физической реальности множеством физических объектов.

- **Виртуальный мир** (утверждён в ISO/IEC 18039): виртуальная среда, пространственная организация множества виртуальных объектов, потенциально имеющее глобальное влияние.

1. *No-link object metaverse* (NL-MV, с англ. несвязанные объекты метавселенной). Виртуальный мир состоит из виртуальных объектов в метавселенной, которые не связаны напрямую с физическими объектами. Для пользователей виртуальные объекты в метавселенной могут быть концептуально сопоставлены с физическими объектами в мире. Однако в этом типе метавселенных изменение физических объектов не будет отражаться на изменениях в виртуальных объектах метавселенной и наоборот. Простыми словами, будет отсутствовать прямая и обратная связь, метавселенная будет замкнутым (определённого уровня) миром. Например, метавселенная какой-либо видеоигры — это разновидность NL-MV. В такого рода метавселенной пользователи могут нарушать реальность физического мира (физические законы) и создавать уникальный цифровой опыт. В этих метавселенных сходство между физическим миром и виртуальным миром относительно небольшое. Например, аватары летающих птиц в метавселенной игры не будут

отображаться для соответствующих пользователей в физическом мире и наоборот.

2. *One-way (uni-directional) link object metaverse (L1-MV)* (с англ. метавселенная объектов с односторонней (однаправленной) связью (L1-MV)). В этом типе метавселенной цифровой мир состоит из виртуальных объектов в метавселенной, которые напрямую связаны с физическими объектами, но направление связи одностороннее, то есть от объектов в физическом мире к объектам в виртуальном мире. Ярким примером в данном случае является зеркальная метавселенная. При односторонней связи между мирами изменения в физических объектах физического мира будут отражаться в их репликах/аватарах в метавселенной (виртуальном мире). Например, чтобы построить виртуальную реку в виртуальном мире, необходимо разместить на соответствующей реке в физическом мире множество датчиков. В результате для данного вида метавселенных будут активно использовать технологию цифровых двойников. Только фиксируя изменения уровня воды в физической реке онлайн, можно построить виртуальную реку-клон в виртуальном мире. Сходство между физическим миром и виртуальным миром больше, но при этом возможные изменения в реке виртуального мира не отразятся на реке-оригинале в физическом мире.

3. *Two-way (bi-directional) link object metaverse (L2-MV)* (с англ. метавселенная объектов с двусторонней/двунаправленной связью (L2-MV)). В этом виде метавселенных доступны два типа связи: NL-MV и L1-MV. При этом виртуальные объекты метавселенной взаимодействуют с физическими объектами в физическом мире, а все изменения виртуальных объектов отражаются на изменении физического мира и все изменения физических объектов отражаются на виртуальных. Например, в L2-MV построен виртуальный мост, соответствующий мосту через реку в физическом мире. Виртуальный объект (мост) способен получать данные в реальном времени от множества датчиков, установленных на мосту в оригинальном физическом мире, такие как нагрузка на сваи и перекрытия, уровень воды в реке,

структурная целостность покрытия. В это время появляется возможность моделирования различных воздействий на виртуальный мост, таких, как например воздействие снегопада, обледенение конструкций и ураган. Благодаря двунаправленной связи между физическим и виртуальным миром можно обеспечить удалённый мониторинг и управление физическим мостом. В ответ на прогнозируемую нагрузку виртуальный мост может автоматически рассчитать оптимальное время и степень пропуска транспорта (автомобильного, железнодорожного), чтобы минимизировать ущерб от пика нагрузок, что позволит повысить безопасность движения и долговечность конструкции моста. Существует множество иных примеров, которые позволят уменьшить риски физического мира, повысить уровень качества жизни, а также сократить влияние людей на окружающую среду. Подобный тип метавселенных будет больше двух других типов нуждаться в максимальных возможностях сетей ИМТ-2030, включая последующие поколения. Обеспечение устойчивости, безопасности, включая кибер-физическую безопасность, минимальных задержек (для корректности и прозрачности отражения данных между объектами), широкополосный доступ, высокая точность позиционирования - являются минимальными требованиями для обеспечения построения подобного вида метавселенных.

Достижения в области Интернета вещей станут фундаментом для метавселенных типов L1-MV, L2-MV. Отчасти вышеприведённые связи между объектами виртуального и физического мира были представлены ещё в концепции Интернета вещей, утверждённой МСЭ-Т в июне ещё 2012 года в рекомендации Y.2060, позже сменившей индекс на Y.4000. Уже тогда была понятна схема, в которой приводилось отражение ряда физических объектов в их цифровые реплики/клоны. Именно тогда было дано определение “вещи”. Рассмотрим его (примечание: некоторые уточнения в определениях были удалены за ненадобностью в текущем контексте исследования):

Вещь (thing): предмет физического мира (физические вещи) или информационного мира (виртуальные вещи), который может быть идентифицирован и интегрирован в сети связи [1].

Далее в тексте самой рекомендации было дан следующее уточнение: *“Любая физическая вещь может быть представлена в информационном мире с помощью одной или более виртуальных вещей (отображение), однако виртуальная вещь может существовать и без какой бы то ни было соответствующей ей физической вещи”[1]*

Таким образом, между понятием виртуального/физического объекта в метавселенной и “вещью” в концепции Интернета вещей возможно провести прямую связь с уточнениями при ряде сценариев использования метавселенной и её возможностями.

В тоже время, рабочая группа, занимающаяся архитектурными и инфраструктурными вопросами, предложила провести разделение на два типа устройств:

1. *Пользовательские устройства:* оборудование для начальной и конечной точек трафика, принадлежащее и управляемое пользователями (согласно международной рекомендации МСЭ-Т Y.3121) [316]. Таким образом, в метавселенных типа L1-MV и L2-MV пользователи используют такие устройства для взаимодействия и изменения ситуации в метавселенной, взаимодействуя в том числе с объектами и окружением. Примерами пользовательских устройств могут служить: интерфейсы с мозгом человека, устройства AR/VR, микрофоны, устройства распознавания жестов, тактильные устройства, игровые контроллеры, костюмы телеприсутствия и другие. Цель «пользовательских устройств» в метавселенных заключается в том, чтобы пользователи могли взаимодействовать с виртуальным миром. Важной отличительно чертой данного типа устройств является отсутствие соответствующего виртуального объекта в виртуальном мире для его отображения; однако информация, генерируемая этим типом устройств, и

информация, отправленная на этот тип устройства, отражаются в соответствующем аватаре пользователя в метавселенной.

2. Устройства Интернета вещей: применительно к Интернету вещей, и согласно международной рекомендации МСЭ-Т [1] - это часть оборудования с возможностями связи и дополнительными возможностями измерения (датчики/сенсоры), срабатывания (актуаторы), сбора, хранения и обработки данных. В метавселенных типа L1-MV и L2-MV устройства этого типа не управляются пользователями в физическом мире. При этом устройства ИВ могут включать в себя датчики, камеры, сенсоры качества воды, сенсоры температуры и другие устройства ИВ, позволяющие измерять физическую ситуацию в мире к ним также можно отнести роботизированные руки. Устройства ИВ необходимы для получения реальных данных об окружающей среде и реализации виртуального и реального взаимодействия с отображением наборов данных в виде виртуальных объектов. Некоторые из этих типов устройств ИВ могут появляться как объекты в метавселенной. Например, в L2-MV пользователи могут управлять устройствами умного дома в физическом мире через виртуальные объекты или управлять роботами, воздействуя на виртуальные интерфейсы или процессы, протекающие, например, в метавселенной какого-либо производства и завода, где установлены данные роботы.

На рисунке 1.16 графически отражены два типа устройств и их возможное взаимодействие с виртуальными объектами метавселенной [294].

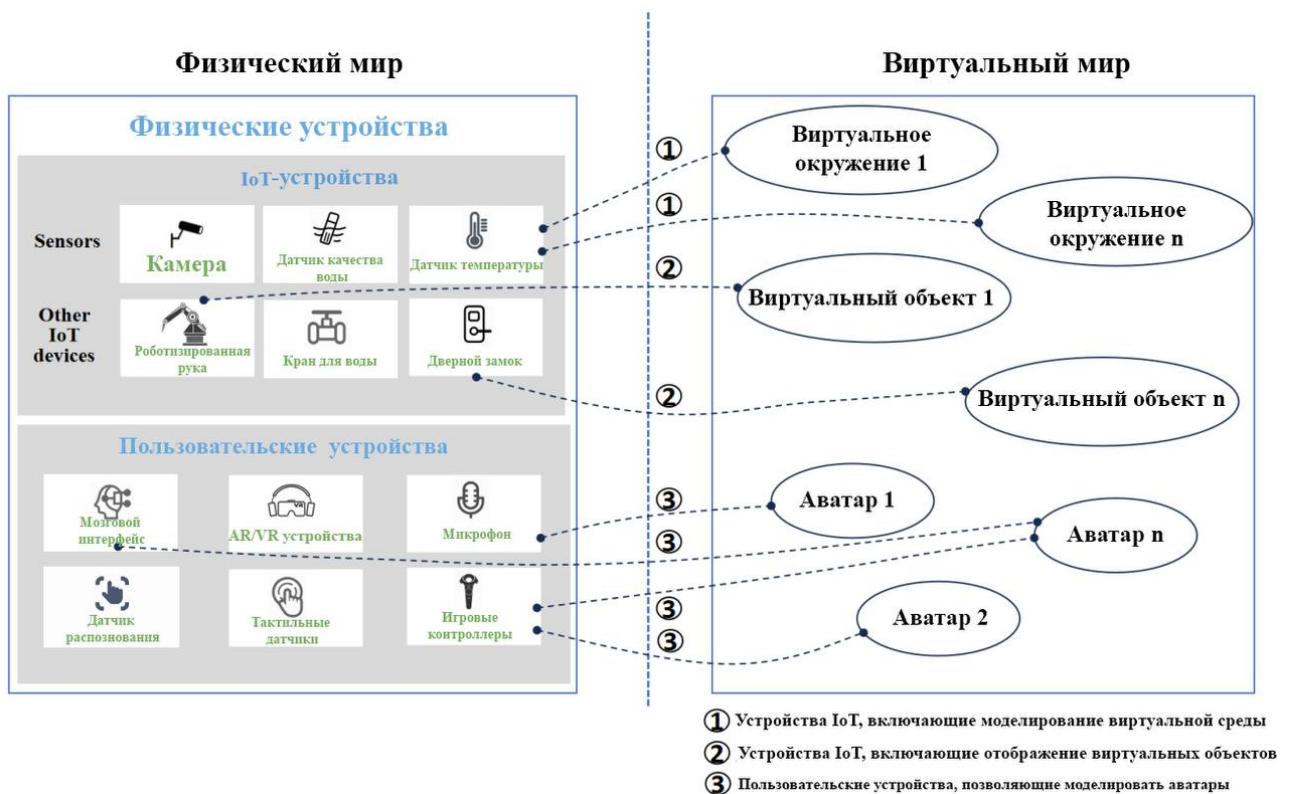


Рисунок 1.17 – Типы устройств взаимодействия с метавселенной [294]

Аватаром при этом является объект, который может использоваться как (визуальное) представление пользователя внутри виртуальных сред, согласно определению, которое утверждено в ISO/IEC 23005-4 [317].

Представление пользователя в метавселенной

Представление пользователя в метавселенной в первую очередь рассматривается в формате аватара. При этом аватар может иметь различные форматы отображения. Например, визуальный формат. Данный вопрос отчасти начал рассматриваться в рабочей группе по метавселенным и представлен в техническом отчёте FGMV-38 [296]. В данном документе приведён следующий термин:

Human-driven 3D digital human (с англ. цифровой 3D-человек, управляемый пользователем). Это цифровой 3D-человек (модель), которым управляет пользователь-человек и который отражает серию действий с помощью технических средств в 3D-режиме.

Техническим средством, например, может служить костюм телеприсутствия. При этом в данном термине был использован другой термин “цифровой человек”, утверждённый в рекомендации МСЭ F.748.15 [318]. Там “цифровой человек” - это компьютерное приложение, объединяющее технологии компьютерной графики, компьютерного зрения, речевых технологий и обработки естественного языка. Его можно использовать для создания цифрового контента и взаимодействия человека с компьютером, чтобы повысить эффективность производства контента и удобство для пользователей.

Фактически технологический подход “Human-driven 3D digital human” представляет собой расширение технологии компьютерной графики в сфере производства медиа контента и видеоигр. В последние годы главный технический прорыв произошёл в области захвата движения человека. С развитием технологий распознавания изображений, включающих в себя алгоритмы распознавания поз человека, а также его выражения лица, инерциальные или оптические устройства захвата движения, которые все ещё являются дорогими продуктами, больше не являются важными инструментами для управления трёхмерным цифровым человеком. Вместо этого обычные камеры [296] в сочетании с современными алгоритмами распознавания, в том числе камеры с измерением глубины картинки, могут обеспечить достаточно точное управление трёхмерным цифровым человеком. Этот подход позволяет существенно снизить существующие барьеры, связанные с созданием виртуального контента. Следовательно, это способствует развитию индустрии создания контента, что является одной из ключевых задач при развитии метавселенных различного типа.

На рисунке 1.18 представлен фреймворк/структура “*Human-driven 3D digital human*”, предложенный в технической спецификации FGMV-38 [296].

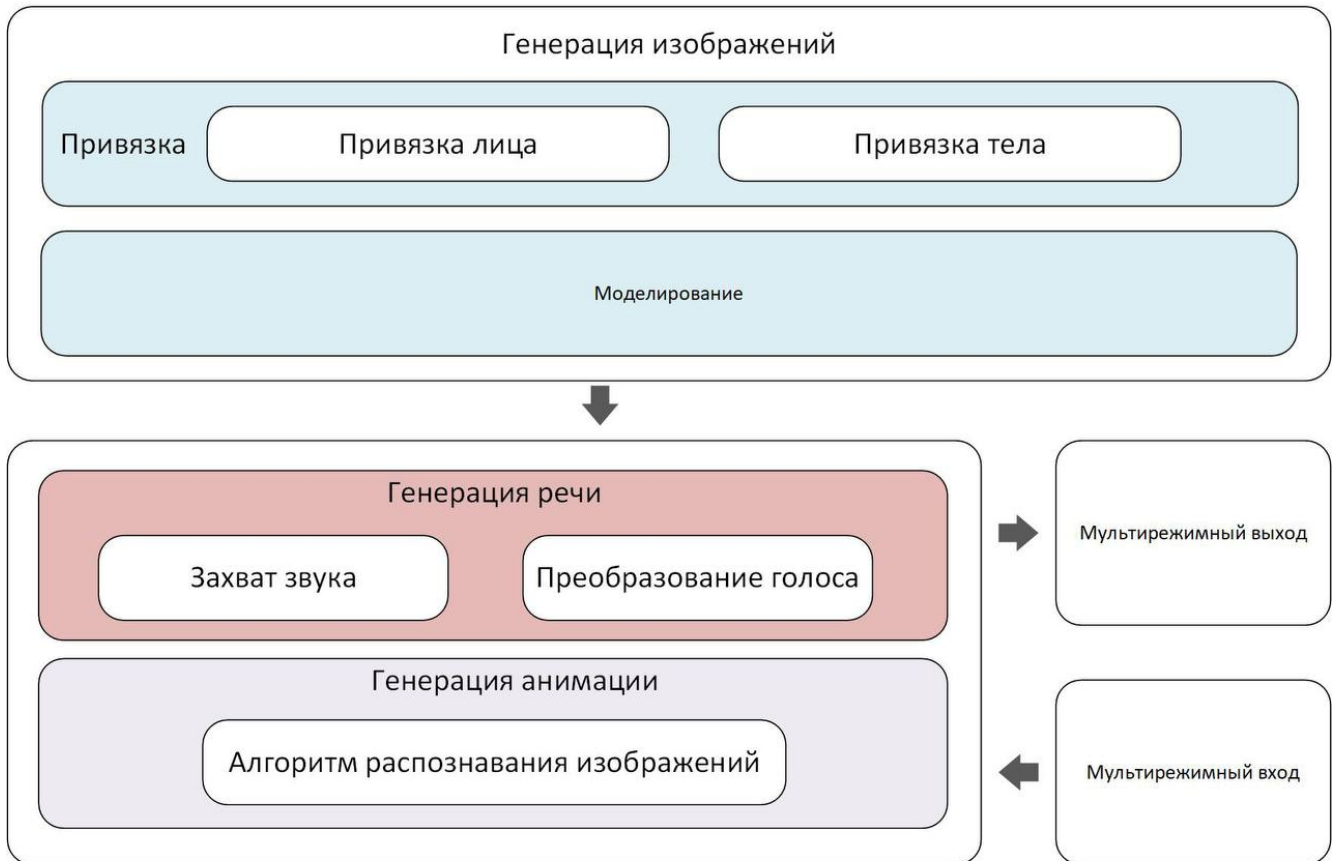


Рисунок 1.18 – Предложенный фреймворк в FGMV-38 [296]

В фреймворке FGMV-38 от фокус-группы МСЭ выделены следующие объекты:

- *Модуль генерации изображений:* Данный модуль генерирует 3D-модель на основе моделирования и привязки к физическому объекту. При моделировании рекомендуется использовать различные методы моделирования для создания трёхмерной модели управляемого человеком трёхмерного цифрового человека. Необходимо связать черты лица (на основе данных с камер, в том числе камер с измерением глубины) и тела 3D-модели (например, с помощью костюма телеприсутствия), тогда можно добиться последующего управления трёхмерным цифровым человеком.
- *Модуль генерации речи.* Данный модуль может генерировать речь трёхмерного цифрового человека, учитывая стандарт МСЭ-Т Р.10 [319]. Один из методов может быть основан на захвате звука человеческого голоса.

Второй же метод заключается в преобразовании записанного звука человека (который можно использовать для клонирования голоса, последующего улучшения речи и преобразования голоса). Для данных задач может подойти также так называемый генеративный искусственный интеллект (ГИИ), который может сыграть одну из важнейших ролей в метавселенной, в частности в вопросах совершенствования возможностей аватаров.

- *Модуль создания анимации.* Данный модуль использует алгоритм распознавания изображений для получения данных о движениях тела и выражениях лица человека из входного видеопотока и применяет их к модели цифрового 3D-человека, который в последствии воспроизводит соответствующие действия человека.
- *Мультимодальный модуль ввода:* Данный модуль реализует функции приёма входных данных с первичной обработкой видео, снятого камерой, а также тактильных данных с костюма телеприсутствия.
- *Модуль мультимодального вывода:* Данный модуль синтезирует анимацию, а также речь и представляет выходные данные пользователю в соответствующем формате, в том числе в виде обратной связи на костюм телеприсутствия (как пример).

Согласно представленным техническим отчётам по метавселенным, особое место в технологическом ландшафте займёт технология генеративного искусственного интеллекта (ГИИ, с англ. GAI - Generative Artificial Intelligence). Данной технологии посвящена техническая спецификация FGMV-22 “Capabilities and requirements of generative artificial intelligence in metaverse applications and services”, которая раскрывает вопросы развития ГИИ и его применения в метавселенных. ГИИ обладает многочисленными возможностями для приложений и сервисов метавселенной. ГИИ может быть применим для создания персонализированных аватаров и сред/окружения, а также и более персонализированных услуг, в том числе на основе поведенческого анализа пользователя (включая данные с журналов жизни, о которых упоминалось ранее). Эти возможности могут обогатить объектами метавселенную и значительно

улучшить взаимодействие с пользователем в метавселенной, делая среду/окружение более иммерсивной. Данная техническая спецификация от фокус группы описывает возможности и требования ГИИ в приложениях и сервисах метавселенной. В этом документе определяются четыре общие возможности ГИИ в приложениях и услугах метавселенной, а также их сценарии. Спецификация также определяет требования ГИИ к приложениям и услугам метавселенной.

ГИИ представляет собой достаточно широкую область исследований и разработок. ГИИ направлен на создание интеллектуальных систем, способных генерировать новый оригинальный контент, такой как изображения, видео, музыка, текст, в том числе диалоги/речь. Эти системы используют алгоритмы машинного обучения для изучения закономерностей и структур в данных, на которых они обучаются, а затем применяют эти знания/паттерны для создания нового контента. При этом контент необязательно может быть идентичен изначальному, на котором обучались модели машинного обучения. В таблице 1.4 перечислены классификация, подклассы и варианты использования технологий ГИИ.

Таблица 1.4 – Классификация ГИИ [301]

ГИИ классификация	Подтип	Сценарии
Генерация текста	генерация текста без обратной связи/интерактива	1. Структурированное написание, такое как создание новостного контента для веб-ресурсов и объектов метавселенной 2. Неструктурированное письмо, такое как создание маркетингового текста, опираясь на данные семантического ядра, характеристики целевой

ГИИ классификация	Подтип	Сценарии
		аудитории и поставленной задачи на целевое действие пользователя
	генерация текста, учитывая интерактивные возможности	Создание интерактивного контента, такого как диалоги. В том числе при взаимодействии с пользователем.
Генерация речи	Синтез текста в речь	Цифровой синтез человеческой речи
	Преобразование голоса	Клонирование голоса на основе изученных данных об исходном голосе, в том числе включая интонацию и эмоциональность в голосе.
	Синтез музыки	Музыкальное сочинение, аранжировка, исполнение и запись
Генерация картинки	Инструменты редактирования изображений	<ol style="list-style-type: none"> 1. Удаление водяных знаков 2. Улучшение разрешения
	Создание изображений	<ol style="list-style-type: none"> 1. Создание творческого изображения, например, рисование, в том числе в соответствующем стиле, например - авангард. 2. Создание функциональных изображений, таких как плакаты

ГИИ классификация	Подтип	Сценарии
		и логотипы.
Генерация видео	Инструменты редактирования видео	1. Удаление конкретных объектов 2. Генерация спецэффектов в видео
	Создание видеоклипов	Обнаружение и синтез специфических фрагментов
	Замена объектов в видео	Редактирование видео с заменой лиц. Например, известная технология “deep fake”
Генерация 3D-моделей	3D цифровое моделирование человека	Работа с детализацией тела человека, в том числе лица, его эмоций и реакций.
	3D-моделирование объектов	Генерация цифровых активов
	3D-моделирование пространства.	Генерация цифровой среды/окружения, в том числе учитывая физику процессов.
Кросс-модальная генерация	Текстовое изображение	Создание креативных изображений на основе текстовых подсказок или речи
	Видео, созданное изображением (на его базе)	Объединение изображений для создания видео. В том числе “оживание” изображений (например, генерация движений, добавление эффекта моргания глазами для фотографий-

ГИИ классификация	Подтип	Сценарии
		портретов)
	Текстовое видео	Синтез видео на основе сценариев
	Текст, созданный изображением/видео	Автоматическое создание субтитров к видео
Генерация стратегии	Генерация стратегии на основе установленных правил	Генерация стратегии для простой задачи
	Генерация стратегии на основе глубокого обучения с подкреплением	Генерация стратегии для сложной проблемы

Рассмотрим предложенную концепцию генерации аватара пользователя с помощью технологий ГИИ (рис. 1.19) [301].



Рисунок 1.19 – Концепция генерации аватара пользователя на основе ГИИ

Предполагается, что пользователи метавселенной могут создавать свои собственные эксклюзивные аватары, предоставляя через пользовательский терминал аудио- и видеоданные, которые могут описывать личные характеристики

внешности и информацию о личных предпочтениях, в том числе данные журналов (записи жизни пользователя). Создание персонализированного аватара: ГИИ генерирует решения путём анализа информации, полученной из предоставленных пользователем аудио- и видеоданных в сочетании с информацией о личных предпочтениях пользователя. ГИИ, в том числе, генерирует графическую модель персонализированного аватара на основе персонализированной информации пользователя. ГИИ также использует модель генерации речи (таблица 1.3) для изучения речевых характеристик конкретного пользователя для создания соответствующего синтезатора для конкретного аватара на основе исследования исходного голоса пользователя. Механизм генерации анимации изучает потенциальную взаимосвязь между голосом пользователя, движениями губ, выражением лица и параметрами позы тела, формируя соответствующие модели и методы движения пользователя. [301] Наконец, с использованием рендеринга в реальном времени сгенерированная модель на базе предварительного моделирования ГИИ представляется пользователю(-ям) через терминал(-ы). На рисунке 1.18 показана концепция возможности создания персонализированного аватара.

Генеративный ИИ также будет способствовать созданию окружающей среды в метавселенной, в том числе роботизированных аватаров (например, птиц в небе метавселенной, которые могут быть не связаны напрямую с физическими объектами как это предполагается в метавселенных тип NL-MV).

Основные проблемы в области развития метавселенных

Концепция метавселенной и мультивселенной продолжает развиваться, все чаще звучат призывы к регулированию, чтобы гарантировать, в первую очередь, безопасность данной технологии, обеспечить равный доступ для всех участников, сформировать конкурентную среду в мета-/мультивселенной. Одна из главных существующих проблем в регуляции метавселенных заключается в том, что ПО метавселенной может работать на нескольких платформах и в разных странах - то есть децентрализовано. В тоже время, большинство стран имеют традиционные

нормативные рамки в области требований к ПО платформ с таким социальными и экономическими возможностями, как метавселенная, и они основаны на географических границах. Ещё одной ключевой областью регулирования является вопрос безопасности и конфиденциальности. Поскольку метавселенная предполагает масштабный сбор и обработку персональных данных, важно установить правила, обеспечивающие безопасность, конфиденциальность пользователей метавселенных. Для преодоления выше приведённых вызовов и была предложена концепция создания мультивселенной, которая позволит не только функционально разделять метавселенные (NL-MV, L1-MV, L2-MV), но и учитывать национальные особенности, государственные требования и многие другие аспекты. Ожидается, что благодаря цифровым рыночным возможностям метавселенная в будущем станет важной частью цифровой экономики. Одной из основных движущих сил экономики метавселенной является создание и продажа виртуальных товаров и услуг [320]. К ним могут относиться виртуальная недвижимость, цифровые активы (например NFT), а также цифровой опыт (модели навыков согласно концепции интернета навыков). Цифровая и криптовалюта также являются важным элементом метавселенной. Многие существующие виртуальные платформы уже имеют свои собственные валюты, которые можно использовать для покупки товаров и услуг внутри платформы (к ним также можно отнести балльные системы, которые активно развивались в последнее время). Экономика метавселенной может взаимодействовать с реальной экономикой и влиять на жизнь и ресурсы во всем мире (физической реальности). Положения о защите потребителей, антимонопольные меры, права интеллектуальной собственности, цифровые валюты, налогообложение и другие аспекты будут необходимы для формирования здоровой и устойчивой экономической конкуренции в метавселенной [320]. В целом, регулирование метавселенной потребует совместного и многостороннего подхода, который позволит развивать инновации и при этом обеспечить безопасность, защищенность, устойчивость, доступность, справедливость и соблюдение этики общества. Немаловажным вопросом на

повестке дня также является обеспечение технологического суверенитета в развитии метавселенных.

Специальная фокус-группа МСЭ-Т по метавселенным в техническом отчёте D.WG1-01 сформулировала следующие проблемы в области развития мульти-/метавселенной:

1. *Совместимость.* На данный момент наблюдается отсутствие функциональной совместимости между различными платформами метавселенных, что является серьёзной проблемой. Необходимо определить объединяющую структуру/фреймворк, а также протоколы для перемещения пользователей между метавселенными, их аватаров и окружения, обеспечить совместимость различных устройств (обоих типов, которые были ранее определены и рассмотрены). Кроме того, должна быть обеспечена совместимость форматов описания объектов и контента, который генерирует ГИИ. Задача совместимости является одной из сложных как с организационной точки зрения, так и с технологической. Для решения данных задач в ряде исследовательских комиссий МСЭ-Т будут созданы специальные вопросы, которые будут изучаться совместно, в том числе и в партнёрстве с внешними стандартизирующими организациями.

Регулирование. Хотя метавселенная или сетевая вселенная — это цифровое пространство, которое объединяет пользователей (людей, роботов и в том числе виртуальные вещи), она также может сделать их уязвимыми, если не будут установлены соответствующие законы и правила в виде международных и локальных стандартов, рекомендаций и спецификаций.

Соревнование. Для развития метавселенных необходимо, чтобы были определены фундаментальные решения, которые обеспечат возможность рыночной конкуренции идей и позволят избежать доминирования нескольких компаний. Данный вызов в области вселенных имеет более глубокий смысл, связанный с суверенностью сетей стран с сохранением соответствующей идентичности и локальных традиций.

Цифровая идентичность. В метавселенной возникают вопросы о том, как отдельные пользователи могут быть однозначно идентифицированы. Например, не

является ли сейчас цифровой объект, которого видит пользователь, всего лишь цифровым двойником. Таким образом, помимо проблем, связанных с этикой, существуют проблемы, связанные с аутентификацией или проверкой личности.

2. *Дезинформация.* Метавселенная формирует новые вызовы, связанные с распространением вредоносной и неистинной информации. В условиях отсутствия регулирования метавселенная может стать опасным инструментом пропаганды, управления общественным мнением и сознанием, способствуя распространению ненависти и предоставит возможности для злоумышленников. Стоит ещё раз отметить, что метавселенная обладает киберфизическими возможностями, то есть возможностями влиять на физические предметы и через них уже на людей, общество и так далее (метавселенные типов L1-MV, L2-MV).

3. *Конфиденциальность.* В метавселенных существует серьезная угроза конфиденциальности, поскольку каждое действие пользователя (например, как вы ходите, думаете, дышите, двигаетесь или смотрите, фиксируется в журналах и системных логах) записывается, хранится и анализируется, в том числе технологиями масштаба ГИИ. Сбор данных в метавселенной является непрерывным, что только способствует повышению уровня риска конфиденциальности пользователей. Поэтому, на настоящем этапе данной концепции сети крайне важно определить уровни доступа и сбора данных, отразить в соответствующих стандартах международных организаций (с обязательным их выполнением) для необходимости их соблюдения данными всеми участниками метавселенных.

4. *Доступ.* Метавселенная может сформировать дополнительные барьеры для многих людей, особенно для пожилых людей, глухих и людей с ограниченным зрением. Люди с нарушениями моторики могут испытывать трудности с навигацией по метавселенной (учитывая функциональные возможности терминалов: алгоритмов компьютерного зрения и костюмов телеприсутствия). Язык и культура также могут стать барьерами для доступа к метавселенной. Наконец, те, у кого нет доступа к современной сети, также рискуют быть исключенными из метавселенной и ее возможностей. Как уже ранее было озвучено,

ождается, что метавселенные плотно войдут в жизнь людей, компаний и государства, что естественным образом будет формировать потребность участия в метавселенных для людей, чтобы обеспечить себя ресурсами в физическом мире. Необходимо разрешить возможные барьеры в функциональной совместимости оборудования/терминалов, алгоритмах и методах доступа этих групп пользователей к метавселенным, поскольку это может привести к новому цифровому неравенству и новому цифровому разрыву. Данной проблеме посвящена отдельная глобальная цель в Целях Устойчивого Развития (ЦУР), принятых Генеральной Ассамблеей ООН, о которых было сказано в начале первой Главы диссертации.

5. *Устойчивость*. Несмотря на то, что отчасти метавселенная виртуальна, она влияет на окружающую среду и физический мир. Метавселенная потребляет гораздо больше энергии, чем предыдущие технологии сетей и услуг. Метавселенные также увеличат потребности в центрах обработки данных и в системах распределенных вычислений. В этом направлении на данный момент в сетях 2030 рассматривается концепция Green ICT (Зеленые инфокоммуникационные технологии), где основной целью является повышение эффективности используемых энергоресурсов на удельный объем вычислительного и сетевого ресурса сети и центров обработки данных. Одной из технологий, позволяющих повысить эффективность существующих и будущих ресурсов, посвящена данная диссертация - технологии динамических туманных вычислений.

6. *Киберфизическая и социальная безопасность*. Данной проблеме необходимо уделить особое внимание, учитывая опыт внедрения платформ социальных сетей на сегодняшний день. Как уже ранее было отмечено, метавселенная обладает возможностью воздействия на физический мир, его устойчивость и безопасность, что и заставляет обратить особое внимание на данную проблему.

7. *Защита интеллектуальной собственности*. В метавселенной пользователь может создавать новые формы интеллектуальной собственности,

например, такие как: цифровые активы, невзаимозаменяемые токены (NFT), виртуальные товары, опыт и многие другие. Важно обеспечить правовую и технологическую защиту этих новых форм интеллектуальной собственности и предоставить возможность их владельцам получать от них прибыль в виде цифровой и криптовалюты.

Существуют и другие проблемы, которые могут быть раскрыты во множестве исследований учёными различных областей знания: социология, политология, экономика, физика и др. Мульти-/метавселенная действительно является новой эрой сети и услуг, которая переводит роль ИКТ технологий из позиции “обслуживания” реальных секторов экономики в другую позицию - экосистемы быта человека (возможно, в т.ч. личности), в которую входит и работа, и личная жизнь, и отдых, и другие сферы жизни.

Международная стандартизация

Регулирование и стандартизация является ключевым шагом в реализации метавселенных. Уже более 55 документов с 2022 года по июнь 2024 года было разработано фокус-группой МСЭ, имеющих статус технических отчётов, технических спецификаций. Один из документов представляет собой дорожную карту стандартизации мульти-/метавселенных (рис. 1.20).

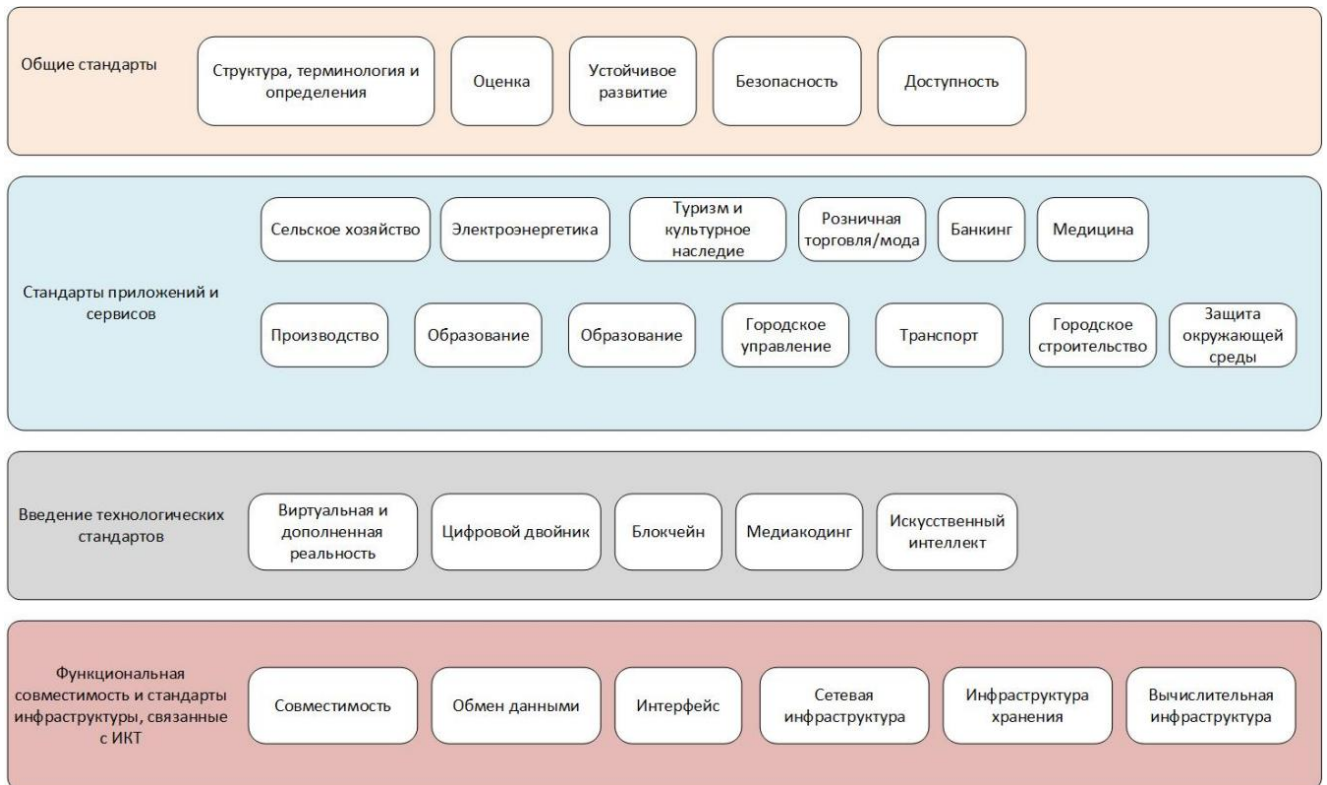


Рисунок 1.20 – Структура будущих стандартов МСЭ по метавселенной

Стандарты в области мульти-/метавселенной можно в целом разделить на четыре категории (рис. 1.20):

1. Общие стандарты;
2. Стандарты приложений и услуг;
3. Прикладные технологии;
4. Функциональная совместимость и стандарты ИКТ инфраструктуры.

Соответствующая дорожная карту стандартизации представлена на рисунке 1.21.

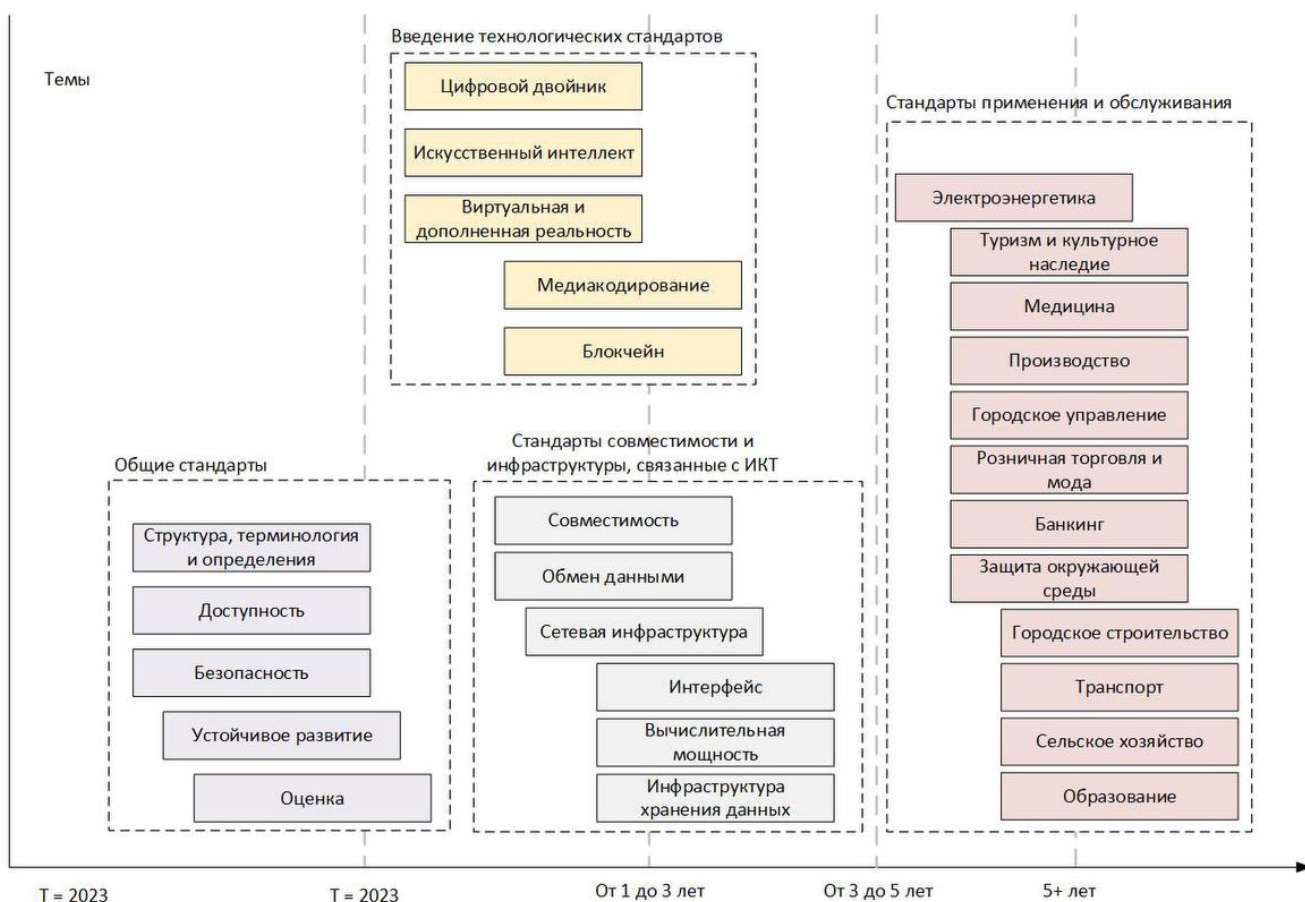


Рисунок 1.21 – Дорожная карта стандартизации метавселенной

Можно заметить (рис.1.21), что некоторые виды деятельности уже начались в 2023 году и продолжаются в 2024 году. Такие стандарты, как структура/фреймворк, терминология и определения, разрабатываются фокус-группой МСЭ по метавселенной (FG-MV). Некоторые работы по престандартизации, такие как технические спецификации и технические отчеты, уже завершены по ряду тем, которые приводились выше в Главе 1. Ожидается, что в рамках следующего исследовательского периода начнётся официальная работа по стандартизации, где можно было учесть результаты стадии престандартизации - существующие результаты FG-MV.

Метавселенная/мультивселенная ещё только набирает обороты, уже существуют другие организации и инициативы, кроме фокус-группы при Международном Союзе Электросвязи. Над разработкой стандартов и рекомендаций для метавселенной работают следующие организации:

1. Всемирный экономический форум (ВЭФ) выступил с инициативой по определению и созданию метавселенной для разработки и обмена действенными стратегиями создания и управления в области метавселенных;

2. Форум стандартов Metaverse был создан как площадка для сотрудничества между организациями и компаниями для содействия разработке стандартов в области метавселенной, в том числе с поддержкой открытого ПО.

Кроме того, работы по метавселенным проводятся в следующих стандартизирующих организациях:

1. Институт инженеров по электротехнике и электронике (IEEE) учредил комитет по стандартам Metaverse (CTS/MSC), Компьютерное общество SAB SC Metaverse SG (MSG) и т. д.

2. Международная организация по стандартизации (ISO) и Международная Электротехническая комиссия (IEC) также работала в этой области - в объединённой группе по оценке стандартизации (JSEG) метавселенной.

3. Консорциум Всемирной паутины (W3C) учредил группу сообщества совместимости метавселенной (OMI).

Ландшафт стандартизации метавселенной все ещё формируется и будет иметь важное значение для всех участников рынка. МСЭ-Т также призывает работать вместе над разработкой открытых, прозрачных и совместимых стандартов, которые позволят сформировать устойчивую, безопасную мультивселенную.

1.6. Выводы по Главе 1

1. В данной главе был проведён аналитический обзор перспективных сетей ИМТ-2030 и перспективных услуг телеприсутствия. В первой части главы представлен также анализ перехода от сетей ИМТ-2020 к сетям ИМТ-2030, учитывая положения национальной стратегии развития сетей связи Российской Федерации и принятых международных стандартов МСЭ. Было определено, что сети ИМТ-2030 будут представлять собой объединённую/интегрированную сеть сетей и включать в себя наземный, морской, воздушный и орбитальный сегмент.

2. В данной главе были также определены проблемы развития перспективных сетей ИМТ-2030 и услуг телеприсутствия, учитывая возросшие потребности в области качества обслуживания и сложности, гетерогенность сетей и устройств. В п.1.2 приводится сравнительный анализ характеристик сетей с опорой на принятые стандарты ИМТ-2030 и ИМТ-2020. Представлены сценарии услуг телеприсутствия.

3. В главе 1 определено, что одной из существующих тенденций в области развития услуг и сетей является децентрализация сетей и систем вычислений. В пункте 1.3. приводится детальный анализ архитектур федеративных многоуровневых граничных вычислений, а также достаточно детальный анализ архитектуры и предыстории развития туманных вычислений. Представлены архитектурные решения для туманных вычислений, определены задачи в данной области исследований. Определена также необходимость интеграции туманных вычислений в сети связи, что позволит ускорить и приблизить реализацию услуг телеприсутствия.

4. В данной главе также приводится анализ одного из важнейших направлений развития современных и перспективных сетей связи, а именно глубокой интеграция инструментов искусственного интеллекта в системы управления сетевыми и вычислительными ресурсами. В пункте 1.4 представлен анализ архитектуры автономных сетей с опорой на существующий пакет рекомендаций Международного Союза Электросвязи. Определено, что для достижения требований сетей ИМТ-2020 и ИМТ-2030 необходимо, чтобы системы управления сетевыми и вычислительными ресурсами опирались на данные и знания, получаемые с помощью глубоко интегрированных процессов и моделей машинного обучения. Сети связи должны достичь определённого уровня интеллектуальной автономности с точки зрения принятия решений, в первую очередь, для опережающих управленческих действий.

5. В главе 1 также приводится достаточно глубокий анализ следующей эры сети Интернет. Представлен анализ международных отчётов и спецификаций по мульти-/метавселенной. Определена проблематика развития метавселенных,

представлены архитектурные концепции, а также ряд потенциальных технологий (такие как генеративный искусственный интеллект, аватары и т.д.), применимых в метавселенных. Определены направления исследований и проблемы, которые стоят перед международным сообществом учёных и инженеров. Представлена дорожная карта стандартизации в области метавселенных.

ГЛАВА 2. НОВАЯ АРХИТЕКТУРА СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

2.1. Введение

Уже неоднократно отмечалось, что развитие сети и услуг после появления в своё время концепции Интернета Вещей пошло по революционному пути. Появились отдельные направления услуг, такие как URLLC, в который можно отнести: тактильный интернет, интернет навыков и многое другое. Каждое из направлений услуг сформировали свои, достаточно высокие требования к сетям связи. Данные направления услуг, а также типы сетей как всепроникающие сенсорные сети привнесли новые модели и типы трафика. Возникла необходимость в разработке новых подходов как к методам обеспечения качества обслуживания в сетях связи для подобного вида услуг, так и новых подходах к построению сетей.

Как в первой главе было отмечено, в текущий момент наметился тренд перехода к интегрированным сетям STIN, или как упоминается данный тип сетей в стратегии развития сетей связи Российской Федерации - гибридным сетям. Данный тип сетей в первую очередь направлен на повышение устойчивости сетей и преодоление цифровых, социальных и иных разрывов, в том числе которые приведены в целях устойчивого развития ООН.

Немаловажным для проводимых исследований в области перспективных сетей является новый комплекс ожидаемых услуг. Услуги телеприсутствия направлены на обеспечение более глубокого погружения пользователя, обеспечение нового иммерсивного опыта. Голографический тип коммуникаций, как одного из новшеств, выдвигает достаточно высокие требования к полосе пропускания, вычислительным характеристикам конечных терминалов. Реализация данного типа услуг предполагает в том числе передачу разнородного вида трафика на пользовательский терминал, так как НТС должен предоставить пользователю возможность погрузиться в ту среду, в которой находится его собеседник. Передача тактильных ощущений, голографического изображения, запахов и многое другое является сложной, нетривиальной задачей.

Для решения поставленных задач, в своё время ещё при развитии концепции сетей 5G/ИМТ-2020, был предложен вектор на декомпозицию сетей связи и систем вычислений. После была выявлена естественная потребность в их интеграции/конвергенции. Распределенные вычисления плотно вошли в существующую архитектуру сетей связи, а также ожидается более глубокая их интеграция как в сетях 5G/ИМТ-2020, так и в сетях ИМТ-2030.

Научной задачей, исследуемой и решаемой в второй главе диссертации, является разработка новой архитектуры сети, в которой все услуги связи предоставляются на основе туманных вычислений, а для динамического распределения ресурсов сети образуются туманности как результат её кластеризации.

Основной вклад в данной главе заключается в:

Предложенной новой архитектуре сетей для предоставления услуг связи, в том числе услуг телеприсутствия, на основе туманных вычислений, образующих туманности для динамического распределения ресурсов сети, что позволяет уменьшить трафик, поступающий в ядро сети до двух раз.

Глава организована следующим образом:

- в разделе (2) приводится аналитическая о проблеме архитектуры будущих сетей в части обеспечения их автономности, интегрированности и при этом декомпозиции систем. Приведены задачи, которые необходимо разрешить для внедрения Туманных вычислений в архитектуру сетей связи, в том числе для обеспечения предоставления услуг телеприсутствия;

- в разделе (3) представлена разработанная структура для динамических туманных вычислений;

- в разделе (4) представлен результат моделирования оценки эффективности от внедрения в сети связи туманных вычислений;

2.2. Архитектурные вызовы сетей и услуг

Отчасти данный вопрос был раскрыт в первой главе данной диссертации, рассмотрим некоторые факты, которые можно выделить на основе

представленного анализа. А также рассмотрим некоторые из положений в существующих исследованиях опубликованных в международных журналах.

В пункте 1 первой главы был представлен достаточно глубокий анализ концепции развития сетей Российской Федерации (распоряжение Правительства РФ от 24 ноября 2023 года №3339-р) до 2035 года. Там отмечается, что информационные и телекоммуникационные технологии являются инфраструктурным, важным компонентом государства. На данный момент развития технологий, сети связи реализуют несколько ролей:

- обслуживающая роль для всех других секторов экономики, а именно: обеспечение эффективного производства, образования (новые кадры и поддержки существующих),

- обеспечение реализации государственных задач, в том числе сохранения государственности и суверенитета страны через обеспечение лидерства в перспективных технологиях и их интеграции во многие бизнес-процессы, в том числе в процессы предоставления государственных услуг. Реализацию данной роли можно увидеть в таких проектах, как: цифровое правительство, умный и безопасный город, экономика данных (реинкарнация программы “цифровая экономика”).

Реализация выше приведённых ролей немислима без наличия технологически передовых, устойчивых, масштабируемых, выполняющих требования перспективных услуг, сетей связи.

В основе любой сети лежит задача построения ее архитектуры. Через архитектуру сетей проявляются и их особенности. Например, самоорганизующиеся сенсорные сети благодаря ячеистой архитектуре могут решать такие задачи, которые древовидные архитектуры сети не смогли бы их решить на том же уровне эффективности.

В тоже время, как было отмечено в п.2.1, тренд конвергенции сетей наземного, морского, воздушного и низкоорбитального базирования сформировал новые возможности. Например, появилась возможность разрешить проблему доступности к сети удалённых районов и поселений, обеспечить их тем же набором

услуг, что и в городах с развитой сетевой инфраструктурой. Существующие проблемы дороговизны прокладки магистральных кабелей для удалённых и труднодоступных регионов и поселений предлагается решить на основе вновь сформировавшихся возможностей архитектуры интегрированных/гибридных сетей STIN.

Таким образом, на основе анализа в п.1.1 настоящей диссертации, можно выделить следующие вызовы в области архитектур перспективных сетей связи:

1. необходимость комплексного развития всех секторов экономики, для чего необходимо обеспечить потребности клиентов сетей в минимизации задержек с гарантией обеспечения требований в ряде сценариев (масштабная реализация URLLC, eMB, mMTC) до 1 миллисекунды. При этом обеспечить широкополосный доступ 1-10 Гбит/с. Такие требования выдвинуты в рамках следующих сценариях: умный город и системы городской и дорожной безопасности, сервисы на базе технологий машинного зрения, как сервисы обеспечения безопасной и комфортной среды; автоматизация производственных и бизнес процессов (потребность у инструментов программ “экономики данных”, “цифрового правительства”, “роботизации производства”). В данной части ожидается реализация концепции Индустрия 4.0/4.0+ на базе индустриального интернета вещей, который приводится как один из сценариев сети ИМТ-2030. В том числе разработка и реализация инфраструктуры беспилотного транспорта (наземного), в том числе развитие роевых гражданских технологий БПЛА (в т.ч. БПЛА как узлы STIN); В перспективе необходимо обеспечить возможность телехирургии поддержкой технологий дополненной реальности и голографических коммуникаций;
2. Смещение вычислительных мощностей к границе сети, о чем также упоминается в стратегии развития сети РФ. Декомпозиция и децентрализации систем вычислений, с распределением в сети и на границе сети позволят снизить нагрузку на ядро сети и станут естественным архитектурным решением в области распределенных

интегрированных/гибридных 3D-сетей. Данный переход к децентрализации виртуализации модулей систем управления сетями, размещение систем вычислений на границе сети является решением, которое в том числе позволит повысить уровень интеллектуализации сетей, обеспечит возможность предоставления требований услуг URLLC и HURLLC, что критически необходимо для ряда сценариев, которые упомянуты выше в п.1.

3. Тренд виртуализации сетей также формирует свои задачи, решение которых позволят достичь автономности сетей - сетей связи, которые управляются на основе комплекса технологий искусственного интеллекта. Архитектура MANO, утверждённая ETSI получила положительный отклик у всех участников рынка. Уже на данный момент виртуализация сетевых функций заложены в требования к архитектуре, процессам и функциям ядра сети 5G, а также сетей IMT-2030. Виртуализация сетевых функций позволит гибко управлять сетями, а также распределять ресурсы в сети. С точки зрения существующего вызова в области виртуализации сетевых функций, можно выделить поиск решения таких задач, как: разработка более эффективных платформ виртуализации, стандартизация виртуальных сетевых функций и их интерфейсов, стремление к “атомарности” данных функций (позволит более эффективно использовать и распределять сетевые и вычислительные ресурсы), открытость интерфейсов базовых сетевых функций (переход к OpenSource), стандартизация форматов данных о виртуальных сущностях для автоматизации развёртывания данных функций на различных платформах, интеграция MANO в такие новые структуры как федеративные многоуровневые облачные вычисления, а также сети туманных вычисления, и другие.

4. Одним из важнейших вызовов в сетях связи и ее архитектурных аспектах является непосредственно реализация ИИ в сети. При этом архитектура ИИ, как уже приводилось, автономных сетей, должна учитывать требования требование инвариантности по отношению к поколению сетей. На данный момент это 5G/IMT-2020 и IMT-2030. Развитые модели машинного

обучения в единой системе автономной сети позволят разрешить комплекс задач, в том числе относящихся к обеспечению эффективного использования ресурсов сети и систем вычислений, обеспечение эффективного распределения задач в многоуровневых облачных вычислениях, в том числе в туманных вычислениях, обеспечение безопасности и устойчивости сети на основе анализа поведения потоков в сети, а также пользователей.

5. Тренд на открытость систем и их интерфейсов (openSource) является с одной стороны вызовом для рынка (изменение устоявшейся модели), с другой стороны инструментом для ускорения решения других задач, например как унификация интерфейсов, упрощение схем взаимодействия систем и т.д. Программное обеспечение современных систем основано на принципе модульности и платформенности. При этом модули представлены в виде микросервисов (изолированного программного обеспечения, выполняющего одну или несколько простых, с точки зрения всей системы, функции. Данный принцип лежит и в ПО систем управления сетями связи, особенно это важно для автономных сетей с ИИ. В основе всего лежит платформа и ее открытые интерфейсы. Принцип платформенности позволяет, при ее наличии, разрабатывать конечные сервисы в краткие сроки, что в итоге сокращает затраты на разработку новых функций продукта (сети, платформ услуг). В качестве примера можно привести программно-конфигурируемые сети, которые благодаря открытости своей архитектуры и интерфейсов получили быстрое развитие и рекомендацию о внедрении в сети 5G/IMT-2020, согласно стандарту МСЭ-Т М.2083-0 [10].

6. Одним из существующих вызовов в современных и перспективных сетях связи является рост потребности в вычислительных ресурсах, что сказывается на росте потребляемой электро энергии. В стратегии развития сетей РФ данному вопросу уделяется отдельный пункт и приводятся статистика экстенсивного роста строящихся ЦОД и лавинного роста потребляемой электро энергии. И естественно, рост спроса на

дорогостоящее серверное и сетевое оборудование. Данная проблема также отмечена во множестве технических отчётов МСЭ, а также в выделена в качестве отдельной цели устойчивого развития ООН. Для разрешения данного вызова требуется следовать системному подходу. Не только использование так называемых эко-технологий при строительстве ЦОД позволят снизить воздействие на природу, но и поиск нестандартных и нетривиальных решений. Одним из таких решений является вышеупомянутая децентрализация вычислений, в том числе с переходом на границу сетей и использование массы устройств, ресурсы которых не полностью задействованы, в том числе у пользователей - технология туманных вычислений.

7. Существует также потребность в технологическом обновлении сетей, с отключением поддержки сетей 2G, и где это возможно - 3G. Развитие технологий и решений в сетях на базе открытых решений, для обеспечения технологического суверенитета, а также обеспечения устойчивости, гибкости сети. С учётом возможностей сетей пятого поколения, обновление на последующее возможно реализовывать с помощью совершенствования программного обеспечения. Таким образом, технологии программно-конфигурируемого радио, программно-конфигурируемых сетей и виртуализации сетевых функций могут обеспечить данную возможность.

К вызовам в области архитектур существующих и перспективных сетей связи ИМТ-2030 также можно отнести их глубокую интеграцию/конвергенцию с системами предоставления услуг. Поэтому архитектуры сетей будущего должны обеспечить такую возможность, а именно учесть особенности услуг Голографического типа коммуникаций, тактильный интернет.

В тоже время, как это было отмечено в первой главе данной диссертации, текущее развитие услуг, технологий обеспечило скорый приход новой эры сети - мульти-/метавселенной. Данному вопросу было уделено особое внимание в п.1.5, рассмотрены архитектурные аспекты, а также требования и функциональные особенности. В том числе приведены роли в мультивселенных, проведён анализ их

типов, что также необходимо будет учесть на пути разработки и внедрения интегрированных сетей.

Рассматривая архитектурные вызовы, необходимо также напомнить и о тех требованиях, которые предъявлены в МСЭ. Эти принципы/требования должны быть соблюдены при разработке и развитии архитектуры сети 2030 и её технологий:

1. Простота;
2. Программируемость сетей и их ресурсов;
3. Обратная совместимость;
4. Гетерогенность;
5. Сетевой слайсинг;
6. Однозначное наименование сетевых функций, а также сервисов и служб систем управления.
7. Внутренняя анонимность и поддержка безопасности для всех сетевых операций.
8. Устойчивость инфраструктуры.

Более детально выше приведённые принципы были представлены в первой главе диссертации в п.1.1. и п.1.2.

В результате проведённого анализа (в первой главе), кратко сформулированных архитектурных вызовов выше (в п.2.2), а также возросшие требования сетей ИМТ-2030, на данный момент актуальной научно-исследовательской проблемой является разработка комплекса моделей и методов для распределения ресурсов на основе туманных вычислений и миграции микросервисов высоконагруженного программного обеспечения в условиях предоставления услуг телеприсутствия на сетях связи пятого и шестого поколений.

В последнее время ведутся активные исследования и разработки в области концепции туманных вычислений, которые представлены как следующий уровень декомпозиции в области систем распределенных вычислений МЕС. Аспекту появления данной технологии был посвящён пункт 1.3, с уточнением

архитектурной компоненты и статусу существующих разработок в области стандартизации.

Интеграция туманных вычислений в сети связи может в корне изменить устоявшиеся всем известные модели “оператор-абонент”. В условиях гетерогенности технологий сети и услуг, ожидается, что пользовательский трафик может быть маршрутизируемым в различных плоскостях, и при этом с соблюдением требований качества обслуживания QoS. Данный факт прослеживается во множестве научных работ по интегрированным сетям STIN (в научной литературе они ещё называются как SAGSIN - Space Air Ground Sea Integrated Networks), сформировал огромный пласт задач, которые, если учесть сложность их постановки и условий решения, можно назвать вызовами [321].

2.3. Новая архитектура и структура туманных вычислений

В условиях интегрированных сетей (от моря и земли до космоса) и предложенных сценариев сети и услуг ИМТ-2030 международным союзом электросвязи необходимо, чтобы новые разработки учитывали архитектурные особенности. А также одну из определённых физических особенностей перспективной сети – динамичность ряда сегментов сети, то есть их способность перемещаться в пространстве.

Если взять во внимание опубликованные исследования концепции многоуровневых облачных вычислений, то можно найти немало работ, где предлагается размещение узлов данной архитектуры на различного рода динамических платформах, которые могут перемещаться в пространстве. Например, использование беспилотных летательных аппаратов или привязных шаров, в том числе привязных БПЛА. В таких исследованиях часто решаются различные технические задачи обеспечения эффективного распределения вычислительных и сетевых ресурсов, в том числе распределения самих узлов в сети в зависимости от сценария их применения (например, беспилотный транспорт), и потенциального спроса на услуги.

Отмечено, что в течение последних 3х-4х лет в международных научных публикациях своё место находит идея использования устройств с малыми объемами вычислительных и сетевых ресурсов в качестве вычислительных узлов распределенного кластера в сети [321]. Данная технология распределенных вычислений названа в честь такого физического явления, как туман. Действительно, множество устройств (пользовательские терминалы, устройства интернета вещей, граничные сетевые устройства и другие) при выделении малого объёма ресурсов могут быть представлены в архитектуре сети как скопление большого количества вычислительных малых узлов или вычислительных «капель тумана» [321]. Учитывая существующую характеристику сверхплотности сетей ИМТ-2030 и их интегрированность (3D-сеть), такой «объединённый туман» (Fog) будет представлять собой достаточно массивный вычислительный кластер, который может быть интегрирован в сеть связи общего пользования и способствовать ускорению сокращения цифровых разрывов [322].

Общая идея интегрированной сети с морским, наземным, воздушным и космическим сегментами представлена на рисунке 2.1, который был усовершенствован относительно рисунка 1.4.

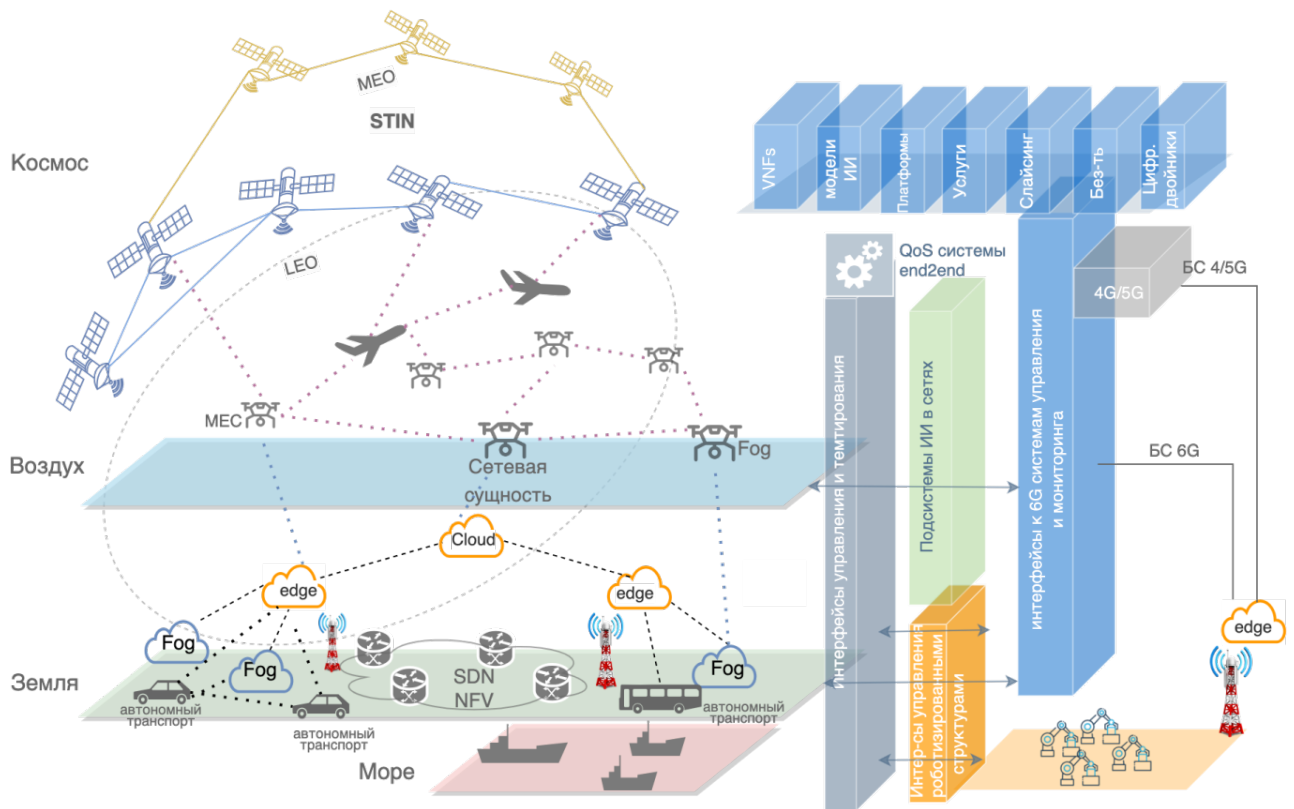


Рисунок 2.1 – Архитектура сети с поддержкой туманных вычислений

На рисунке 2.1 элементы туманных вычислений представлены в различных практических сценариях реализации. Например, устройство туманных вычислений может быть представлено в виде пользовательского устройства, а также транспорта (в том числе автономного автомобиля, автомобиля и т.д.) и также элемента БПЛА, по сравнению с рисунком 1.4, где БПЛА [364] реализуют только сетевые функции. При этом, как это было отмечено ранее в п.1.3 настоящей диссертации, туманные вычисления принято делить на статические и динамические. Динамические туманные вычисления представляют большой научный интерес, так как обладают колоссальным объёмом научных задач. А также динамические туманные вычисления способствуют тому синергетическому эффекту, который может быть получен при их интеграции в общую сеть связи и федеративные распределенные граничные вычисления (Federated MEC). На рисунке 2.1 также отображены другие функциональные модули, которые соответствуют архитектурным схемам с системами мониторинга и управления сетей ИМТ-2020. К примеру, подсистемы VNFS (Virtual Network Functions, с англ. виртуальные сетевые функции) и

слайсинга (разделение одной физической сотовой сети на несколько логических). При этом VNFs, слайсинг, оркестраторы, брокеры систем (например MEC), должны стать более распространёнными в интегрированных сетях ИМТ-2030 с гетерогенной архитектурой, множеством технологиями и ожидаемыми услугами телеприсутствия. На рисунке также отражены подсистемы сквозного контроля QoS, включая методы In-Time, On-Time, Coordinative, которые определены в архитектурном документе МСЭ фокус группой по сетям 2030. Данные новые подходы сквозного автоматического контроля вкпе с интегрированными процессами, моделями и конвейером машинного обучения автономных сетей позволят должным образом сделать сеть более интеллектуальной, способной действовать на опережение, как с точки зрения нагрузок, так и с точки зрения безопасности сети и услуг.

Отдельной задачей исследований и разработок в области туманных вычислений является изучение форм тумана с учетом динамичности Fog-устройств. Так, в статье [321] предложен фреймворк динамических туманных вычислений, который учитывает ряд параметров в решении задачи определения устройства туманных вычислений для последующей живой миграции контейнера микросервиса. В статье [322] было предложено определять кластеры (или формы, которые образуют устройства туманных вычислений) для соответствующего класса или группы услуг, основываясь на ограниченном наборе требований, в основе составляющих задержки.

Так, в качестве устройств туманных вычислений могут выступать и сетевые устройства последней мили (классические статические туманные вычисления), и пользовательские устройства (смартфоны, планшеты, компьютеры и др.), а также устройства интернета вещей. Здесь же наблюдается естественная интеграция метода сетевого слайсинга, что может привести к большому синергетическому эффекту и ускорить внедрение инновационных услуг ИМТ-2030. При этом объединение данных кластеров может представлять собой иную форму/структуру, к примеру для реализации комплекса услуг [321] Объединение кластеров туманных

вычислений может быть представлено в виде следующей предлагаемой формы – вычислительной туманности.

На рисунке 2.2 представлен концепт, где определены возможные формы туманных вычислений: кластера туманных вычислений и образующиеся “туманности”.

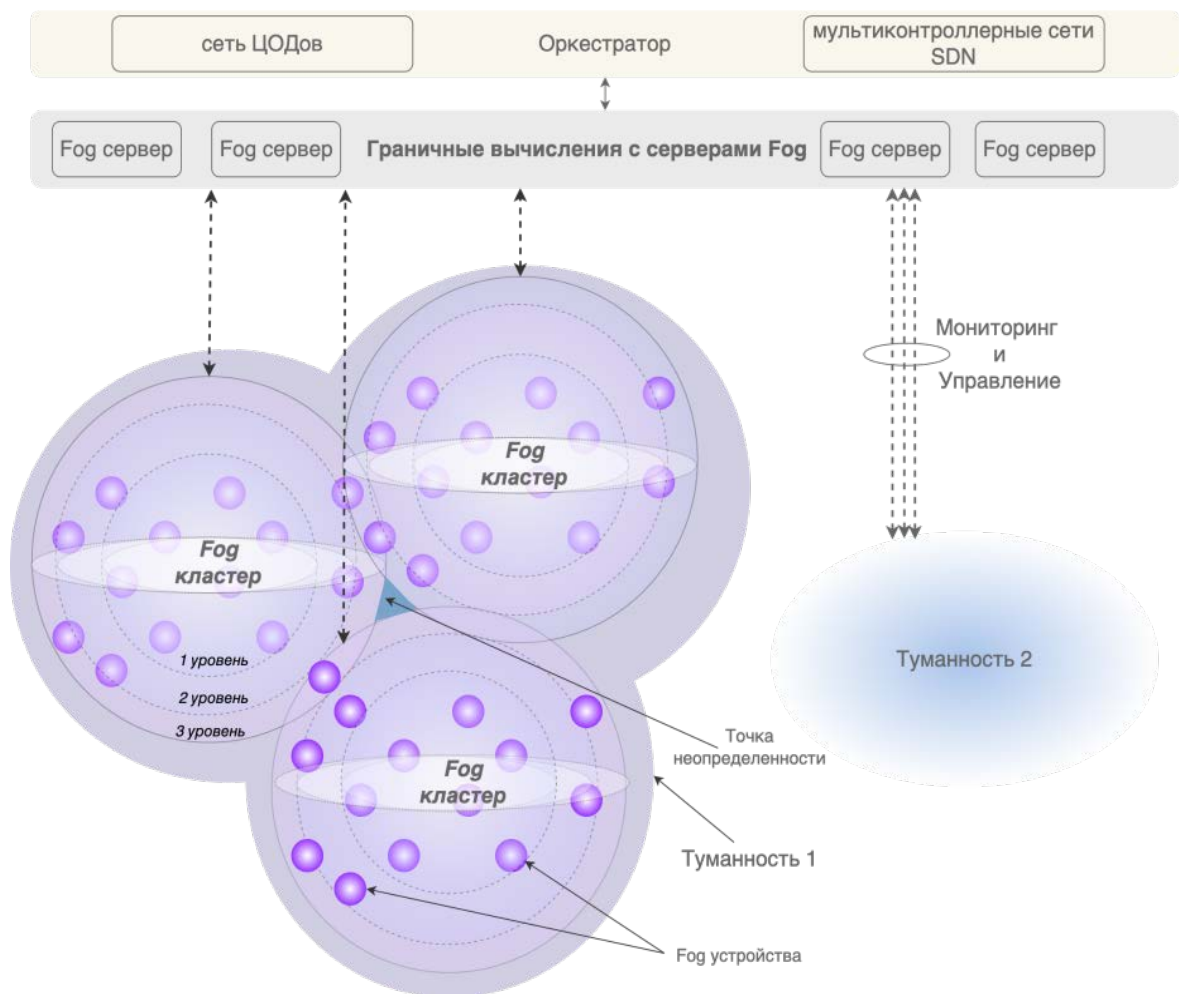


Рисунок 2.2 – Формы туманных вычислений

Каждый кластер туманных вычислений может быть определён согласно критерию динамичности устройств, входящих в него (скорость и вектор движения), а также другим возможным критериям. Например, критериям времени выполнения вычислительной задачи на устройстве Туманных вычислений.

Таким образом, данная кластеризация позволяет сформировать кластера в туманности так, чтобы выполнялась полнота типовых вычислительных функций

для реализации той или иной услуги. Очень важным элементом здесь также можно выделить именно “ типовые вычислительные функции”, которые могут быть представлены набором типовых контейнеров с достаточно атомарными функциями, допустим, “ функция сложения по модулю 2”, или “ функция сортировки массива” и так далее. Более детальный анализ по данному тезису будет представлен в главе 4, когда будет рассмотрена платформа FaaS, как решение для более эффективного использования ресурсов туманных вычислений.

Стоит отметить, что контроль за устройствами туманных вычислений остаётся за служебными серверами на сервере Fog-сервере/оркестраторе, которые могут быть расположены на системах граничных вычислениях MEC и отвечают за задачи мониторинга и управления, в том числе за распределение задач и/или контейнеров микросервисов в соответствующих доменах туманных вычислений.

На рисунке 2.2 также приведены другие элементы, участвующие в предоставлении услуг на базе представленной архитектуры: оркестратор с сетью центров обработки данных и мультиконтроллерной программно-конфигурируемой сетью SDN. Это позволяет реализовывать методы и модели автономных сетей связи, разработка и стандартизация которых уже несколько лет идёт в 13 ИК МСЭ-Т и других смежных комиссиях (анализ был представлен в первой главе диссертации). Оркестратор туманных вычислений также взаимодействует с системой динамической адаптации (представлена на рисунке 1.2), а также сетевым E2E-оркестратором (рис. 1.2)

Можно сделать вывод, что туманные вычисления сформировали отдельное направление исследований в области реализации перспективных сетевых технологий в части предоставления услуг. И исследование вопросов архитектур, алгоритмов взаимодействия в структурах/формах туманных вычислений, предоставления требуемого качества обслуживания поверх сегментов туманных вычислений является на данный момент очень актуальным.

Вышепредставленные аспекты архитектур туманных вычислений позволяют оценить масштаб задач, которые необходимо решить для использования данной технологии в качестве инфраструктурной для будущих услуг телеприсутствия.

Если взять во внимание сегмент распределенной динамической вычислительной системы туманных вычислений, который может быть сформирован в том числе из ряда пользовательских устройств и устройств интернета вещей, то с целью обеспечения качества услуг телеприсутствия необходимо разрешить множество нетривиальных задач [322]

Глобально исследования в области динамических туманных вычислений можно представить в виде дерева задач, или так называемой ментальной карты (рис. 2.3). Данная карта позволяет визуальнo представить декомпозицию на направления и подзадачи каждого направление, решение которых позволит системно прийти к реализации основной цели – внедрения эффективных динамических туманных вычислений как интегрированной части инфраструктуры сетей ИМТ-2030, в том числе для реализации перспективных услуг телеприсутствия.

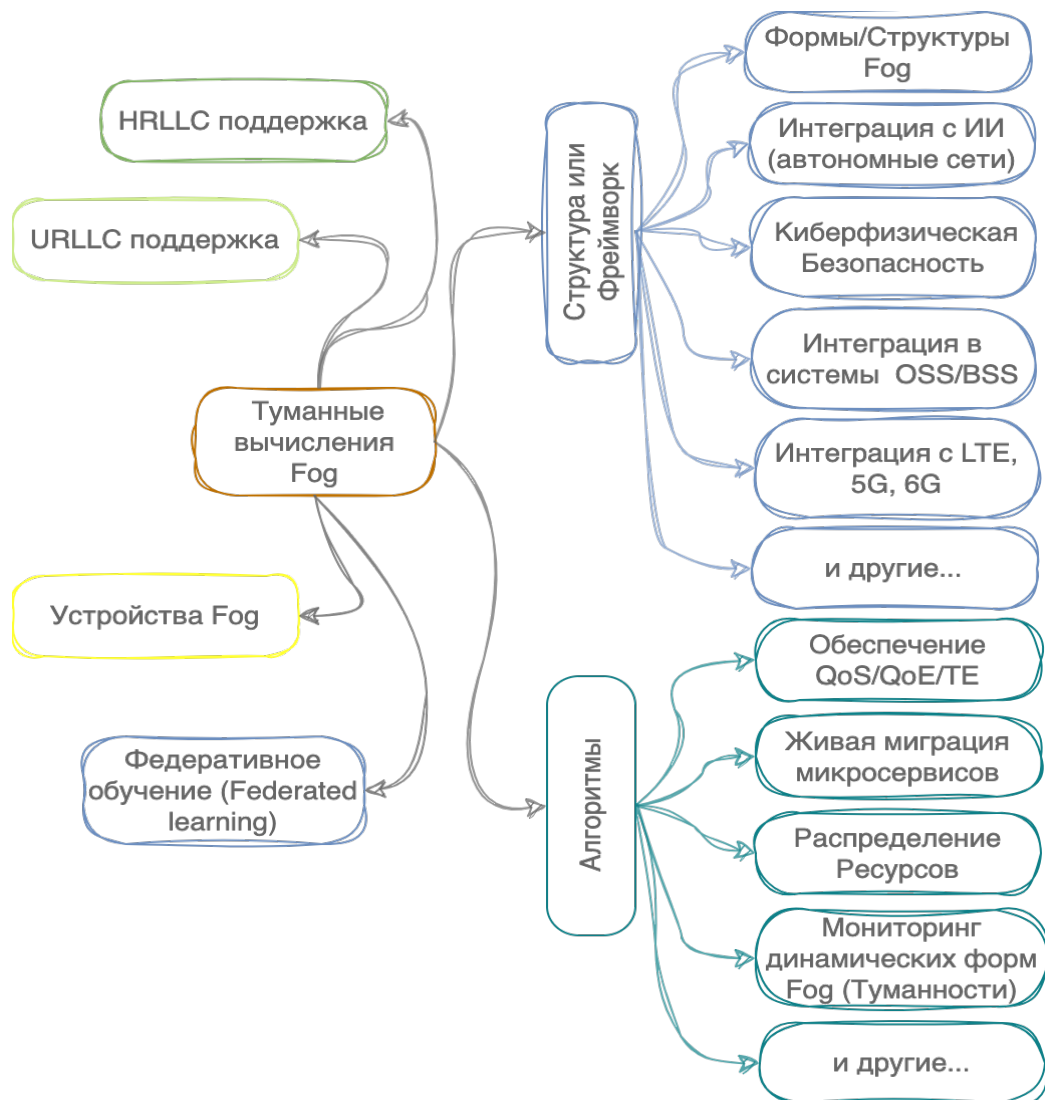


Рисунок 2.3 – Карта задач в области туманных вычислений

Представленная на рисунке 2.3 карта не отображает всю возможную декомпозицию задач ввиду её конечного размера при полной развёртке (с большей декомпозицией). Однако она позволяет оценить масштаб задач для исследований в области перспективных облачных структур – туманных вычислений. Рассмотрим некоторые из них [321].

1. Поддержка услуг URLLC и HURLLC. Данные задачи несут за собой вопросы реализации в Туманных вычислениях требований соответствующих классов услуг из сетей 5G/IMT-2020 и сетей IMT-2030 [322]. В ряде случаев такие услуги могут быть также оказаны в труднодоступных и удалённых регионах, учитывая возможности интегрированных сетей IMT-2030. Данная задача особо актуальна в рамках цели сокращения цифровых разрывов, в том числе с обеспечением равного доступа к услугам, включая удалённые и труднодоступные регионы и поселения;

2. Устройства туманных вычислений. В рамках данного направления необходимо решить вопросы совместимости, энергоэффективности управляющих систем и систем обработки данных, а также поддержки мульти-платформенности микросервисов (то есть, например, контейнеры, виртуальные машины и др.). К этому пункту также относятся вопросы использования сетевых интерфейсов и оптимизация процессов использования батарей питания устройств туманных вычислений. Устройства туманных вычислений могут быть, как это упоминалось ранее, представлены пользовательскими девайсами, такими как смартфоны, планшеты, микрокомпьютеры и даже тонкие клиенты. Ввиду этого, особо острым вопросом в данном случае является обеспечение безопасности персональных данных, сохранения секретности личной жизни (в том числе перемещения пользователя, его активность при использовании устройств и т.д.). Стоит также дополнить, что на данный момент существуют нормативно-правовые преграды для использования пользовательских устройств в качестве единого вычислительного кластера, где могут обрабатывать другие персональные данные, например в рамках какой-либо услуги. Однако, развитие технологий обеспечения информационной и кибер-безопасности вскоре позволит разрешить данную преграду, учитывая то, что

в рамках метавселенных данных о пользователе будет собираться больше в тоже время как и усложнятся требования по безопасности.

3. Федеративное обучение (Federated learning). Набирающий актуальность метод распределенных облачных вычислений в искусственных нейронных сетях. Данный метод принципиально связан с возможностями распределенных Туманных вычислений, в том числе динамических туманных вычислений [321]. Метод федеративного обучения реализует идею распределенного ИИ, что также коррелирует с потенциальными инновационными услугами телеприсутствия сетей ИМТ-2030 [323]. Федеративно обучение позволит усилить мощности распределенного ИИ, в том числе для решения задач в автономных сетях, где, например, кластер туманных вычислений может реализовывать некоторые сетевые или вычислительные функции, такие как элементы конвейера моделей машинного обучения (п.1.3 диссертации) или сетевой функции CFS-API ядра ИМТ-2020. Федеративное обучение также будет способствовать реализации задач генеративного искусственного интеллекта, который при реализации метавселенных будет требовать все больше и больше ресурсов для выполнения задачи генерации видео/аудио и другого контента, в том числе при поддержке функций любого типа аватаров в метавселенных. Модель аватара, как и модель цифрового двойника также является достаточно требовательны к вычислительным и сетевым ресурсам, где федеративное обучение может быть спасательным решением с точки зрения масштаба “оцифровки” физических объектов, генерации их цифровых копий-аватаров, при создании метавселенных типа NL-MV, L1-MV и особенно L2-MV.

4. Алгоритмы в туманных вычислениях. Данное направление исследований обладает большим потенциалом с точки зрения объёма работ, а также возможностью формирования инновационных решений. В данное направление входят следующие поднаправления (см. рис. 4):

- обеспечение качества обслуживания QoS и качества восприятия QoE, в том числе инжиниринг или управление временем TE (Time Engineering, с англ. управление временем) и прочее. Стоит отметить, что метод “управление

временем” определён в документах фокус-группы МСЭ-Т по сетям 2030 и призван решить задачи обеспечения качества обслуживания для услуг телеприсутствия, в том числе услуг типа НТС, где необходимо обеспечить передачу группы различных типов данных, с соблюдением синхронности и требований к задержкам, полосе и т.д. В предложенном методе управление временем пакета может быть реализовано как для цели его ускорения в сети, так и для торможения, в том числе с помощью искусственного внесения задержки через изменение маршрута в сети, например при передаче через низкоорбитальный или воздушный сегменты.

- реализация алгоритмов живой миграции контейнеров и/или виртуальных машин также является одной из важных задач в области туманных вычислений. Живая миграция может быть реализована различными методами, в первую очередь зависящая от формы представления вычислительной и/или сетевой функции - контейнер или виртуальная машина. Живая миграция как функция стала доступна при появлении платформ систем вычислений - оркестраторов. Оркестратор, как система мониторинга и управления вычислительными ресурсами имеет возможность отслеживания статуса каждой виртуальной машины или контейнера. В существующие OpenSource решения и также проприетарные продукты встроен функционал, позволяющий в онлайн режиме отслеживать нагрузку, в том числе с сетевого интерфейса виртуальной машины или контейнера. Такой функционал вкупе с данными о вычислительной нагрузке дает пользователю-администратору системы достаточно необходимый объем данных для мониторинга. При интеграции оркестратора вычислительных ресурсов с оркестратором моделей машинного обучения архитектуры автономных сетей (п.1.3) появляется возможность реализации нативного и прозрачного слайсинга, мониторинг и управление которого основывается на данных и знаниях, получаемых с помощью конвейера моделей машинного обучения автономной сети. Таким образом, при возникновении потребности, которую можно отследить с помощью разработанных алгоритмов (3 пункт

данного списка), возможно в автоматизированном режиме реализовать процесс живой миграции, который позволит перенести один или группу контейнеров/виртуальных машин на другие устройства туманных вычислений. Такая процедура может быть выполнена также на основе задачи перераспределения типовых вычислительных функций в кластерах туманных вычислений с целью формирования устойчивых вычислительных туманностей (необходимым и достаточным набором типовых вычислительных функций). Стоит также упомянуть, что т.н. вычислительные функции являются микросервисами - специальным изолированным с точки зрения бизнес-логики приложения/платформы, так и с технической/программной точки зрения. Микросервисная архитектура программного обеспечения имеет множество преимуществ на рынке разработки ПО, эффективность которых была подтверждена опытной эксплуатацией. Микросервисная архитектура ПО позволила приблизить реализацию туманных вычислений и в качестве устройств туманных вычислений включить также и достаточно малые по ресурсам устройства, например такие, как устройства интернета вещей. Микросервисная архитектура программного обеспечения высоконагруженных платформ услуг позволила реализовать достаточно гибкое управление ПО, быстро масштабировать решения, в ответ на рост нагрузки со стороны пользователей, а также быстро и достаточно дешево (по сравнению с монолитной архитектурой) обновлять программное обеспечение (точечно), а также повысить безопасность и устойчивость программных систем. Микросервисная архитектура вкупе с туманными вычислениями на самом деле является следующим уровнем конвергенции сетей связи, вычислительных систем и ПО услуг. Конвергенция на уровне интеграции сетевой архитектуры, вычислительной архитектуры и программной архитектуры систем управления и услуг.

- в задачу по разработке методов распределения ресурсов входит множество вопросов. Например, при распределении ресурсов необходимо учитывать

обеспечение устойчивости форм туманных вычислений, то есть минимизации риска “разрушения вычислительного кластера” из-за выхода какого-либо устройства из кластера или туманности, что может привести к “просадке” уровня качества предоставления услуг. Задача обеспечения устойчивости кластера туманных вычислений будет рассмотрена в главе 3 данной диссертации. К задаче распределения ресурсов в туманных вычислениях можно также отнести задачу определения группы узлов туманных вычислений, например, при реализации поверх туманностей безсерверных платформ (serverless), где необходимо манипулировать группами типовых микросервисов. Задачи в области распределения ресурсов в туманных вычислениях обладает не меньшим объёмом и потенциалом.

5. Структура или фреймворк. На практике фреймворк включает в себя и структуры, и основные процессы динамических туманных вычислений (рисунок 2.3) [321]. В основном данное направление исследований призвано решить основные процессные и архитектурные задачи в области туманных вычислений, к примеру, реализовать интеграцию с системами поддержки операций OSS и поддержки бизнеса BSS. Данные системы должны также быть адаптированы к условиям и особенностям функционирования туманных вычислений. При этом системы, обеспечивающие функции OSS/BSS в туманных вычислениях, не должны принести избыточность и излишнюю сложность, что может комплексно повлиять и нивелировать множество преимуществ туманных вычислений [321]. К слову говоря, одним из требований архитектуры сетей IMT-2030, которое ещё изначально было приведено в технической спецификации, разработанной специальной фокус-группой МСЭ-Т по сетям 2030, является принцип простоты и упрощения. Данный принцип призывает искать более изящные решения задач в будущих сетях, уходить от усложнений архитектур и добавления дополнительных систем и процессов [321].

Немаловажной задачей при разработке фреймворков туманных вычислений является обеспечение требований по информационной и кибер-физической безопасности на уровне архитектур, процессов, алгоритмов системы. Как уже ранее было отмечено в данном пункте, а также пункте 1.3 настоящей диссертации,

динамические туманные вычисления подразумевают использование пользовательских конечных устройств, что порождает вопросы обеспечения сохранности персональных данных как владельцев устройств, так и персональных данных тех пользователей, чьи могут обрабатываться в рамках распределенных микросервисов. Данная проблема и проблема обеспечения безопасности с точки зрения передачи данных в сети и их отслеживания ещё мало изучена для туманных вычислений и представляет собой большой интерес и требует глубокой проработки.

2.4. Оценка эффекта от внедрения туманных вычислений на сети

Проведём численную оценку эффекта от внедрения туманных вычислений в перспективные сети IMT-2030. Модель сети с использованием туманных вычислений может быть описана элементами, приведёнными на рисунке 2.4 [321].

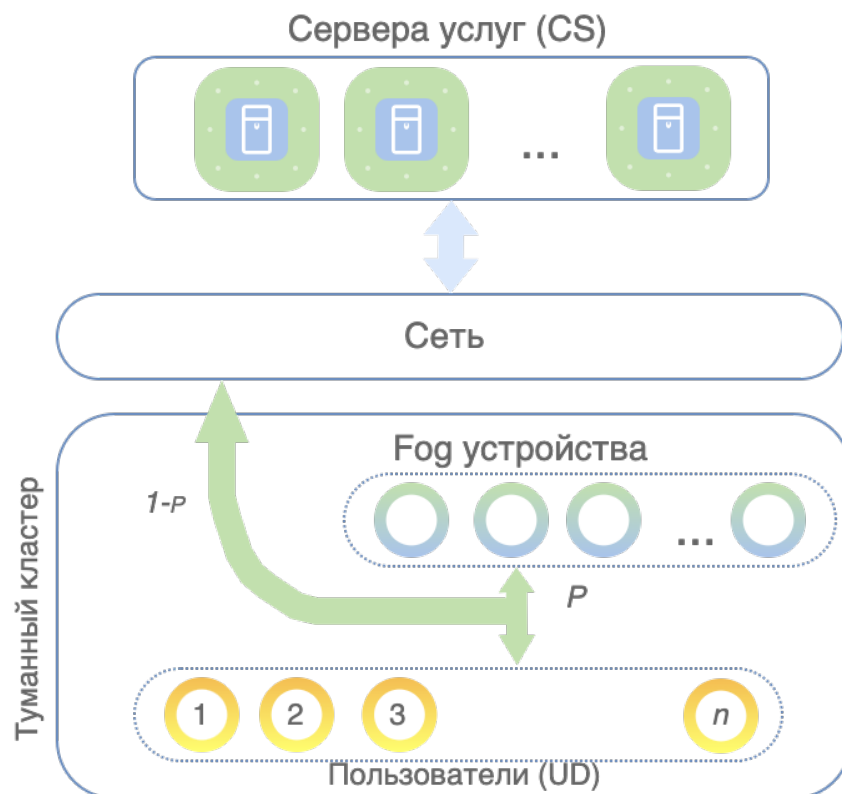


Рисунок 2.4 – Модель сети с внедрением туманных вычислений

Полагаем, что потенциальная услуга предоставляется центральным сервером CS. Для предоставления услуги требуется передача данных между устройством пользователя UD и CS, при этом от пользователя к CS и от CS к пользователю

передаётся некоторое количество данных. Устройства туманных вычислений могут обслуживать n_u пользователей своего кластера.

При этом, доля трафика, завершаемого в пределах туманного кластера, пропорциональна доле услуг (сервисов), мигрирующих в устройства туманных вычислений.

Пусть a_{i0} – это удельный трафик пользователя на i -ю услугу, тогда общий трафик, производимый n пользователями туманного кластера, в котором предоставляется m услуг, будет определяться как (формула 1.1):

$$\tilde{a} = \sum_{i=1}^m a_{i0} n \quad (2.1)$$

Пусть p_i – это вероятность того, что i -ая услуга делегирована устройствам туманных вычислений кластера, то интенсивность трафика в пределах кластера составит (формула 2.2):

$$a_{\text{INT}} = \sum_{i=1}^m p_i a_{i0} n. \quad (2.2)$$

Тогда интенсивность внешнего трафика составит (формула 2.3):

$$a_{\text{EXT}} = \sum_{i=1}^m (1 - p_i) a_{i0} n. \quad (2.3)$$

На основе данных открытых источников [324], в настоящее время трафик потокового видео составляет в глобальной сети около 70%.

Стоит отметить, что доля замыкания трафика γ случайна и зависит от множества факторов, например таких, как общее количество предоставляемых услуг (в том числе услуг телеприсутствия), специфика пользователей в кластере, возможности устройств туманных вычислений и др.

Допустим, что интенсивность внутреннего и внешнего трафика a_{INT} и a_{EXT} ,

также случайны и имеют гамма-распределение, тогда величина будет описана следующим выражением (формула 2.4):

$$\gamma = \frac{a_{\text{INT}}}{a_{\text{INT}} + a_{\text{EXT}}}. \quad (4)$$

Если же сделать допущение, что 50% услуг доступа к видео размещены на устройствах туманных вычислений, то доля трафика γ , замыкающегося в туманном кластере может составить около 35% [321].

И соответственно будет иметь бета-распределение. Результат моделирование представлен на рисунке 2.5.

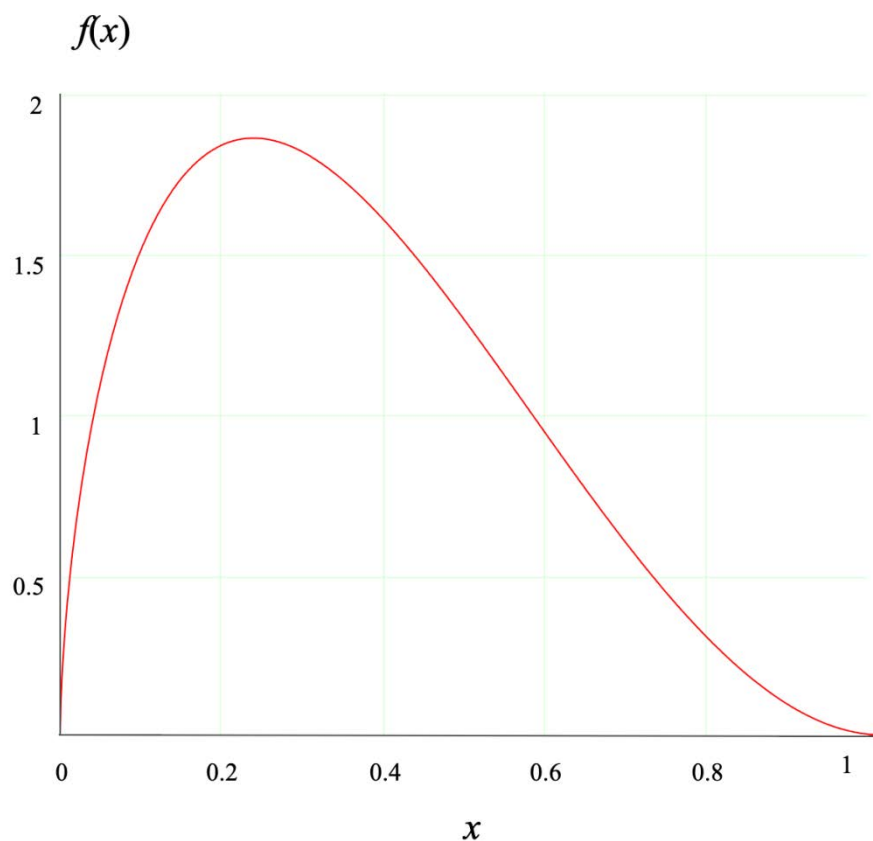


Рисунок 2.5 – Распределение доли трафика внутри туманного кластера

Таким образом, внедрение туманных вычислений, в условиях сделанных допущений при решении задачи, позволит снизить объем поступающего трафика в ядро сети, при этом снизит нагрузку также и на сети агрегации.

Приведённые выше рассуждения позволяют сделать вывод о том, что доля трафика, замыкающегося внутри туманного кластера, случайна и зависит от доли услуг, мигрирующих на устройства туманных вычислений, при этом ожидаемое значение доли трафика, завершающегося внутри кластера, в настоящее время составляет около 35%, и в среднем её распределение близко к бета-распределению [321].

Стоит также отметить, что, внедрение технологии туманных вычислений позволит сократить цифровой разрыв, в том числе для удалённых регионов. А также нивелировать необходимый технологический рывок в области импортозамещения телекоммуникационного и серверного оборудования [321].

2.5. Выводы по Главе 2

1. В данной главе представлено решение научной задачи, а именно разработка новой архитектуры сети, в которой услуги связи предоставляются на основе туманных вычислений, а для динамического распределения ресурсов сети образуются новые структуры - туманности, как результат её кластеризации.

2. Во второй главе был также приведён анализ архитектурных вызовов, которые призваны в том числе решить туманные вычисления. На основе аналитики первой главы по архитектурам перспективных сетей ИМТ-2030, в том числе архитектуре туманных вычислений была разработана и представлена карта задач, которая позволяет системно подойти к исследованиям и разработкам в области туманных вычислений.

3. Для оценки эффекта от внедрения туманных вычисления в перспективные сети связи было проведено моделирование, которое показало, что при сделанных допущениях, основанных в том числе на основе данных из открытых источников, позволит достичь доли замыкания пользовательского трафика до 35%, при этом её

распределение близко к бета-распределению.

4. Если же учесть оценку для традиционного построения сети, стандартизованную в РД 45.120-2000, в частности то, что процент интенсивности внутростанционной нагрузки для крупномасштабных сетей имеет величину 15-17% и оценку внедрения туманных вычислений (представлена в данной главе), то уменьшение доли трафика, поступающего в ядро сети, может составить до 20%.

ГЛАВА 3. ЗАДАЧА ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ КЛАСТЕРА В ДИНАМИЧЕСКИХ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ

3.1. Введение

Развитие идеи распределенной архитектуры облачных вычислений привело к появлению таких решений, как многоуровневые облачные вычисления и распределенные туманные вычисления. Последующая их интеграция в сети связи стала вопросом времени и разрешения проблем в консерватизме рынка операторов и определённой инерции, которой следовали многие участники. Появление сетей пятого поколения достаточно жёстко сформулировало потребность в декомпозиции сетей и систем облачных вычислений, в первую очередь благодаря услугам сверхнадежных сетей с ультрамалой задержкой, которые были определены в стандарте ИМТ-2020. Проблематика декомпозиции систем вычислений была подробно изучена и приведена в п.1.3 данной диссертации.

В первой главе, при рассмотрении актуальных вызовов сетей ИМТ-2030, проблематики декомпозиции сетевой и облачной инфраструктуры, а также архитектурных вызовов, приведённых во второй главе, были определены актуальные научно-исследовательские задачи для динамических туманных вычислений. Одной из задач является обеспечение устойчивости в туманных вычислениях. Также немаловажной задачей в области новых архитектурных решений для сетей ИМТ-2030 является преодоление цифрового разрыва, который также упоминается в таких документах, как: цели устойчивого развития ООН, стратегии развития сетей связи Российской Федерации, аналитические документы фокус-группы МСЭ, а также документы формата “white paper” от ведущих вендоров телекоммуникационного рынка и их научно-исследовательских центров.

Преодоление цифрового разрыва, как уже ранее было определено, может быть разрешено благодаря возможностям интегрированной/гибридной сети. В результате интеграции сегментов сети (морской, наземный, воздушный, космический - низкоорбитальный) может быть обеспечено подключение удалённых районов и труднодоступных поселений.

Научной задачей, исследуемой и решаемой в третьей главе является разработка модели и метода построения сетей связи общего пользования для предоставления услуг телеприсутствия в сельской местности и труднодоступных районов с обеспечением стабильности кластера туманных вычислений с минимизацией риска миграции микросервисов.

Основной вклад в данной главе заключается в разработке модели и метода построения сетей связи общего пользования, отличающиеся от известных тем, что с целью предоставления услуг телеприсутствия в сельской местности и труднодоступных районов предложено использовать для предоставления услуг распределенные оркестраторы интегрированной/гибридной сети совместно с динамическими туманными вычислениями и динамическую кластеризацию для обеспечения максимальной стабильности кластера без необходимости миграции микросервисов.

Глава организована следующим образом:

- в разделе (2) приводится предложенная архитектура интегрированной сети для поддержки удалённых районов, с учётом статистических значений расстояний между населёнными пунктами РФ, а также сценарий использования, который далее будет рассмотрен как основной при решении задачи обеспечения стабильного кластера динамических туманных вычислений;

- в разделе (3) приводится разработанная модель сети туманных вычислений на базе точечного процесса Неймана-Скотта, приводится обоснование выбора данного подхода к построению модели, учитывая особенности динамических туманных вычислений;

- в разделе (4) приводится модель кластера туманных вычислений и разработанный метод обеспечения стабильности кластера динамических туманных вычислений. Предложенные модель и метод учитывают рассматриваемый сценарий, который был приведён в разделе (3);

- в разделе (5) приводится результат моделирования с оценкой эффективности предложенного метода.

3.2. Архитектура интегрированных сетей для удалённых районов

Ранее (в первой главе) было определено, что сети ИМТ-2030 будут иметь следующий набор сценариев:

- Индустриальный Интернет Вещей (ИИВ);
- Взаимодействие голографического типа - НТС;
- Тактильный Интернет для удаленных операций - TIRO;
- Искусственный интеллект сетях связи ION;
- Конвергенция сетей и вычислительных систем NCC;
- Цифровые двойники – DT;
- Интегрированные сети – STIN.

Для данных сценариев были определены требования по пяти оценкам, каждая из которых имеет десятибальную шкалу [325]. Были определены следующие оценки:

1. Скорость. Данная оценка описывает группу следующих параметров: полоса, ёмкость, качество восприятия, качество обслуживания, уровень гибкости сети и адаптируемость транспортной сети.

2. Время. Данная оценки описывает следующую группу параметров: задержка, синхронизация, джиттер, точность, планирование, координация, точность геолокации/позиционирование.

3. Безопасность. Данная оценка раскрывает следующие вопросы: конфиденциальность, надёжность сети, устойчивость сети, а также законный перехват трафика.

4. Искусственный интеллект в сетях связи. Данная оценка описывает возможность сбора и аналитики данных в сетях, уровень программируемости сетевых и вычислительных ресурсов.

5. ManyNets. Эта оценка описывает следующую группу параметров: адресация в сетях, мобильность пользователей/устройства, а также сетевые интерфейсы и конвергенция гетерогенных сетей.

Как уже ранее было отмечено, для выполнения данных требований предлагаются архитектуры многоуровневых граничных вычислений MEC, утверждённые стандартизирующей организацией ETSI. Архитектура MEC при относительной гибкости с точки зрения выбора уровня облака, все же обладает ограничениями как с точки зрения объёма вычислительных ресурсов, так и зависимости от существующей аппаратной вычислительной базы в сети оператора [325]. В тоже время, международным сообществом инженеров и учёных предлагается перейти на следующий уровень декомпозиции облачных вычислений - Туманные вычисления, которые призваны реализовать философию “бережливого производства” применительно к сетям связи. В спецификации OpenFog, принятой также в IEEE было дано следующее определение Туманным вычислениям - это горизонтальная архитектура системного уровня, которая распределяет вычислительные функции, функции хранения, управления и сети ближе к пользователям, в измерении «облако-вещь».

Исследуя архитектуру перспективных интегрированных сетей 2030, стоит отметить немаловажный аспект разработки и реализации самих услуг [326], которые представлены в виде конечного программного обеспечения, так как ожидается, что конвергенция сети и облачных технологий будет сопутствовать конвергенции и архитектуры ПО высоконагруженных платформ услуг в общие процессы инфраструктуры сети. В текущее время, существует немало знаний в области разработки эффективного программного обеспечения, методов, принципов реализации цифровых продуктов, в том числе услуг (с точки зрения кода). В том числе существуют различные архитектурные решения. К ним можно отнести следующие: монолитная, управляемая событиями, многоуровневая, бессерверная, а также микросервисная. Особое внимание необходимо уделить бессерверной и микросервисной архитектурам программного обеспечения услуг [325].

В Главе 2 было уделено внимание важности микросервисной архитектуры для инфраструктурных решений, например, таких, как платформы Интернета Вещей, платформы услуг, на практике реализующие больше, чем один “цифровой продукт”. Стоит отметить, что бессерверная (serverless) архитектура позволяет

перейти к реализации иного подхода как в реализации бизнес процессов разрабатываемых программных продуктов, так и системных в ряде услуг [325].

Микросервисное программное обеспечение представляет собой набор программных модулей – микросервисов и процессы их взаимодействия. На практике, микросервисное программное обеспечение представляет набор функций услуги, или представлен в виде достаточно атомарной и универсальной структуры программного обеспечения - программной функции, что в пределе может быть приведено к архитектуре FaaS (Function as a Service, функция как сервис или бессерверная функция).

Важным аспектом в в приведённой архитектуре программного обеспечения является то, что модули-микросервисы должны быть независимы друг от друга. При этом данная “независимость” должна обеспечить процессы быстрого масштабирования функций системы, то есть те или иные микросервисы могут быть размножены так, чтобы удовлетворить возросшие запросы как внутри системы услуги, так и внешним (пользовательским) запросам [325]. Например, в рамках платформы метавселенной реализуется функции цифрового аватара, который взаимодействует с физическим пользователем на основе возможности генеративного искусственного интеллекта - генерируемой речи и мимики лица аватара. При этом при увеличении количества аватаров платформа метавселенной будет нуждаться не в общем увеличении вычислительных ресурсов, в только в увеличении функциональной мощности модуля речи генеративного искусственного интеллекта, для этого данные модули, представленные в виде типовых микросервисов ГИИ, могут быть размножены и следуя законам систем массового обслуживания, позволят снизить поток заявок-запросов на данные программные модули.

Из приведённого выше сценария видно, на сколько важно исследовать вопросы конвергенции сетевых, вычислительных и программных архитектур (микросервисная и FaaS). Данные решения позволят реализовывать в том числе метавселенные, суть которых была ранее приведена в п.1.5 диссертации.

Бессерверная и микросервисная архитектуры позволят максимально эффективно использовать потенциал динамических туманных вычислений. В условиях интегрированных сетей, архитектуры программного обеспечения перспективных услуг телеприсутствия должны учитывать принципы модульности, бессерверности и конвергенции распределенных динамических туманных вычислений с архитектурой сетей и систем вычислений (NCC).

Только таким образом, интегрированные сети позволят разрешить те вызовы и задачи, которые были приведены выше, например, сокращение цифрового разрыва с удалёнными поселениями с предоставлением полного комплекса услуг, в том числе услуг Телеприсутствия В тоже время инфраструктурные вопросы динамических туманных вычислений обладают не меньшими по уровню сложности задачами.

Рассмотрим географические особенности территории Российской Федерации, учитывая реализацию динамических Туманных вычислений. Ранее авторами в книге [327] была представлена статистическая оценка средних расстояний для всех федеральных округов РФ. На основе приведённых данных [327] возможно выделить 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 интегрированных сетей. Рассмотрим данные три группы, которые были также проанализированы для интеграции туманных вычислений и представлены в статье [325]:

1. I-ая группа.

В первую группу можно отнести округа, где средние расстояния между сельским населённым пунктом и районным центром не превосходят 16,5 км, 23,0 км и 25,0 км. Кроме того, для этой группы Федеральных Округов средние расстояния между районным центром и областным центром в среднем не превосходят 132,2км. Таким образом, при размещении центров обработки данных в областных центрах возможно практически повсеместное предоставление услуг

дополненной реальности и им подобных, которые требуют круговой задержки в 5мс.

2. II-ая группа.

Для этих округов максимальные значения средних расстояний между сельским населённым пунктом и районным центром составляют в среднем 61,4км и 49,6км, что не позволяет говорить о повсеместной возможности предоставления услуг Тактильного Интернета при установке ЦОД в районных центрах. В ряде случаев будет необходимо применять нетиповые решения.

3. III-я группа.

Для этих округов максимальные средние расстояния между сельским населённым пунктом и районным центром составляют 108км и 101км соответственно, что делает возможным предоставление услуг дополненной реальности и им подобных на уровне центров обработки данных в районных центрах. Что же касается предоставления услуг тактильного интернета с требованием задержки в 1мс, то необходимо сегментировать ряд территорий районных центров в этих округах и устанавливать несколько центров обработки данных в их пределах. В рамках единой инфраструктуры должны быть обеспечены платформенные решения для необходимого абстрагирования и предоставления верхнеуровневым решениям необходимых функций [325].

В результате симбиоза программно-конфигурируемых решений (Оркестраторы, SDN, MEC) существует возможность управления ресурсами с помощью инструментов Искусственного Интеллекта. Рассмотрим сценарий для третьей группы, с большими расстояниями между центрами и поселениями [325]. Данный сценарий архитектуры приведён на рисунке 3.1.

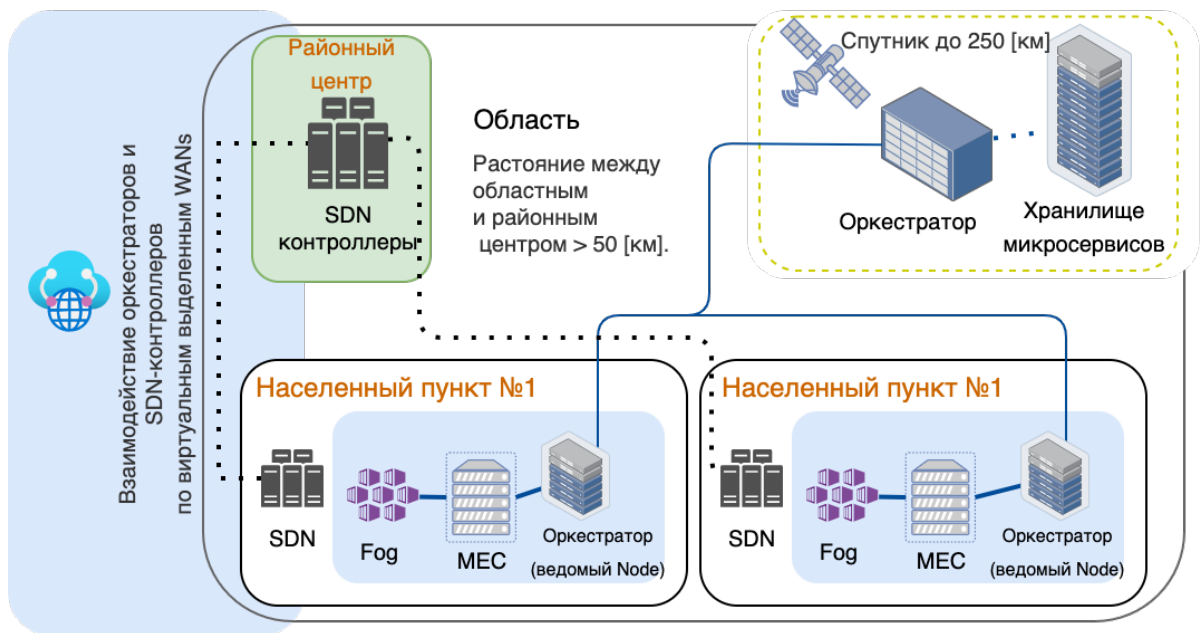


Рисунок 3.1 – Архитектура сети для 3-ей группы

На рисунке 3.1 представлены следующие элементы сети:

- SDN (Программно-конфигурируемых сети, с англ. Software-Defined Networks), в частности группа контроллеров программно-конфигурируемой сети, учитывая мультиконтроллерность сетей;
- Fog (Туманные вычисления, в частности, динамические Туманные вычисления). На рисунке 3.1. представлены обобщёнными сегментами;
- MEC (Multi-access Edge Computing, с англ., многоуровневые облачные вычисления), На рисунке 3.1. также представлены обобщёнными сегментами без детализации уровней облаков;
- Оркестратор (ведомый Node) - ведомая вычислительная часть общего кластера, подчиняющаяся основной мастер-node оркестратора). Данный оркестратор отображает только часть систем оркестрации, отвечающие за контроль вычислительных ресурсов сети. Данный оркестратор не включает в себя функции оркестратор автономной сети или оркестратора федеративного MEC, которые были проанализированы и представлены в первой главе диссертации;
- Хранилище микросервисов. Система хранения типовых и уникальных контейнеров микросервисов услуг. В данном сценарии предлагается рассмотреть только типовые микросервисы, как допущение в исследуемом сценарии.

Типизация микросервисов позволит приблизить решение задач в туманных вычислениях, а также более эффективно использовать вычислительный и сетевой ресурс инфраструктуры;

Рассмотрим сценарий услуги, где используется рой роботов для сельскохозяйственных работ в удалённом населённом пункте. Концепция архитектуры приведена на рисунке 3.2. Данный рой может быть сформирован в качестве кластера динамических туманных вычислений [325].

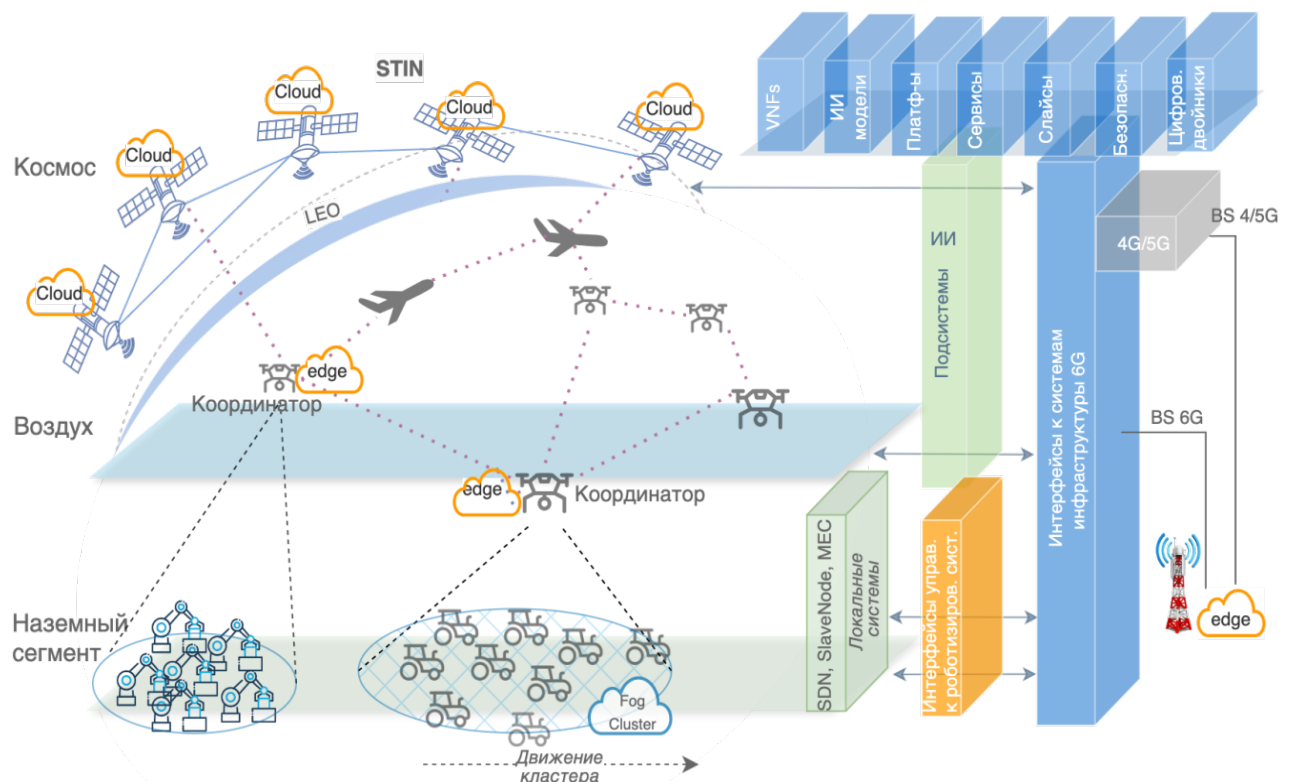


Рисунок 3.2 – Сценарий услуги

Представленная архитектура на рисунке 3.2 согласуется с архитектурой интегрированных сетей с поддержкой туманных вычислений, представленная ранее в п.2.3 диссертации и архитектурой, представленной на рисунке 1.4 пункта 1.1 диссертации.

На рисунке 3.2 кластер динамических туманных вычислений может быть образован на основе сельскохозяйственной техники, которая при выполнении прямых сельскохозяйственных работ (например, уборка урожая) перемещается в

пространстве, где каждый из устройств имеет свой уникальный путь, при этом все устройства имеют единую конечную географическую цель и таким образом сохраняют строй. В тоже время, некоторые устройства могут изменять маршрут по какой-либо причине, например, объезд препятствия, что может повлиять на архитектуру сети и доступность непосредственно тех микросервисов, которые развернуты на данном вычислительном устройстве Тумана [325].

С учётом удалённости от широкополосных мобильных сетей доступа, в качестве координатора и связующим звеном может выступать беспилотный летательный аппарат - дрон (в том числе привязного типа), который сможет обеспечить связность с основной сетью, сервисами и услугами через интеграцию с сетью STIN/SAGSIN. Таким образом, координатор выполняет роль “воздушного” шлюза и брокера для кластера динамических туманных вычислений, образованного на базе сельскохозяйственной техники [325].

В данном исследуемом сценарии необходимо обеспечить устойчивость кластера динамических туманных вычислений через сопровождение данного кластера координатором на базе БПЛА и выбора его местоположения с учётом движений каждого из входящих в состав устройств. Для аналитического описания данной модели будем использовать точечный процесс.

3.2. Модель сети туманных вычислений на базе точечного процесса Неймана-Скотта

В ряде сценариев характер размещения устройств Туманных вычислений может быть characterized ограниченным объёмом. При этом, устройства туманных вычислений размещены на сравнительно малом расстоянии друг от друга. Величина данного расстояния может быть также определена дальностью связи, которая обеспечивается используемым стандартом сети доступа. Взаимное расположение устройств Туманных вычислений существенно влияет на структуру непосредственно самой сети, при этом учитывая динамичность самих устройств, архитектура и взаимное расположение устройств может изменяться [325].

Таким образом, для анализа работы сети динамических туманных вычислений требуется использовать модель, которая позволит описать функционирование сети в условиях динамически изменяющейся архитектуры ввиду движений устройств Туманных вычислений [325].

Для разработки такой модели следует определить предположения и допущения о характере движения устройств динамических туманных вычислений. Здесь можно представить модель, описываемую, например, моделью броуновского движения, когда устройства могут перемещаться в любых направлениях с любыми скоростями или модель совершенно неподвижных устройств [325].

При этом, в большинстве случаев, в динамических Туманных вычислениях, базирующихся на группах пользовательских устройств и устройств Интернета вещей, стоит оперировать группам устройств - роями, при этом стремящихся сохранить при этом общие параметры движения. Например, параметры движения автомобилей по проезжей части, определяются принятыми правилами и особенностями дороги, движение пешеходов определяется, как правило, конечным числом направлений и диапазоном скоростей. Движение пассажиров в вагоне поезда или салоне автобуса, также ограничено и имеет свои особенности, например, скорость перемещения пользования (вспомним требования к мобильности сетей ИМТ-2030 до 1000 км/ч [325]).

Свои особенности также имеет и движение сельскохозяйственной техники. Таким образом, в данной области исследования приходится иметь дело с группой подвижных плотно размещённых устройств, «стремящихся», при этом сохранить своё положение относительно других членов группы [325]. Для описания взаимного положения элементов сети предлагается использование модели точечного процесса [328, 329], рисунок 3.3.

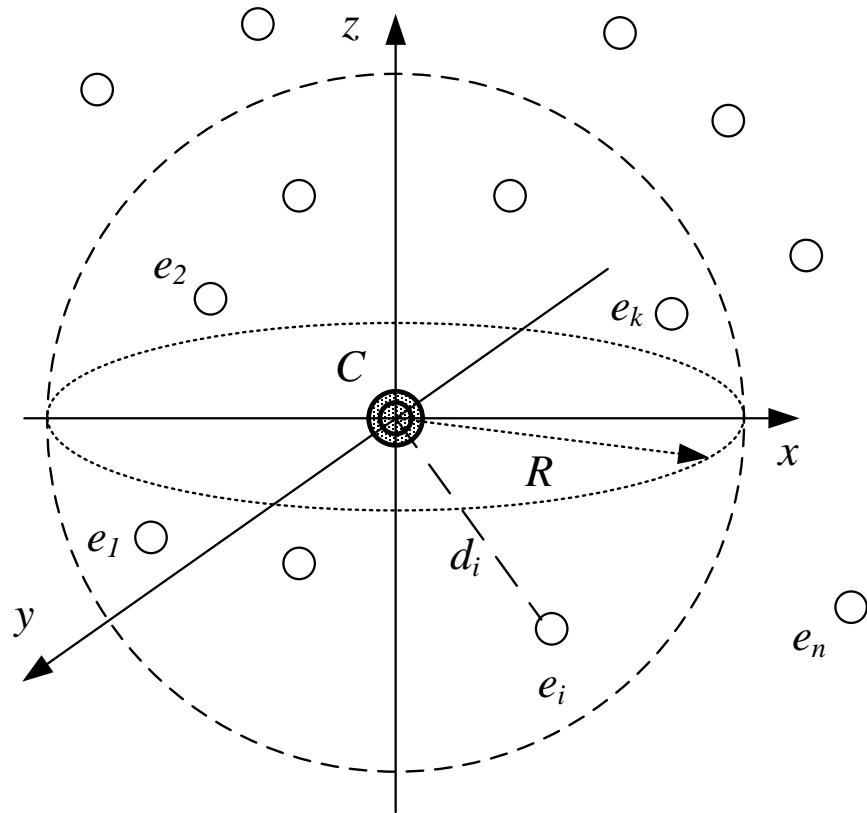


Рисунок 3.3 – Модель группы устройств/элементов

Как показано на рисунке 3.4, отдельные элементы группы $e_1 \dots e_k$ (кластера) расположены в своих позициях, которые заданы правилами организации группы. Эти позиции фиксированы и неизменны относительно центра кластера C (координатора). Все элементы, включая координатора, могут перемещаться в одном и том же направлении с равными скоростями. Если центр кластера C принять за начало координат, то элементы кластера неподвижны относительно его центра [325].

Будем полагать, что при движении скорости и направления движения отдельных элементов могут несколько отличаться, что приводит к их отклонениям от заданных в группе позиций. Таким образом, расстояние между устройством i и координатором это случайная величина d_i , определяемая в трёхмерном пространстве следующим выражением (формула 3.1):

$$d_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}, \quad (3.1)$$

где $x_i, x_j, y_i, y_c, z_c, z_c$ – координаты устройств i и, соответственно координатора c .

Полагая, что устройства «стремятся» сохранить своё положение относительно других членов группы, сделаем допущение того, что координаты устройств случайны и имеют нормальное распределение с математическим ожиданием, равным некоторой «целевой» координате. Расстояния же d_i в таком случае, можно рассматривать как отклонения от целевых координат.

Величина d_i в таком случае имеет распределение n – мерного случайного вектора [330] с плотностью вероятности (формула 3.2):

$$f(x) = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}-1} \sigma^n \Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} x^{n-1} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0 \quad (3.2)$$

где $\Gamma(a)$ - гамма функция. n – количество случайных величин.

При этом, в частном случае при $\sigma=1$, принимает вид распределения Пирсона [331].

Функция распределения вероятности (формула 3.3):

$$F(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{x^2}{n\sigma^2}, \frac{n}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} = I\left(\frac{x^2}{2\sigma^2}, \frac{n}{2}\right), \quad x > 0 \quad (3.3)$$

где $I(a, b) = \Gamma(a, b) / \Gamma(b)$ - отношение неполной гамма функции.

При этом, при $n=2$, то есть в двумерном пространстве и не нулевых математических ожиданиях распределение принимает вид распределения Райса [332] с плотностью вероятности (формула 3.4):

$$f(x)_{n=2} = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+v^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{xv}{\sigma^2}\right), \quad v = \sqrt{sx^2 + sy^2}, \quad x > 0 \quad (3.4)$$

где $I_0(z)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка. (При нулевых математических ожиданиях, при $n=2$ распределение Релея).

Функция распределения Райса (формула 3.5):

$$F(x) = 1 - Q_1\left(\frac{v}{\sigma}, \frac{x}{\sigma}\right), \quad x > 0 \quad (3.5)$$

где Q_1 — Q — функция Маркума (Marcum Q-function [332]):

$$Q_M(a, b) = 1 - e^{-\frac{a^2}{2}} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{a^2}{2}\right)^k \frac{P\left(M+k, \frac{b^2}{2}\right)}{k!} \quad (3.6)$$

На рисунке 3.4 приведены эмпирические гистограммы, полученные при имитационном моделировании и описание их плотностью вероятности и функцией распределения Райса [325].

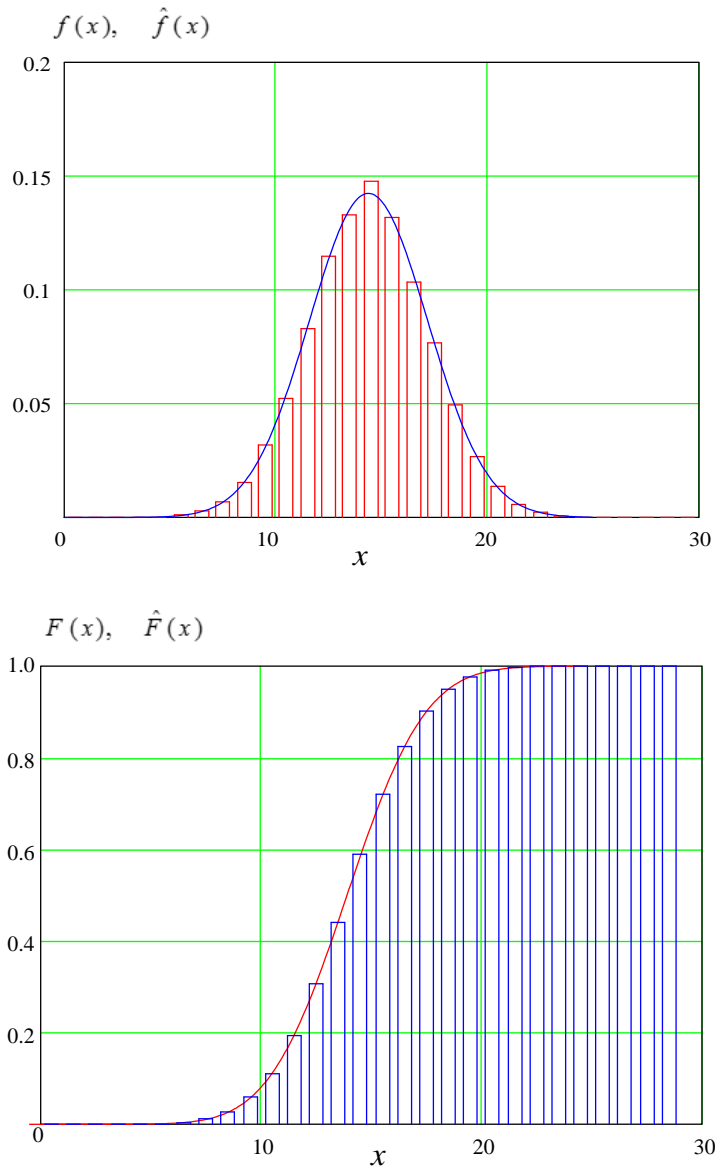


Рисунок 3.4 – Плотность вероятности и функция распределения расстояния между узлами в двумерной модели ($n=2$).

В рассматриваемом случае трехмерного пространства $n=3$, при не нулевых математических ожиданиях распределение принимает вид распределения Максвелла [330] с плотностью вероятности (формула 3.7):

$$f(x) = \frac{2x^2}{\sigma^3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad x > 0 \quad (3.7)$$

Функция распределения определяется следующим выражением (формула 3.8):

$$F(x) = 2 \left[\Phi_0\left(\frac{x}{\sigma}\right) - \frac{x}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \right] = 2 \left[\Phi_0\left(\frac{x}{\sigma}\right) - \frac{x}{\sigma} \varphi\left(\frac{x}{\sigma}\right) \right], \quad x \geq 0 \quad (3.8)$$

где $\varphi(\cdot)$ - плотность вероятности стандартного нормального распределения, $\Phi_0(\cdot)$ - функция Лапласа.

Графики упомянутых функций и результаты имитационного моделирования приведены на следующем рисунке (рис. 3.5):

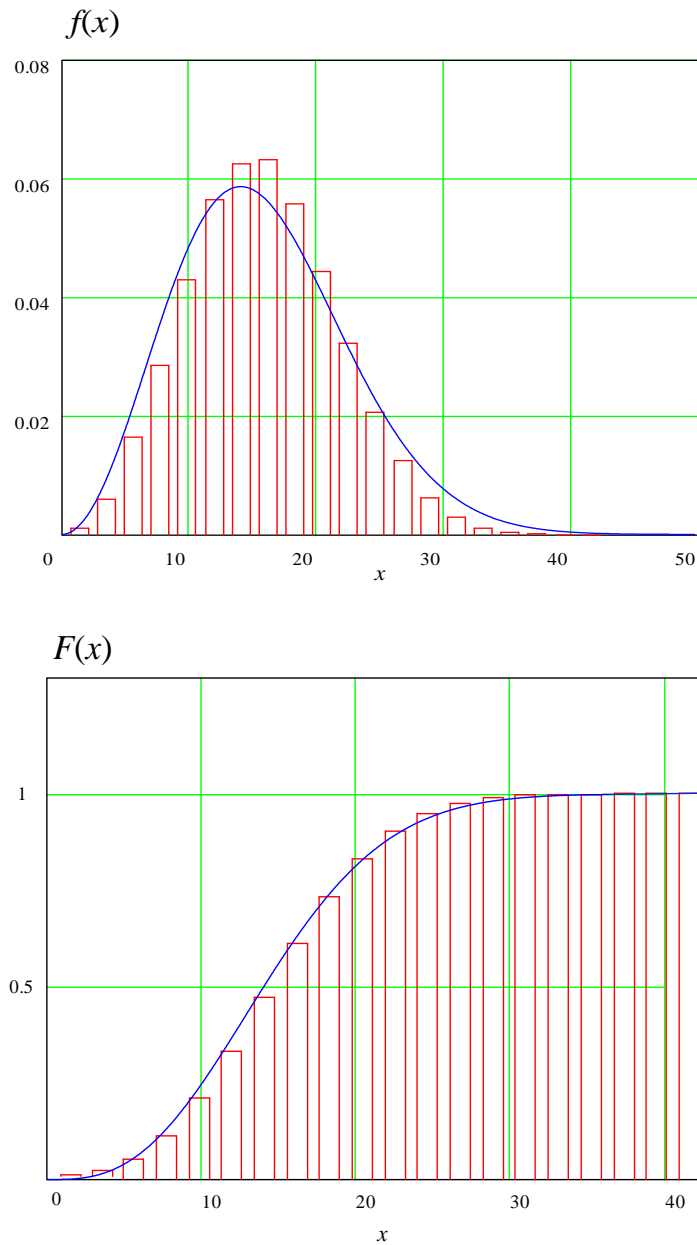


Рисунок 3.5 – плотность вероятности $f(x)$ и функция распределения $F(x)$ расстояния между узлами в трехмерной модели ($n=3$) и результаты имитационного моделирования

Вероятность того, что расстояние между элементом кластера и координатором превысит величину R может быть оценено как (формула 3.9):

$$p(d > R) = 1 - F(R, \sigma), \quad (3.9)$$

Вероятность того, что расстояние между координатором и хотя бы одним из элементов кластера превысит величину R будет определяться как (формула 3.10):

$$p(> R) = 1 - \prod_{i=1}^k F(R, \sigma_i) \quad (3.10)$$

где k – число элементов кластера, σ_i – параметр распределения вероятности расстояния.

Если в качестве критерия формирования кластера принять максимальную стабильность кластера Туманных вычислений, под которой будем понимать сохранение его структуры, то есть связи между координатором и элементами кластера, то целевой функцией может быть следующее выражение (формула 3.11):

$$p(> R) = \min_{pos(C)} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^k F(R, \sigma_i) \right\}, \quad pos(C) \in D, \quad R, \sigma_i > 0, \quad 1 \leq k \leq n \quad (3.11)$$

где использованы следующие параметры:

- D – зона обслуживания;
- k – количество элементов кластера;
- R – дальность связи с координатором;:
- σ_i – параметр распределения вероятности расстояния;
- $pos(C) = (x_c, y_c, z_c)$ – позиция центра кластера в трехмерном пространстве.

3.3. Метод обеспечения стабильности кластера динамических туманных вычислений

Таким образом, стабильность кластера динамических туманных вычислений, в условиях динамичности устройств, может быть обеспечена через стремление сохранения его структуры, а именно наличия устройств туманных вычислений и связей между ними. Так, для задач применения в удалённых и труднодоступных регионах, при развёртывании Туманных вычислений на базе наземных роботизированных систем, координатором может выступить сетевое устройство в форм-факторе БПЛА, относящиеся к воздушному сегменту интегрированных сетей 2030. Так, при реализации предлагаемого метода, координатор будет занимать такую позицию в кластере, которая могла бы максимально обеспечить стабильность кластера при динамически передвигающемся рое устройств Туманных вычислений, то есть минимизировать вероятность выхода устройства из кластера, в результате случайных перемещений [325]

При формировании кластера, одним из основных критериев является минимизация расстояния от координатора до элементов кластера. Центроидные алгоритмы кластеризации, например, такие как k -средних и FOREL, минимизируют величину суммарного расстояния от центров кластера до их элементов [325] (формула 3.12):

$$O = \min_{pos(c_j)} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{k_j} d(c_j, e_{ji}) \quad (3.12)$$

где $d(c_j, e_{ji})$ - расстояние между центром j -го кластера и его i -м элементом, k_j - число элементов в j -м кластере, m - количество кластеров.

Минимизация этой функции производится путём выполнения процедуры выбора центров кластеров. Координаты центра кластера определяется, как координаты центра масс согласно следующему выражению (формула 3.13):

$$cm = \begin{cases} x = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_i \omega_i \\ y = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i \omega_i \\ z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k z_i \omega_i \end{cases} \quad (3.13)$$

где используются следующие параметры:

- ω_i - весовой коэффициент элемента;
- k – количество элементов кластера.

Смысл весового коэффициента ω_i состоит в том, что его величина влияет на позицию центра кластера. Если центр кластера рассматривать как центр масс, то весовой коэффициент имеет смысл массы соответствующего элемента. Если весовой коэффициент некоторого элемента много больше весовых коэффициентов остальных элементов, то центр кластера будет выбран вблизи этого элемента. Таким образом, Вероятность выхода устройства туманных вычислений из кластера иллюстрирует рисунок 3.6 [325].

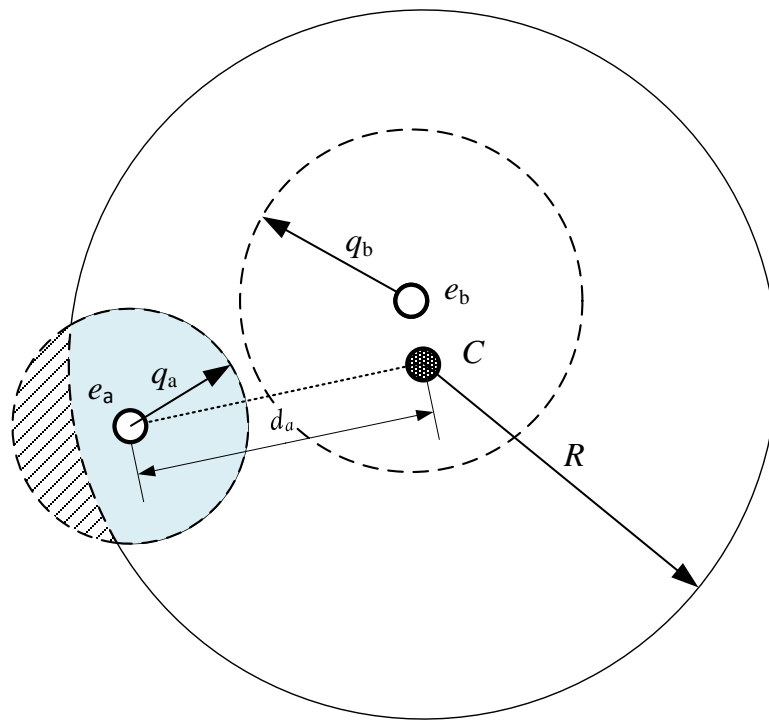


Рисунок 3.6 – Модель кластера туманных вычислений

На рисунке 3.6 изображён кластер, образованный координатором, который находится в центре C , в этой зоне находятся элементы кластера e_a и e_b [325].

Окружности с центрами в e_a и e_b демонстрируют области возможных положений этих элементов в результате случайных перемещений. Если случайные отклонения позиции имеют нормальное распределение, то радиусы упомянутых окружностей имеют смысл квантилей для заданной вероятности. Пересечение зоны связи с координатором, определяемой как круг радиуса R и зоны возможных положений элемента сети определяет вероятность выхода элемента из кластера [325].

Эта вероятность пропорциональна заштрихованной области круга с центром в позиции элемента e_a . Опишем отклонения от целевых координат величиной среднеквадратического отклонения σ_i , где $i=1\dots n$.

Как в трехмерном, так и в двумерном случаях, уменьшение расстояния между центром кластера и элементом кластера d_i , приводит к уменьшению вероятности выхода элемента из кластера [325].

Учтём критерий стабильности кластера в коэффициенте ω_i выражения (3.10).

$$\omega_i = \sigma_i^\alpha \quad (3.14)$$

где α - коэффициент, определяющий «чувствительность» метода к случайным отклонениям от позиций элементов $0 \leq \alpha \leq 1$. Выбор значения коэффициента определяется значимостью данного критерия для решаемой задачи [325].

Метод выбора позиции координатора (центра кластера) основан на алгоритме кластеризации FOREL [330]. Это центроидный алгоритм, для его выполнения необходимы данные о координатах элементов и дальности связи координатора (радиусе кластера). Предполагается, что зона связи координатора представляет собой шар в трёхмерном случае (возможно усечённый) или круг в двумерном случае с радиуса R [325].

Для решения задачи требуются следующие исходные данные: данные о координатах элементов кластера (математические ожидания координат элементов) $E=(e_1 \dots e_k)$ и данные об отклонениях элементов от их ожидаемых позиций (среднеквадратические отклонения положений элементов) $\sigma=(\sigma_1 \dots \sigma_k)$. Эти данные могут быть получены в результате сбора соответствующей статистики в течение достаточного интервала времени. Для краткости будем называть данный алгоритм как SCAD (Spatial Clustering Algorithm by Deviations, с англ. алгоритм пространственной кластеризации по отклонениям) [325]. Суть алгоритма представлена в таблице 3.1 в виде псевдокода.

Таблица 3.1 - Алгоритм

SCAD алгоритм в формате псевдокода
<pre> algorithm scad is input: elements $\mathbf{E}=(e_1\dots e_n)$; deviations $\boldsymbol{\sigma}=(\sigma_1\dots\sigma_n)$; communication range R; output: clusters $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_m$; clusters centers cm_1, \dots, cm_m $j=0$ $c=(xc, yc, zc)$ //центр кластера while $\mathbf{E} \neq \emptyset$ do $\mathbf{EC}=\emptyset$ //установить элементы кластера $c \leftarrow$ random position $cm=cm(c)$ while $c \neq cm(c)$ // $c:=cm$ $\mathbf{EC}=\mathbf{EC} \cup (e_i \in R, e_i \in \mathbf{E})$ end while $\mathbf{E}_j=\mathbf{EC}$ $\mathbf{E}=\{e \in \mathbf{E}, e \notin \mathbf{EC}\}$ $j=j+1$ end while </pre>

При этом, позиция центра масс cm в данном алгоритме вычисляется согласно выражению (3.13) с учётом (3.14). Результатом работы алгоритма являются множества элементов сформированных кластеров $[\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \dots, \mathbf{E}_m]$.

Алгоритм SCAD сохраняет основные достоинства и недостатки алгоритма FOREL, то есть его целесообразно применять при неравномерном распределении элементов в трехмерном или двумерном пространстве [325].

Наиболее благоприятным является тот случай, когда размеры скоплений элементов близки к размерам зоны связи координатора или не превышают её. В последнем случае эти скопления, выделяются как отдельные кластеры, что может быть удобно при решении многих практических задач обслуживания групп устройств. Из недостатков следует отметить не слишком высокое качество формирования кластеров в случае равномерного распределения элементов. В таком случае кластеры могут иметь различную форму и различное количество элементов [325].

В рамках решаемой задачи, основное внимание уделяется первому случаю, то есть неравномерному распределению элементов в зоне обслуживания, то есть обслуживанию групп устройств. Поэтому, равномерное распределение пользователей далее не рассматривается [325].

3.4. Оценка эффективности предложенного метода

Эффективность предложенного метода оценим по сравнению с формированием кластера только на основании расстояния между элементами, то есть без учёта их подвижности. В качестве параметра, характеризующего качество алгоритма выберем вероятность выхода элемента из кластера [325]. При оценке эффективности степень значимости подвижности выбрана равной единице, т.е. значение коэффициента в выражении (3.14) $\alpha = 1$.

Эффективность вычислялась согласно следующему выражению (формула 3.5):

$$e = 100 \frac{p(> R)}{p^*(> R)}, \quad (3.5)$$

где $p(> R)$ вероятность того, что хотя бы один элемент кластера оказался вне зоны связи координатора без учёта подвижности элементов, $p^*(> R)$ вероятность того,

что хотя бы один элемент кластера оказался вне зоны связи координатора при кластеризации данным алгоритмом, то есть с учётом подвижности элементов [325].

Для оценки эффективности была использована имитационная модель. В существующих работах для гомогенного множества элементов Интернета вещей в подобных задачах использовался трехмерный точечный процесс Томаса [328, 329]. В исследуемом случае координаты элементов случайны и элементы образуют гетерогенные скопления (различные по составу и характеру размещения группы устройств) [325]. В связи с этим, для решения задачи будет использован точечный процесс Неймана-Скотта [330].

Отметим, что координаты элементов (устройств динамических туманных вычислений) случайны, элементы образуют скопления. Предположим, что элементы могут отклоняться от своих позиций на случайную величину, распределенную по нормальному закону [...]. Параметры распределений задаются нулевым математическим ожиданием $\mu_i=0$ и среднеквадратическим отклонением $0,05R < \sigma_i < 0,5R$. Таким образом, предполагается, что разброс отклонений элементов от их позиций различен для различных элементов. Такое предположение продиктовано практическими приложениями, в которых группа элементов, представляющая собой, например, группу сельскохозяйственной техники включает в себя различные агрегаты, которые имеют свою специфику движения, вследствие чего и их отклонения от заданных позиций могут быть различными [325]

При моделировании значения среднеквадратических отклонений в каждом эксперименте выбираются случайным образом (формула 3.16)

$$\sigma_i = \text{random}(), \quad i = 1 \dots n \quad (3.16)$$

В каждом эксперименте используется различный диапазон значений среднеквадратических отклонений, который характеризуется величиной, определяемый по следующей формуле (формула 3.17):

$$\xi = \frac{\max \{ \sigma_i \mid i = 1 \dots n \}}{R} \quad (3.17)$$

Для оценки эффективности предложенного метода было проведено моделирование, результат зависимости эффективности метода, определённой согласно (3.15) приведена на рисунке 3.7 [325].

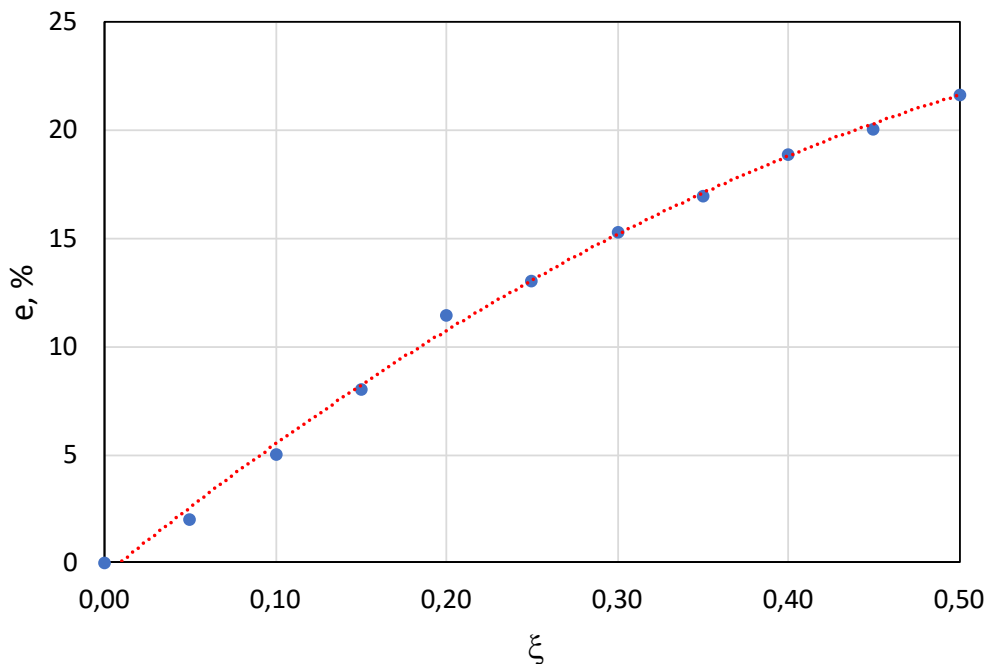


Рисунок 3.7 – Зависимость эффективности предложенного метода от разброса положений элементов сети

Как видно из результатов имитационного моделирования (рисунок 3.7), эффективность разработанного метода повышается с ростом разброса значений среднеквадратических отклонений (СКО). Такая закономерность объясняется тем, что алгоритм кластеризации производит выбор положения центра минимизируя вероятность выхода элемента из кластера за счёт приближения центра к наиболее «неустойчивым» элементам [325].

Таким образом, выигрыш возможен тогда, когда есть разные элементы, то есть имеется возможность выбора. Если все элементы имеют равную стабильность,

то есть равные среднеквадратические отклонения, то все варианты равноценны и выигрыш равен нулю [325].

Полученный результат моделирования удовлетворяет той задаче, которая была поставлена перед разрабатываемым методом обеспечения стабильности кластера динамических туманных вычислений, в том числе при применении на сетях для труднодоступных регионов и удалённых поселений.

3.5. Выводы по Главе 3

1. В данной главе представлено решение научной задачи по разработке модели и методе построения интегрированных/гибридных сетей связи общего пользования с поддержкой туманных вычислений, для предоставления услуг телеприсутствия в сельской местности и труднодоступных районов с обеспечением стабильности кластера туманных вычислений с минимизацией риска миграции микросервисов.

2. В главе представлен анализ архитектурных аспектов построения интегрированных сетей связи, в частности были рассмотрены особенности территории Российской Федерации, основываясь на опубликованной ранее статистике, и предложена архитектура такой сети для одного из типов делений.

3. Предложенная архитектура далее рассматривалась в рамках сценария реализации услуг с поддержкой динамических туманных вычисления для труднодоступных регионах. В частности, был рассмотрен сценарий движения сельскохозяйственной техники, которая также может быть представлена в виде динамического кластера туманных вычислений.

4. Рассмотренный сценарий далее был уточен предложенной моделью сети динамических туманных вычислений, основанной на точечных процессах Нейманна-Скотта ввиду гетерогенности кластера. Приведён также соответствующий математический аппарат, описывающий возможные процессы.

5. В главе также была предложена модель кластера сети динамических туманных вычислений, где была отражена вероятность выхода устройства из

кластера при удалении ото центра - координатора, роль которого, согласно рассматриваемого сценария, выполнял БПЛА.

6. В главе также был предложен метод обеспечения стабильности кластера динамических туманных вычислениях. На примере исследуемого сценария была предложена целевая функция и метод ее минимизации. В качестве метода был предложен центроидный алгоритм кластеризации, а именно “алгоритм пространственной кластеризации по отклонениям”, основанный в свою очередь на алгоритме FORELL. Разработанный алгоритм кластеризации производит выбор положения центра минимизируя вероятность выхода элемента из кластера за счёт приближения центра к наиболее «неустойчивым» элементам.

7. Оценка эффективности метода, представленная в данной главе, показала, что метод эффективен тогда, когда есть нестабильные элементы, то есть имеется возможность выбора алгоритмом. Если все элементы имеют равную стабильность, то есть равные среднеквадратические отклонения, то все варианты равноценны и выигрыш равен нулю.

8. Предложенные модель и метод в данной главе, рассмотренные для соответствующего сценария могут быть масштабируемы и применимы в других сценариях, которые удовлетворяют сделанным допущениям о том, что все устройства туманных вычислений хоть и имеют долю хаотичности, но при этом стремятся сохранить единый вектор движения. Такие сценарии возможны на общественном транспорте (например, самолёт, поезд, в том числе скорые поезда, автобусы и т.д.), автомобильном потоке на трассах, и других подобных вариациях.

ГЛАВА 4. ИНТЕГРАЦИЯ БЕССЕРВЕРНОЙ АРХИТЕКТУРЫ И ДИНАМИЧЕСКИХ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

4.1. Введение

В условиях увеличения парка оборудования центров обработки данных, развития следующего поколения интегрированных сетей ИМТ-2030 и появлением услуг Телеприсутствия, особо актуальным направлением современных исследований является поиск нетривиальных, нестандартных подходов и решений в области обеспечения вычислительными и сетевыми ресурсами [333]. Данная диссертация направлена на исследование актуального вопроса инфраструктуры сетей ИМТ-2030 – динамических туманных вычислений. В данной главе рассматривается вклад данной технологии для повышения эффективности используемых ресурсов. В частности, исследуется возможность интеграции бессерверной архитектуры и динамических туманных вычислений. В главе также поднимается вопрос повышения эффективности используемых вычислительных ресурсов и сетей через призму зелёной повестки, которая также является одной из целей устойчивого развития ООН. Эта и другие ЦУР были приведены в первой главы диссертации, отражены актуальные задачи. В первой главе также была выявлена потребность в разработке новых методов развития вычислительной инфраструктуры, ввиду существующего лавинного роста спроса благодаря развитию современных и перспективных услуг.

Научной задачей, исследуемой и решаемой в третьей главе является разработка модели и метода функционирования сети с использованием бессерверной архитектуры для обеспечения миграции групп типовых микросервисов при применении метаэвристического алгоритма для определения группы устройств, на которую будет мигрировать группа типовых контейнеров с микросервисами бессерверной платформы FaaS с целью обеспечения доступности данной группы функций в исследуемой части сети.

Основной вклад в данной главе заключается в разработке модели и методе использования бессерверной архитектуры для миграции групп типовых

микросервисов при применении метаэвристического алгоритма стаи серых для определения группы устройств, на которую будет мигрировать группа контейнеров с микросервисами, что позволяет как определить группу устройств, а не единичное устройство, так и уменьшить время принятия решения о миграции в десятки раз по сравнению с известным метаэвристическим алгоритмом роя частиц.

Глава организована следующим образом:

- в разделе (2) приводится краткое исследование существующей проблематики воздействия на окружающую среду результатов роста парка оборудования центров обработки данных. Приводится краткая справка о существующих работах в данной области на международном уровне. Во втором разделе четвёртой главы отражены также аспекты применения бессерверной архитектуры в динамических туманных вычислениях;

- в разделе (3) приводится разработанная модель сети туманных вычислений для поиска группы устройств с целью последующей миграции группы контейнеров бессерверной платформы. Миграция группы типовых контейнеров является одним из сценариев предоставления высконагруженных услуг в динамических туманных вычислениях, облачная архитектура которых соответствует FaaS;

- в разделе (4) приводится разработанный метод миграции групп типовых контейнеров в бессерверной архитектуре;

- в разделе (5) представлены результаты экспериментального исследования существующих открытых программных продуктов для платформ FaaS, данные тестирования которых использовались при дальнейшем моделировании разработанного метода, что позволило приблизить условия моделирования к натурным;

- в разделе (6) представлена оценка эффективности предложенного метода миграции группы типовых контейнеров по сравнению с применением другого метаэвристического алгоритма.

4.2. Перспективы зелёных ИКТ и бессерверной архитектуры для туманных вычислений

Развитие в своё время платформ Интернета вещей, позволяющих обрабатывать терабайты данных и получать новые данные и знания с использованием методов искусственного интеллекта, что способствовало бурному развитию центров обработки данных.

Как уже было отмечено в аналитической главе диссертации, развитие концепции Интернета вещей породило различные концепции услуг: тактильный интернет, интернет навыков, умные города и другие. Приведённые примеры относятся к сверх надёжным сетям с ультрамалыми задержками, которые являются одним из фундаментальных направлений сетей ИМТ-2020 и соответственно сетей ИМТ-2030.

В тоже время граничные вычисления позволили, благодаря своей архитектуре [334], приблизить реализацию ряда услуг, а также снизить нагрузку на ядро сети, что было доказано во множестве научно-исследовательских работ, а также результатах практического внедрения. При этом автономные сети призваны разрешить вопросы интеллектуального распределения ресурсов как сетевых, так и вычислительных, которые мягко интегрированы в системы управления сетью. В результате, глобальная тенденция на абстрагирование программного обеспечения сетевых и вычислительных сущностей от аппаратной части сформировала технологические возможности реализации программного слайсинга ресурсов [335].

Пройдя вышеприведенные этапы развития сети и вычислительных систем, стала более ясна цель - максимальная автономизация/интеллектуализация инфраструктуры с рациональным использованием вычислительных и сетевых ресурсов, на базе алгоритмов машинного интеллекта [335]. Данному вопросу с точки зрения архитектуры, требований посвящён пункт 1.4. Интеграция инструментов машинного обучения является важной и одной из центральных задач

современных и будущих сетей связи, особенно в разрезе появления и развития концепции мульти-/метавселенной.

Обратим внимание на отчёты статистического агентства Straits Research [336], то можно заметить продолжающийся рост объёма рынка оборудования для центров обработки данных. Ожидается, что к 2031 году он достигнет 164,36 миллиарда долларов США, а среднегодовой темп роста составит 13,2% (CAGR - Compound annual growth rate, с англ. совокупный среднегодовой темп роста) в течение прогнозируемого периода (2023–2031 годы) [336].



Source: Straits Research

Рисунок 4.1 – Рост рынка оборудования ЦОД [336]

С учётом планируемых услуг телеприсутствия сетей ИМТ-2030, данные показатели роста могут быть изменены в большую сторону и существующий факт объёма строящихся центров обработки данных заставляет задуматься об эффективности используемого сетевого и вычислительного оборудования, а также росте потребления энергоресурсов для обеспечения работы данного парка оборудования [335].

В работе [337] приводится проблема создания так называемых зелёных инфокоммуникационных технологий – “Green ICT”. В работе представлены

исследования комплекса вопросов: как организационных, так и информационно-технологических способов перехода к зелёным информационным и телекоммуникационным технологиям, направленные в первую очередь на рациональное энергопотребление.

Например, в рассматриваемой статье [337] приводится сравнительный анализ потребности энергии для судна-контейнеровоза «Emma-Maersk» и одного из крупных центров обработки данных европейской части России, где достаточно наглядно в сравнении становится понятно то, насколько центры обработки данных потребляют энергоресурсов [335].

На текущий момент исследований существуют немало работ в области “Зелёных ИКТ” [338, 339, 340, 341]. При этом анализ в данной области показал, что рынок озадачен проблемой КПД (коэффициента полезного действия) центров обработки данных и уже существует немало решений в данной области, которые внедряются различными компаниями по всему миру. Все больше компаний вендоров презентуют свои продукты в области строения так называемых зелёных центров обработки данных [335].

В дополнение, данная повестка активно исследуется и прорабатывается на уровне международных рекомендаций МСЭ-Т Исследовательской Комиссией №5. В частности, можно найти серию Рекомендаций МСЭ-Т L.1300-L.1399: Энергоэффективность, умная энергетика и экологически чистые центры обработки данных, а также немало технических отчётов и спецификаций. МСЭ-Т даёт следующее определение: “Зеленый” или устойчивый центр обработки данных - это хранилище для хранения, управления и распространения данных, в котором механические, осветительные, электрические и компьютерные системы спроектированы с учётом максимальной энергоэффективности и минимального воздействия на окружающую среду [335].

В одной из опубликованных научных работ [342] дают следующее определение: зелёные инфокоммуникационные технологии (Green ICT) — это совокупность способов, призванных уменьшать вредное воздействие на человека и окружающую среду, эффективно использовать ресурсы, которые предоставляет

природа и одновременно повышать производительность систем в расчёте на единицу потребляемых физических ресурсов.

Стоит также отметить принцип Р.Ландауэра, который позволяет установить связь между объёмом данных и энергозатратами, при этом независимо от физики и технологии вычислительного процесса, при потере одного бита данных в процессе вычисления как минимум выделяется энергия E , в [Дж].

Как бы это “парадоксально” не звучало, но принцип Ландауэра означает, что компьютер потребляет тем меньше энергии, чем меньше вычислительных операций он выполняет [335].

Если же рассматривать принципы обработки данных на базе центров обработки данных, то в данном случае необходимо учесть добавочные затраты энергоресурсов, как минимум которые необходимы для постоянной работы систем охлаждения и других вспомогательных систем, а также систем питания для сетей связи, которые обеспечивают доступ к центрам обработки данных [335].

Таким образом, с точки зрения выше приведённого принципа Ландауэра, а также учитывая выше приведённые исследования в области трендов рынка и развития технологий услуг Телеприсутствия и сетей ИМТ-2030, в настоящее время существует потребность в поиске более эффективных методов построения инфраструктуры [335]. В частности, ожидается, что декомпозиция центров обработки данных в меньшие центры, а также внедрение алгоритмов машинного обучения и более инновационные материалы, с использованием возобновляемых источников энергии позволят снизить общий эффект на окружающую среду [335].

При этом декомпозиция вычислительной архитектуры и систем до туманных вычислений, в том числе динамических туманных вычислений позволит исключить некоторые составляющие в общей формуле потребления энергии на удельный размер вычислительной задачи [335].

Здесь использование устройств пользователя и устройств Интернета вещей не требует дополнительных систем охлаждения, резервирования и построения технологичных зданий с надстроенными инженерными системами для его функционирования.

В таком случае концепция Туманных вычислений не только позволяет обеспечить требования к качеству обслуживания для ряда услуг при условии микросервисных архитектур, но и снизить общую суммарную потребность в энергоресурсах. Де-факто Туманные вычисления являются инструментом бережливого производства в области инфокоммуникационных технологий и систем связи [335].

Бессерверная архитектура и туманные вычисления

Бессерверная архитектура (на англ. serverless) и контейнеры могут быть интегрированы для создания высоко масштабируемых и эффективных платформ высоконагруженных услуг. Контейнеры могут использоваться для упаковки и развертывания функций serverless, что позволяет разработчикам услуг использовать преимущества обеих технологий [335].

К преимуществам совместного использования технологий можно отнести следующие [335]:

- упрощённое развёртывание (контейнеры упрощают развёртывание функций serverless, поскольку они уже содержат все зависимости программного обеспечения в виде библиотек и фреймворков);
- портативность (контейнер позволяет быстро переносить функции serverless между различными облачными платформами и локальными средами);
- а также безопасность (контейнеры обеспечивают изоляцию и безопасность между функциями serverless, что в итоге снижает риск уязвимостей).

Для анализа работы сети динамических туманных вычислений необходимо использовать модель, которая позволит описать функционирование сети в условиях изменяющейся архитектуры ввиду мобильности устройств туманных вычислений как рамках кластера, так и в рамках Туманностей (Nebula) [321].

При этом данные кластера туманных вычислений или туманности обладают характеристикой гетерогенности как самих устройств туманных вычислений, так и непосредственно самих структур. Таким образом, с учётом вышеприведенных допущений, в качестве математической модели может быть использована модель

точечного процесса, учитывая гетерогенность структур и устройств туманных вычислений [335].

При этом, как было отмечено в главе 3 диссертации, в данных условиях процессы Неймана-Скотта, относящиеся к точечным процессам с кластеризацией (то есть с объединениям устройств), будут предпочтительнее для построения модели. Так как процессы без кластеризации применяются для моделирования однородных систем, где объекты образуют одно единственное поле, размещённое на плоскости или в пространстве (такая модель может быть применима в частных случаях при использовании однородных вычислительных ферм) [335].

Более подробные исследования в области применения точечных процессов для распределенных Туманных вычислений представлены в следующей статье [325].

Стоит отметить, что туманные вычисления обладают отчасти противоречивыми характеристиками. Например, устройства динамических Туманных вычислений могут образовывать mesh-сеть, при этом обладающую характеристикой самоорганизации с возможностью горизонтального масштабирования, что больше напоминает самоорганизующиеся сенсорные сети. В то же время, Туманные вычисления являются вычислительным кластером, на базе которого могут быть развернуты платформы, услуги и прочее программное обеспечение [335]. Соответственно, для разрешения задач может быть перенят опыт исследований и разработок в вышеуказанных областях знаний.

Так, в работах [331, 332] приводятся исследования применения аппарата точечных процессов, в частности процессов Томаса для формирования математических моделей в сверхплотных сенсорных сетях Интернета Вещей, что говорит об актуальности использования данной математической базы для перспективных сетей и услуг [335].

4.3. Модель сети туманных вычислений для поиска группы устройств с последующей миграцией

В поставленной задаче (в главе 4 диссертации) необходимо решить задачу поиска группы устройств в вычислительной туманности, которая может быть представлена в виде группы кластеров туманных вычислений или одного кластера туманных вычислений.

При этом делается допущение о том, что все устройства находясь в условиях мобильности относительно базовой станции или сетевого координатора стремятся сохранять единый вектор перемещения при минимально возможных отклонениях между собой. На практике, такой сценарий может быть обнаружен в быстрых поездах типа Сапсан, самолетах и других похожих условиях (общественный транспорт, проспекты и т.п) [335].

Таким образом, опираясь на сценарий, модель сети туманных вычислений при поиске группы устройств туманных вычислений для дальнейшей живой миграции 4-х типовых контейнеров платформы FaaS, может быть представлена в следующем виде (рисунок 4.2) [335]:

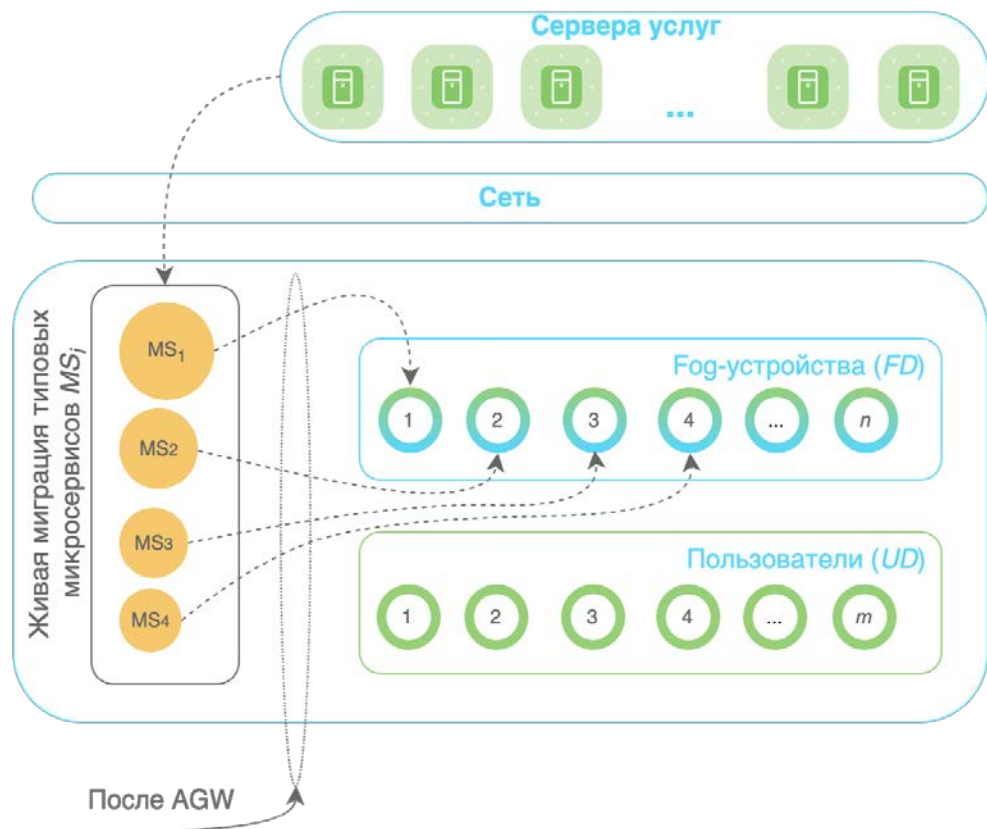


Рисунок 4.2 – Модель сети туманных вычислений при поиске группы устройств туманных вычислений

Каждое из устройств туманных вычислений может быть представлено набором параметров, характеризующих устройство с точки зрения элемента вычислительного кластера:

- CPU (количество и частота ядер процессора);
- GPU (производительность графического процессора);
- Network (тип интерфейса и тип технологии связи, в том числе возможная скорость подключения);
- и многие другие.

В текущей модели [335], для развёртывания FaaS-unit, с 4-мя типовыми контейнерами ($MS_i, \forall i \in N$) и оценки предлагается использовать временные характеристики реализации задачи.

Вводя условие типизации контейнеров MS_i , возможно перейти к оценке характеристик самого устройства туманных вычислений, а также самого контейнера в пространстве времени, а именно [335]:

- времени реализации задачи типовым контейнером $T_c[ms]$;
- задержки передачи соответствующего объема информации $T_r[ms]$,
который является конечным.

Типовой контейнер при этом решает одну задачу, например, сортировка данных методом пузырька, где определен соответствующий формат и объем принимаемых данных, а также формат и объем передаваемых результатов [335].

В результате необходимо определить параметры, описывающие каждое из исследуемых устройств туманных вычислений. При этом некоторые параметры могут оцениваться на уровне сравнения с предельными значениями, например, количество выделенной логической ОЗУ, необходимой для работы готовящегося к миграции микросервиса или группы микросервисов.

В рамках исследуемой задачи были определены параметры, описывающие узел туманных вычислений с точки зрения затраченного времени реализации типовой задачи [335].

В общем виде целевая функция оценки устройства может быть представлена следующим образом (формула 4.1):

$$F = \sum_{i=1}^m k_i P_i, \quad (4.1)$$

где $0 \leq k_i \leq 1$ - коэффициенты, при этом $\sum k_i = 1$;

P_i - параметры оценки, где m -количество параметров, для $\forall i > 0, i \in N$,

При этом, основная задача сформулирована следующим образом (формула 4.2):

$$\{F_1, F_2, F_3, F_4\} = \arg \min_{T_r, T_c, S} \{F\}, \quad (4.2)$$

где $\{F_1, F_2, F_3, F_4\}$ - ряд решений $F(T_r, T_c, S)$ в порядке неубывания их значений, то есть:

$$F_1 \leq F_2 \leq F_3 \leq F_4.$$

при этом T_c - время выполнения типовой задачи в типовом контейнере MS_i .

Параметр T_r - характеризует связь узла с основным шлюзом-брокером в соответствующей зоне Туманных вычислений, через который проходят все транзакции между устройствами и соответственно контейнерами и может быть представлен, как задержка при передаче типового запроса с соответствующим объёмом данных до шлюза-брокера [335].

Параметр S - описывает степень стабильности кластера Туманных вычислений, в частности рассматривается стабильность соответствующего устройства в кластере туманный вычислений.

При этом вероятность того, что, расстояние между элементом кластера Fog и шлюзом-брокером превысит величину R может быть оценено как (формула 4.3) [321]:

$$p(d > R) = 1 - Dis(R, \delta), \quad (4.3)$$

где $Dis(R, \delta)$ - функция распределения вероятности расстояния между устройством и координатором.

В зависимости от условий $Dis(R, \delta)$ может быть описана Гамма-распределением или его частными формами, например: распределением Пирсона или распределением Райса (возможные вариации были приведены в предыдущей главе диссертации) [335].

R - расстояние между устройством и координатором. При этом вероятность того, что расстояние между координатором и хотя бы одним из элементов кластера превышает величину R определяется как (формула 4.4.) [321]:

$$p(> R) = 1 - \prod_{i=1}^k Dis(R, \delta_i), \quad (4.4)$$

где k – число устройств туманных вычислений, δ_i - параметр распределения вероятности расстояния.

Таким образом, в работе [321] была сформулировано предложение о максимальной стабильности кластера туманных вычислений, где под

стабильностью понимается стремление сохранить структуру, то есть связи между координатором и элементами кластера (формула 4.5):

$$\min_R \{1 - \prod_{i=1}^k Dis(R, \delta_i)\} \quad (4.5)$$

Стабильность кластера Туманных вычислений может быть представлена как оценка, которая может быть описана как функция минимизации вероятности изменения географического состояния устройства относительно так называемого центра масс кластера или шлюза-брокера в кластере туманных вычислений, через который проходят все транзакции [335].

Данная сторона вопроса может быть решена с использованием точечных процессов Неймана-Скотта, как это было предложено в статье [9].

Соответственно, стабильность самого устройства относительно его отношения к шлюзу-брокеру будет представляться следующим образом (формула 4.6):

$$\min_R \{1 - Dis(R, \delta)\}, \quad (4.6)$$

а используемый параметр оценки стабильности S в основной целевой-функции может быть представлен следующим образом (формула 4.7):

$$S = \max\{\min_R \{1 - Dis(R, \delta)\}\}. \quad (4.7)$$

В данной исследуемой задаче предлагается рассмотреть частный случай, как ранее было упомянуто, в качестве исследуемых параметров взять оценку узла туманных вычислений с точки зрения таких критериев, как [335]:

- времени реализации задачи типовым контейнером T_c [мс];
- задержки передачи соответствующего объёма данных T_r [мс]
- и параметра оценки стабильности S устройства в кластере, где при этом $0 < S \leq 1$.

Таким образом, целевая функция, исследуемая в данной работе может быть представлена в следующем виде (формула 4.8):

$$F = \sum_{i=1}^m k_i P_i = k_1 T_r + k_2 T_c + k_3 S. \quad (4.8)$$

Стоит отметить, что данный метод может быть использован при выполнении условия типизации контейнеров для развёртывания бессерверной архитектуры [335].

В общем случае, данный метод может быть сложно реализуем с точки зрения необходимости предварительного тестирования среднего времени выполнения функции соответствующим не типовым контейнером общей услуги [335].

4.4. Метод миграции групп типовых контейнеров в бессерверной архитектуре и туманных вычислениях

Для решения поставленной задачи был исследован класс метаэвристических алгоритмов, которые позволяют определить глобальный экстремум целевой функции.

Существует немало метаэвристических алгоритмов. Рассмотрим основные [335]:

- Алгоритм стаи серых волков (GWO, Grey Wolf Optimizer);
- алгоритм оптимизации роя частиц (PSO, Particle Swarm Optimization);
- генетический алгоритм (GA, Genetic Algorithm);
- алгоритм роя сальп (SSA, Salp Swarm Algorithm).

Каждый из этих алгоритмов имеет свои уникальные особенности и преимущества. К сходству алгоритмов можно отнести следующие критерии:

- все четыре алгоритма являются популяционными алгоритмами, то есть, они работают с популяцией кандидатных решений;
- все четыре алгоритма используют итеративный процесс поиска.

Сравнительный анализ алгоритмов представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнительный анализ алгоритмов

	Метаэвристические алгоритмы			
	GWO	PSO	GA	SSA
Биологическая модель-источник	<i>социальное поведение волков</i>	<i>поведении стаи птиц</i>	<i>процесс эволюции</i>	<i>поведение роя сальп (морские животные)</i>
Структура популяции	<i>волки</i>	<i>частицы</i>	<i>хромосомы</i>	<i>сальпы</i>
Принцип обновления	<i>волки обновляют свои положения на основе позиций альфа-, бета- и дельта- волков</i>	<i>частицы обновляют свои положения на основе своих собственных лучших положений и лучшего положения в популяции</i>	<i>хромосомы обновляются с помощью операций кроссовера и мутации</i>	<i>сальпы обновляют свои положения на основе положения передней и задней сальпы</i>
Топологии	<i>волки расположены в иерархической структуре</i>	<i>частицы обычно расположены в топологии кольца</i>	<i>хромосомы не имеют определенной топологии</i>	<i>сальпы расположены в одномерной топологии</i>

В целом, такие метаэвристические алгоритмы, как GWO, PSO, GA и SSA являются мощными и эффективными алгоритмами, которые полезно использовать для решения широкого спектра оптимизационных задач. Выбор алгоритма зависит от конкретной задачи и требований к производительности. Так, например Генетический алгоритм является более ресурсозатратным, что также влечёт за собой скорость/время сходимости [335].

В результате анализа особенностей данных алгоритмов, в частности при рассмотрении требований к скорости сходимости, простоте (в том числе при настройке параметров), предлагается использовать алгоритм стаи серых волков (GWO, Grey Wolf Optimizer).

GWO - это метаэвристический алгоритм, который был вдохновлён социальным поведением серых волков. Серые волки - это социальные животные, которые живут в стаях, возглавляемых альфа-самцом. Метаэвристический алгоритм GWO имитирует социальное поведение серых волков, чтобы решить оптимизационные задачи - поиск экстремума целевой функции [335].

Алгоритм инициализирует популяцию волков (возможных решений) и оценивает каждого волка в популяции X_α , X_β , X_δ . Затем алгоритм итеративно обновляет положения волков на основе их текущих позиций и позиций других волков в стае. Таким образом, на каждой итерации алгоритма, в том числе финальной итерации, алгоритм в качестве результата будет выдавать 4 результата, которые по возрастающей будут отражать соответствующие устройства пригодные для последующего размещения типовых микросервисов услуг [335].

В GWO позиция каждого волка рассчитывается на основе следующих выражений (формулы 4.9-4.11).

$$D_\alpha = |C_1 X_\alpha - X(i)|, D_\beta = |C_2 X_\beta - X(i)|, D_\delta = |C_3 X_\delta - X(i)| \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} X_1 &= X_\alpha - A_1(D_\alpha), \\ X_2 &= X_\beta - A_2 * (D_\beta), \\ X_3 &= X_\delta - A_3 * (D_\delta) \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$X(x + 1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}, \quad (4.11)$$

где $[X_\alpha, X_\beta, X_\delta, X_\omega]$:

- альфа-волк (X_α): лучшее решение в популяции;
- бета-волк (X_β): второе лучшее решение в популяции;
- дельта-волк (X_δ): третье лучшее решение в популяции;
- омега-волки (X_ω): остальные волки в популяции.

При этом, X_i - позиция решения на соответствующей итерации i . Также $D_\alpha, D_\beta, D_\delta$ - вспомогательные векторы для расчёта соответственно значений X_1, X_2, X_3 .

Также на каждой итерации алгоритма обновляются коэффициенты A и C , согласно следующим выражениям (формулы 4.12-4.14).

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (4.12)$$

$$C = 2r_2 \quad (4.13)$$

$$a = 2 - \left(i \cdot \frac{2}{I}\right), \quad (4.14)$$

где a - параметр, линейно уменьшающейся от 2 до 0 на каждой итерации согласно выражению в формуле 4.14. r_1, r_2 - равномерно распределенные случайные числа от 0 до 1 и I - количество итераций.

Таким образом, параметрами, которые могут повлиять на эффективность алгоритма GWO являются количество волков, количество итераций, а также параметры a и C . При этом, величина C на каждой итерации обеспечивает диверсификацию алгоритма GWO. Где a - уменьшается линейно после каждой итерации [335].

Схема работы алгоритмы представлена на рисунке 4.3.

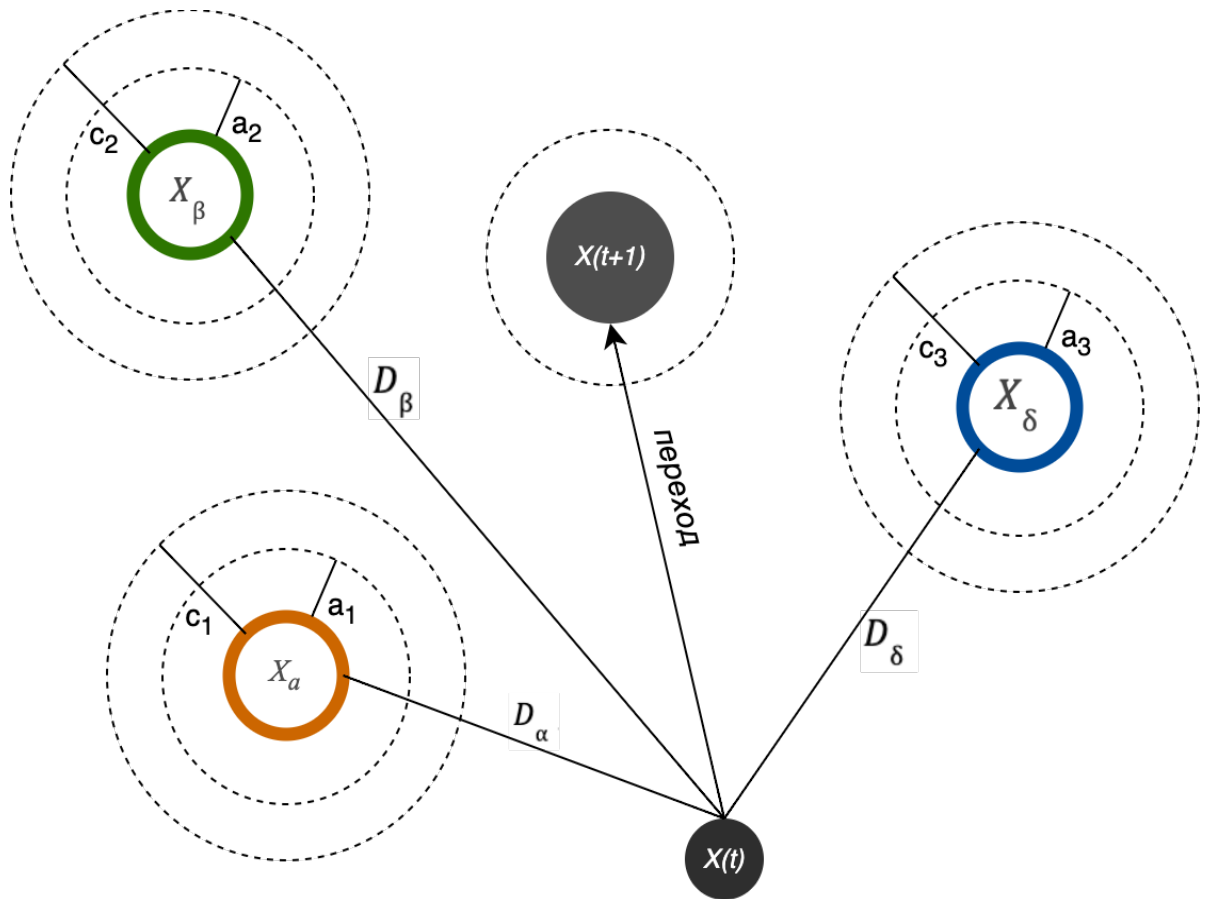


Рисунок 4.3 – Метаэвристический алгоритм стаи серых волков (GWO)

В таблице 4.2 данный метаэвристический алгоритм представлен в виде псевдокода.

Таблица 4.2 – Псевдокод алгоритма стаи серых волков

<i>GWO - Grew Wolf Optimizer</i>
0: BEGIN
1: Инициализация популяции GWO – $X_i (i: = 1, 2, \dots, n)$;
2: Инициализация GWO-параметров: a, A и C ;
3: Расчёт целевой-функции F_X для каждого агента;
4: <i>/* комментарий:</i>
5: X_α – лучший агент
6: X_β – второй лучший агент
7: X_δ – третий лучший агент
8: X_ω – остальные агенты

```

9: */
10: Нахождение 3-х лучших  $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ ;
11: While достижение критерия do
12:   for каждого агента do
13:     Обновление позиции согласно с формулой (11);
14:   end for
15:   обновить  $a, A$  и  $C$ ;
16:   расчет  $F_x$  фитнес-функции для каждого агента;
17:   обновление  $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ ;
18: end while
19: вернуть значение  $X_\alpha$ , лучшее значение  $F(X_\alpha)$ , а также значение на последней
    итерации алгоритма  $[X_\beta, X_\delta, X_\omega]$ ;
18: END.

```

Резюмируя, алгоритм GWO - это мощный и эффективный алгоритм, который можно использовать для решения широкого спектра оптимизационных задач, в том числе для поиска группы значений экстремумов функции, в том числе целевой функции, описывающей каждое из -устройств туманных вычислений в туманности или кластере [335].

4.5. Результаты моделирования предложенного метода

Для моделирования было проведено предварительное натурное исследование существующих платформ [335]:

- kata;
- firecracker;
- wasm;
- docker;

Тестирование проводилось базе серверного оборудования лаборатории Meganetlab 6G кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ.

Для исследования были выбраны два метода распределения поступающей нагрузки:

1. *Метод 1.* Каждый новый запрос, входящий на агент (брокер/шлюз) направлялся на типовой микросервис/контейнер, который обслуживал запросы в порядке очереди FIFO;
2. *Метод 2.* Каждый новый запрос входящий на агент обслуживался вновь созданным клоном типового микросервиса, после чего данный клон уничтожался. Таким образом система гибко масштабировалась под рост нагрузки.

Для этого рассматривался пример работы типового микросервиса, который был представлен в виде контейнера и решал типовую задачу - расчет числа Пи. Для проведения натурных экспериментов было разработано специальное программное обеспечение на языке программирования python, которое позволяло отслеживать нагрузку, управлять ПО исследуемых платформ, а также записывать данные о работе всех систем. Что позволило сформировать достаточный набор данных для проведения последующего анализа.

На рисунке 4.4 в виде пузырьковой диаграммы отражены результаты тестирования первого метода на реальном стенде, где были развернуты платформы и реализованы типовые контейнеры [335].

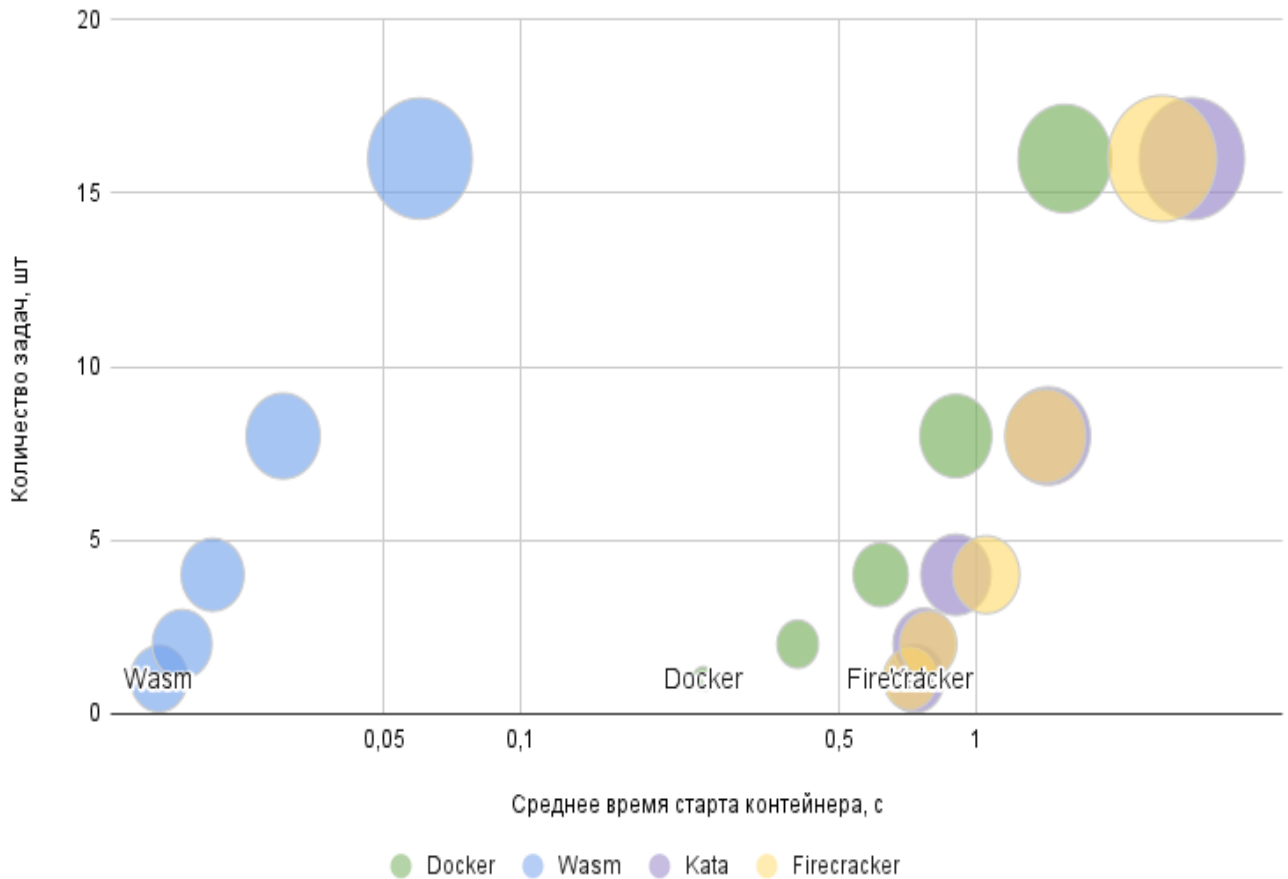


Рисунок 4.4 – Результаты эксперимента по методу 1

На рисунке 4.5 в виде пузырьковой диаграммы отражены результаты тестирования второго метода на реальном экспериментальном стенде, где при поступлении новой задачи происходил принудительный старт нового контейнера в кластере, и задача выполнялась параллельно [335].

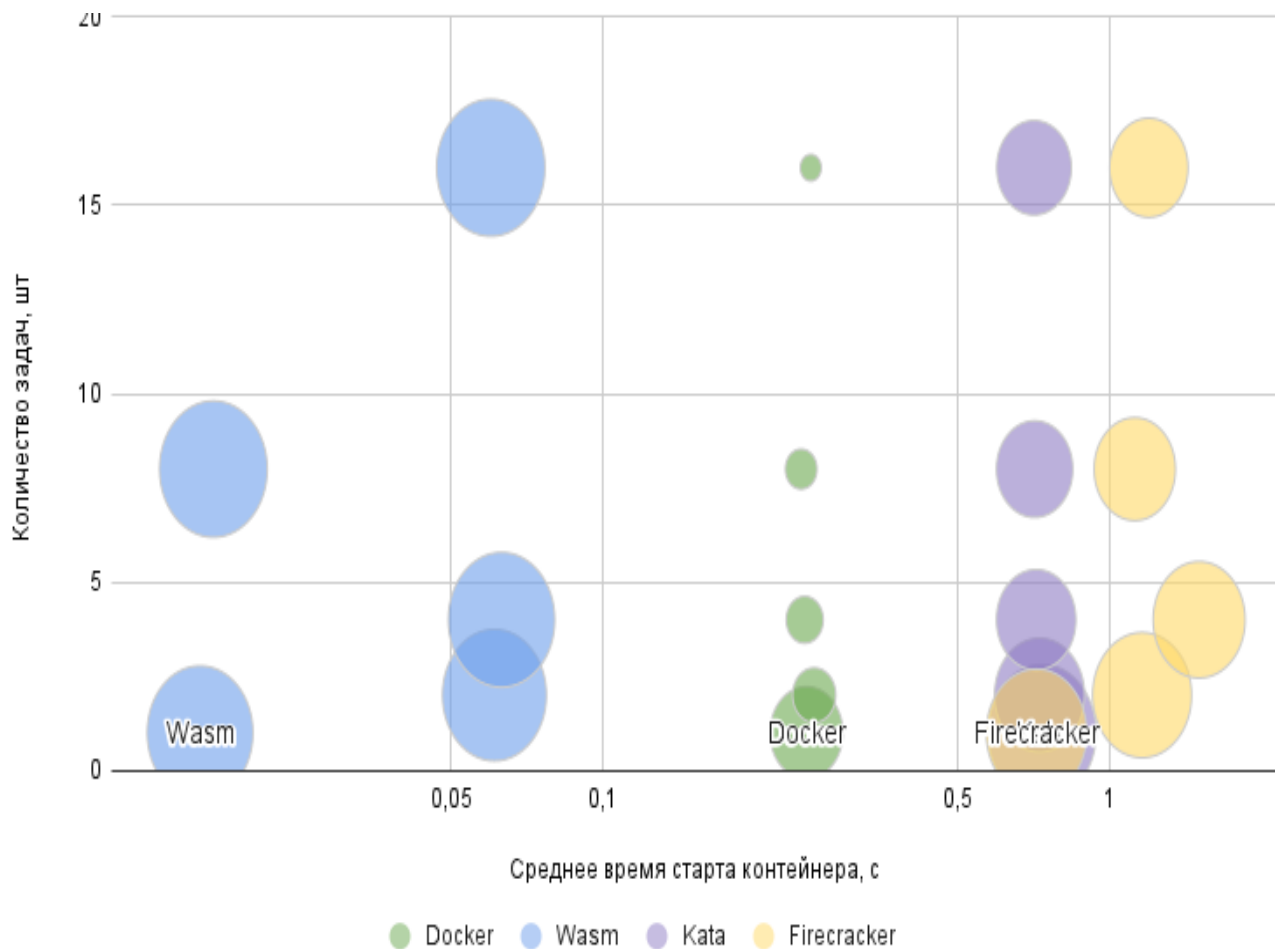


Рисунок 4.5 – Результаты эксперимента по методу 2

На рисунке 4.4 и 4.5 размер пузырька является средним временем решения типовой задачи, вычисленным на базе пяти повторных экспериментах.

При этом, ось абсцисс представлена в логарифмическом масштабе на обоих рисунках. Представленные графики позволяют визуальнo оценить возможности существующих решений контейнеризации для сегментов Туманных вычислений, учитывая различные подходы к распределению вычислений в микросервисной архитектуре [335].

Согласно рисунку 4.5, Docker при росте нагрузки и сравнительно равным (в меньше степени изменяющимся) временем старта нового контейнера для каждый задачи, уменьшает время реализации типовой задачи. При этом Docker находится на втором месте после Wasm, относительно времени старта типowego контейнера [335].

Для дальнейшего моделирования были взяты за основу данные, которые измерялись на стенде при работе Docker-контейнеров ввиду эффективности их работы при возрастающих нагрузках и большом количестве типовых микросервисов, что может быть свойственно Туманным вычислениям.

Полученные экспериментальные данные легли в основу набора данных T_r и T_c , которые были составлены для 100 устройств туманных вычислений, при этом структура этих данных была согласована с целевой функцией, представленной ранее (формула 4.8). При этом для визуализации данных, параметр устойчивости узла был установлен в виде константы $S = const = 1$, а коэффициенты k_1 , k_2 и k_3 равными 0,33.

Результаты моделирования устройств туманных вычислений представлены на рисунке 4.6. Ось абсцисс - это значение $k_1 T_r$, ось ординат представляет значение $k_2 T_c$, а ось аппликат, соответственно, - это значение целевой функции F [335].

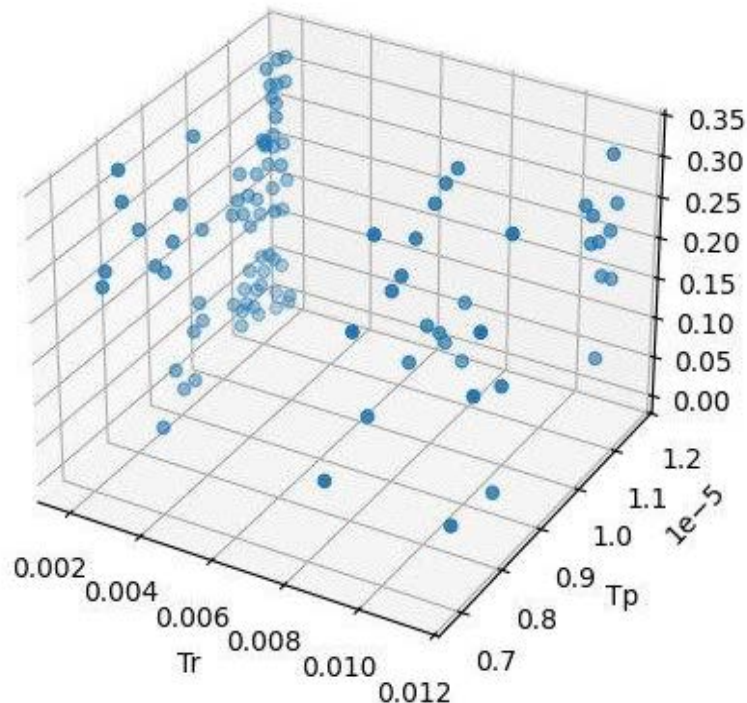


Рисунок 4.6 – Результаты моделирования устройств туманных вычислений

После чего, на поле данных выше смоделированных устройств туманных вычислений была применена программная модель стаи серых волков (GWO), разработанная также на языке программирования Python (реализация представлена в разделе “Приложение А” диссертации).

Результат поиска группы устройств с помощью данного алгоритма представлен на рисунке 4. 7.

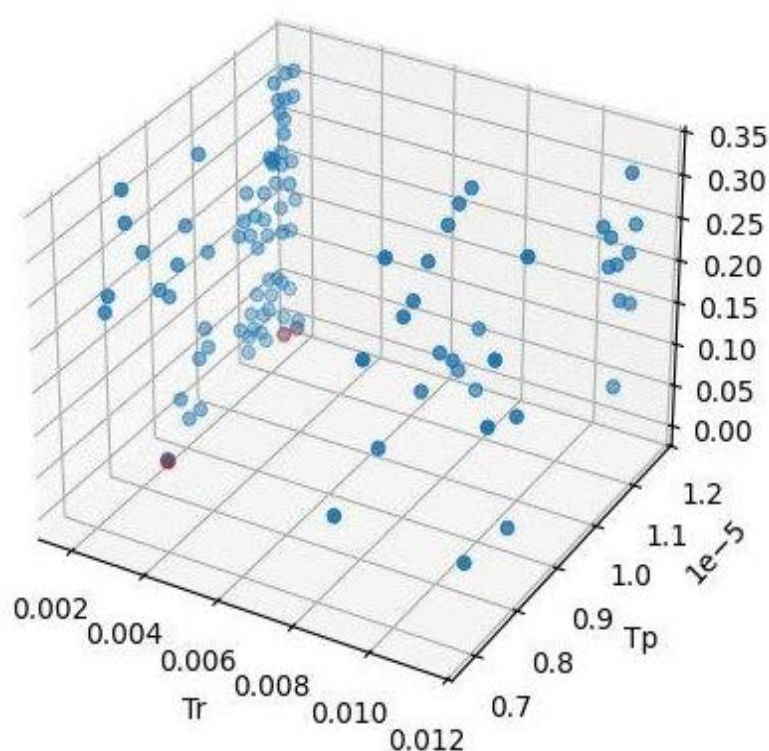


Рисунок 4.7 – Результат моделирования работы алгоритма GWO

В результате поиска устройств были найдены основные три устройства, выделенные фиолетовым цветом на рисунке 4.7, а четвёртое устройство является первое устройство во множестве данных ω [335].

4.6. Оценка эффективности предложенного метода

Для оценки эффективности предложенного метода выше, предлагается сравнить алгоритм GWO с алгоритмом PSO, который также является одним из

эффективных с точки зрения скорости схождения и затрат вычислительных ресурсов. Ниже представлено описание данного алгоритма.

Каждая отдельная частица i в алгоритме PSO состоит из трёх векторов:

- её положение в D -мерном пространстве поиска

$$\bar{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD});$$

- при этом, лучшая найденная позиция,

$$\bar{p}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD});$$

- направленная скорость движения $\bar{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$.

При запуске алгоритма частицы равномерно, случайным образом инициализируются по всему пространству поиска, при этом скорость частиц также инициализируется случайным образом.

Сформированные частицы перемещаются по пространству поиска с помощью довольно простого набора уравнений обновления векторов частицы. Алгоритм обновляет весь рой на каждом временном шаге, обновляя скорость и положение каждой частицы в каждом измерении по следующим правилам (формулы 4.15-4.16):

$$v_{id} = v_{id} + c\varepsilon_1(p_{id} - x_{id}) + c\varepsilon_2(p_{gd} - x_{id}) \quad (4.15)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id}, \quad (4.16)$$

где c – константа со значением 2. А 0, 1 и 2 – независимые случайные числа, уникально генерируемые при каждом обновлении для каждого отдельного измерения от $d=1$, до D ;

p_{gd} – это положение, найденное любой соседней частицей. Процесс обновления кратко описан в алгоритме, представленном в виде таблицы 4.3 в формате псевдокода.

Таблица 4.3 – Псевдокод алгоритма PSO

Алгоритм роя частиц (PSO)
<pre> for каждого шага t do for каждой частицы i в рое do обновить позицию x_t используя выражения (4.15) и (4.16) рассчитать фитнес-функцию для x_t $f(x_t)$ обновить p_i , p_g end for end for </pre>

Стоит отметить, что в алгоритме скорость частиц фиксируется на максимальном значении v_{max} . Без фиксации, алгоритм склонен не сойтись, где расчёт значений (4.15) и (4.16) приводил бы к быстрому увеличению скорости и, следовательно, положения частиц, приближающиеся к бесконечности.

Параметр v_{max} не позволяет системе войти в данное состояние, ограничивая скорость всех частиц.

Для оценки эффективности алгоритмов была проведена серия экспериментов, где отслеживалось время схождения алгоритмов, то есть время поиска устройств для последующей миграции группы типовых контейнеров.

Функция счета времени была реализована в разработанном программном коде самой модели на языке Python. Результаты сравнения представлены на рисунке 4.8.

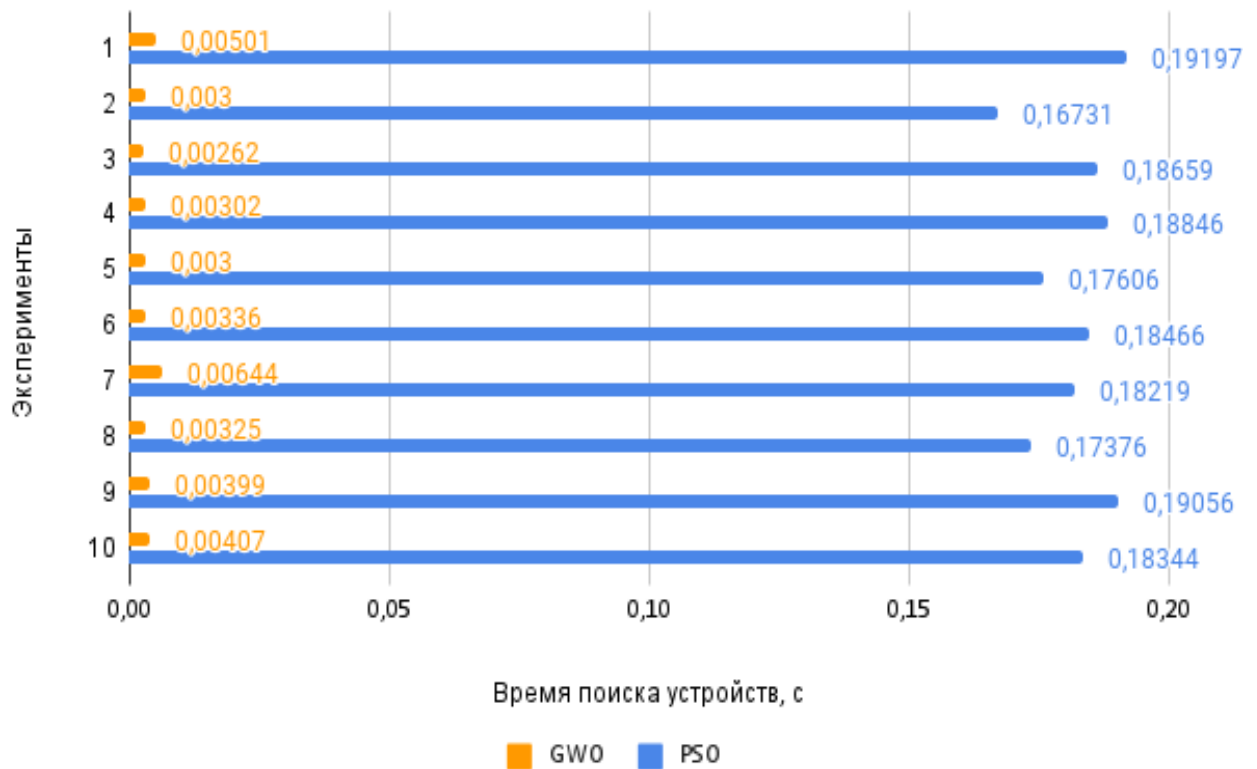


Рисунок 4.8 – Сравнение алгоритмов PSO и GWO

Проведённые эксперименты показали следующие результаты [335]:

- среднее время в течении 10-ти экспериментов по алгоритму PSO составило 0,18249 секунды, в то время когда по алгоритму GWO среднее значение времени составило 0,00377 секунды, что меньше примерно в 48 раз;

- также стоит учесть, что PSO в результате работы выдавал значение глобального экстремума целевой функции, то есть находил одно устройство, наиболее подходящее для миграции контейнера, в то время, как GWO позволял найти группу устройств $(\alpha, \beta, \delta, \omega)$ соответственно;

Стоит отметить, что данное сравнение алгоритмов актуально в рамках исследуемой задачи. Как ранее было приведено в теоретической части, метаэвристические алгоритмы обладают своими особенностями ввиду своей “проекции” с биологического мира, примерами которого они были вдохновлены. Соответственно, PSO может быть также достаточно эффективным решением в рамках других условий задачи [335].

4.7. Выводы по Главе 4

В главе 4 были представлена существующая проблематика воздействия на окружающую среду в результате масштабного роста центров обработки данных. Были приведена краткая справка о существующих работах в данной области на международном уровне.

В главе также отражены аспекты применения бессерверной архитектуры в динамических туманных вычислениях. Определено, что данный тип архитектуры позволит достичь более эффективного использования ресурсов, особенно в динамических туманных вычислениях. Переход к бессерверной архитектуре позволит произвести типизацию микросервисов, что сможет породить новые системные и бизнес модели, например “шеринг микросервисов”.

В главе была представлена разработанная модель сети туманных вычислений для поиска группы устройств с целью последующей миграции группы контейнеров бессерверной платформы, где миграция группы типовых контейнеров является одним из сценариев предоставления высконагруженных услуг в динамических туманных вычислениях, облачная архитектура которых соответствует бессерверному типу.

Одним из результатов решения задачи в данной главе является представленный разработанный метод миграции групп типовых контейнеров в бессерверной архитектуре. Для апробации которого были проведены дополнительные натурные эксперименты на базе инфраструктуры лаборатории MeganetLab 6G кафедры ССиПД СПбГУТ, существующих открытых программных продуктов для платформ FaaS, данные тестирования которых использовались при дальнейшем моделировании разработанного метода, что позволило приблизить условия моделирования к натурным.

Для оценки предложенного метода был разработано программное обеспечение, которое позволило провести оценку эффективности предложенного метода миграции группы типовых контейнеров по сравнению с применением другого метаэвристического алгоритма. Результат оценки показал, что

предложенный метод позволил уменьшить время принятия решения о миграции в десятки раз по сравнению с известным метаэвристическим алгоритмом роя частиц.

ГЛАВА 5. ЗАДАЧА МАРШРУТИЗАЦИИ В ДИНАМИЧЕСКИХ ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ

5.1. Введение

Исследования в области интегрированных/гибридных сетей ИМТ-2030 и услуг телеприсутствия показали повышение потребности в вычислительных ресурсах для перспективных услуг, поиске более эффективных методов распределения задач, эффективных моделей интегрированных сетей, поиске решений в задачах управления ресурсами на основе ИИ и др [343]. Ранее было отмечено, что в существующей стратегии развития отрасли связи Российской Федерации (распоряжение Правительства РФ от 24 ноября 2023 года №3339-р) приводится прогноз дальнейшего увеличения объёма глобального Интернет трафика в среднем на 30% в год, что может привести к росту в 30 раз в 2035 году, если сравнивать с 2022 годом. Следовательно, можно отметить возрастающую роль цифровых решений для обеспечения эффективности во всех отраслях экономики, в том числе тех решений, которые позволят более грамотно распоряжаться существующими ресурсами без необходимости лавинного и масштабного внедрения новых центров обработки данных и т.д. Как уже было отмечено, активное развитие микроэлектроники и повышению мощности вычислительных чипов, появление мощных графических процессоров в том числе с нейромодулями/нейропроцессорами, появилась возможность перехода к следующему уровню декомпозиции архитектуры облачных вычислений [344]. Использование сетевых устройств последней мили, а также конечных пользовательских устройств в качестве вычислительных узлов, сформировали новый вид распределенных облачных вычислений - туманные вычисления.

Исследования в области туманных вычислений в большинстве своём направлены на задачи архитектур, проблемы обнаружения устройств, их управлением и мониторингом. Отдельный класс задач в туманных вычислениях направлен на обеспечение эффективного пользования вычислительными ресурсами. Часть из озвученных направлений также затронута в данной

диссертации. Существуют также публикации, которые освещают различные сценарии использования туманных вычислений, в перспективе современных и будущих сетей связи и их услуг. Основной тематикой всё же является оптимизация ресурсов и их интеграция в интегрированные сети, с поддержкой земного, морского, воздушного и космического сегмента.

Ранее, в п. 1.3 главы 1 и п.п. 2.2-2.3 второй главы диссертации поднимались существующие архитектурные вызовы, во второй же главе было представлено дерево задач, в виде ментальной карты, где системный подход, отражающийся в постепенном решении выдвинутых задач, позволит достичь ускоренного внедрения данной технологии. При этом было отмечено, что туманные вычисления позволят достичь решения существующих проблем в цифровом разрыве и предоставления услуг, естественно вкупе с интегрированной архитектурой сети. Одной из существующих задач, которая в первую очередь актуально для динамических туманных вычислений, является задача маршрутизации в сегменте/кластере и между ними, в условиях динамичности устройств, изменяющийся топологии сегмента. Напомним, что для данного типа туманных вычислений, топология сети может строиться на основе ячеистого принципа, который хорошо себя зарекомендовал во всепроникающих сенсорных сетях.

Как уже неоднократно было отмечено, динамические туманные вычисления представляют собой концептуально противоречивую технологию:

- с одной стороны это вычислительный(-ые) кластер(-а), применимые в том числе для услуг URLLC/HURLLC;
- с другой стороны кластера составляются на базе устройств, которые изначально являются конечным пользовательским оборудованием с ограниченным объёмом ресурсов, в том числе ограниченным энергоресурсов (батареей)

Следовательно, большинство возникших задач в туманных вычислениях истекают от вышеуказанной противоречивости. С другой стороны, мощностные характеристики пользовательских устройств за последние 10 лет выросли в разы, с увеличением потребности конечных приложений, но в тоже время пользователи

редко используют все возможные вычислительные характеристики своих устройств.

Ввиду существующих ограничений в вычислительных, сетевых и энерго ресурсах устройств динамических туманных вычислений, а также особенностей данных сетей (динамичность устройств), существует задача поиска новых более эффективных методов маршрутизации данных в сети кластера(-ов), в том числе данных при миграции микросервисов.

Таким образом, научной задачей, исследуемой и решаемой в третьей главе является разработка метода миграция микросервисов на основе разработки протокола маршрутизации в сети связи с использованием технологий туманных вычислений который мог бы обеспечивать эффективное функционирование сетей связи пятого и последующих поколений.

Основной вклад в данной главе заключается в разработке метода миграции микросервисов на основе разработанного протокола маршрутизации в среде динамических туманных вычислений, обеспечивающий учёт весов не только ребер графа, но и весов самих устройств туманных вычислений, что позволило по сравнению с существующими, достичь снижения потребляемой энергии устройствами туманных вычислений на 41% и уменьшить долю потерянных пакетов в среднем до 34%.

Глава организована следующим образом:

- в разделе (2) главы раскрыта проблематика маршрутизации в сети динамических туманных вычислений;
- в разделе (3) главы представлены разработанная модель и метод маршрутизации в сети динамических туманных вычислений, в том числе для решения задачи миграции микросервисов в условиях ячеистой топологии кластера туманных вычислений;
- в разделе (4) главы представлены результаты моделирования предложенного метода, а также результаты оценки эффективности предложенного метода, по сравнению с двумя другими (стандартным и распространенным

протоколом, а также усовершенствованным протоколом, опубликованным в научной статье).

- в разделе (5) представлены выводы по главе.

5.2. Маршрутизация в сети динамических туманных вычислений

На данный момент развития сетей связи существуют различные методы маршрутизации, в частности динамической маршрутизации, которые основаны в первую очередь на данных о наличии маршрутов [344]. При этом каждый маршрут имеет свою характеристику. Соответственно эти данные хранятся в маршрутизаторах и распределены в сети. Например, в основе известных протоколов можно встретить такие алгоритмы, как [344]:

- Distance Vector (DV, с англ. вектор расстояний). Каждый маршрутизатор в сети хранит вектор расстояний до всех других сетей в сети. Ярким примером является протокол RIP.

- Link-State (LS, с англ. состояние соединения). Здесь каждый маршрутизатор собирает данные о состоянии всех соединений в сети и после вычисляет кратчайший путь до других сетей. Примерами могут служить достаточно известные и часто применимые протоколы IS-IS или OSPF.

- Path Vector (PV). Данные алгоритмы похожи алгоритмам DV и при этом используют в дополнение информацию о маршрутах, а не только о существующих расстояниях. Примером протокола маршрутизации может послужить BGP.

Выше в качестве примеров были приведены алгоритмы протоколов, относящиеся к опорным пакетным сетям связи. В то же время, с приходом концепции Интернета вещей, всепроникающих сенсорных сетей [344] и предшествующей им концепции M2M, были разработаны новые протоколы маршрутизации, которые предназначаются в первую очередь для беспроводных сетей связи, обладающих функцией адаптации/самоорганизации (предполагалась возможная динамика узлов сети, их гибридный режим работы с возможностью “сна” устройств и изменение архитектуры сети). Так, в качестве одного из критериев при

разработке алгоритмов маршрутизации в сенсорных сетях, является энергоэффективность протоколов, которая выражалась в потреблении электроэнергии узлов ввиду ограниченности. При этом, перед некоторыми узлами сенсорных сетей поставлена задача срока службы от одного батарейного элемента до десяти лет.

В следствие данного требования и других особенностей сенсорных сетей, протоколы маршрутизации стали иметь реактивный характер работы. То есть маршруты не хранятся в таблицах, а строятся заново при возникновении данной потребности [344].

В качестве примера одного из таких алгоритмов можно привести алгоритм маршрутизации AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector), где каждый узел сети самостоятельно строит маршрут в условиях архитектуры ячеистой сети. Для примера также стоит рассмотреть протокол RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks), стандартизированный в IETF как RFC 6550. Как в названии отмечено, данный протокол в первую очередь направлен на Low-Power and Lossy Networks (LLN) - сетей, где устройства могут иметь достаточно ограниченную мощность и склонны к потерям пакетов ввиду различных факторов [344].

В основе протокола RPL лежат направленные ациклические графы DODAG (Destination Oriented Directed Acyclic Graph). Соответственно, данный протокол образует древовидную топологию, называемую DAG (Directed Acyclic Graph). При этом, каждый узел в сети RPL имеет предпочтительный родитель, который действует как шлюз. Для оценки маршрутов, протокол использует две целевые функции на основе оценки потери пакетов и на основе оценки количества переходов [345].

Отличительной возможностью RPL является "energy-aware routing", то есть маршруты в сенсорной сети выбираются с учётом энергопотребления узлов. Алгоритмы маршрутизации позволяют учитывать характеристику узлов сети. Например, такие параметры как: остаточный заряд батареи, уровень сигнала и расстояние до соседних узлов. Соответственно данный протокол один из тех

гибридных решений в маршрутизации, которое позволяет учитывать не только “стоимость” маршрута/соединения между узлами, но и их возможность.

Представленный выше достаточно краткий обзор существующих подходов к маршрутизации позволяет оценить объёмы проведённых исследований и разработок в области задачи определения оптимальных маршрутов для передачи трафика. В дополнение стоит отметить концепцию программно-конфигурируемых сетей, которая в вопросах маршрутизации имеет свои отличительные возможности, основанные на принципе централизации управления сегментом сети и наличии карты сети и её ресурсов у единого элемента мониторинга и управления - контроллера SDN [344, 346].

Стоит отметить, что вышеприведённые протоколы, в первую очередь направлены на выстраивание маршрута для передачи данных при различных архитектурах и сценариях работы сети: древовидная, ячеистая. Туманные вычисления, в частности рассматриваемые динамические туманные вычисления имеют достаточно противоречивую сущность. Как уже было в начале главы отмечено: с одной стороны, это сеть из вычислительных устройств, представляющих собой вычислительный кластер для развёртывания программного обеспечения услуг, с другой стороны - это сеть динамически передвигающихся в пространстве устройств с ограниченными физическими ресурсами (мощность и энергия), а также ограниченными вычислительными и сетевыми ресурсами, что больше напоминает самоорганизующиеся сенсорные сети.

Стоит отметить, что кроме задачи в области обеспечения связности сети устройств для передачи данных, особо остро стоит вопрос в служебной маршрутизации в сети динамических туманных вычислений. Для обеспечения работы кластера туманных вычислений, с учётом требований качества обслуживания QoS, необходимо предусмотреть реализацию процессов живой миграции контейнеров микросервисов [344].

Теме миграции микросервисов на данный момент посвящено немало научных работ, в основном, где ставится задача определения узла в

вычислительном кластере для последующей миграции контейнера услуги. Существуют также патенты, например [347].

Вопросу маршрутизации в туманных вычислениях посвящены ряд работ, где в большинстве своём рассматриваются частные сценарии реализации туманных вычислений и их интеграции с другими технологиями, такими как программно-конфигурируемые сети, а также виртуализация сетевых функций.

В данной главе поднимается вопрос обеспечения эффективной маршрутизации в динамических туманных вычислениях для решения задачи живой миграции микросервиса в сценарии D2D-взаимодействия (с англ. device-to-device, взаимодействие тип “устройство-устройство”) узлов без предварительного копирования контейнера с централизованного хранилища.

5.3. Разработка модели и метода маршрутизации

В рамках поставленной задачи была разработана модель сети динамических туманных вычислений, где реализуется процесс миграции контейнера микросервиса.

Разработанная модель представлена на рисунке 5.1.

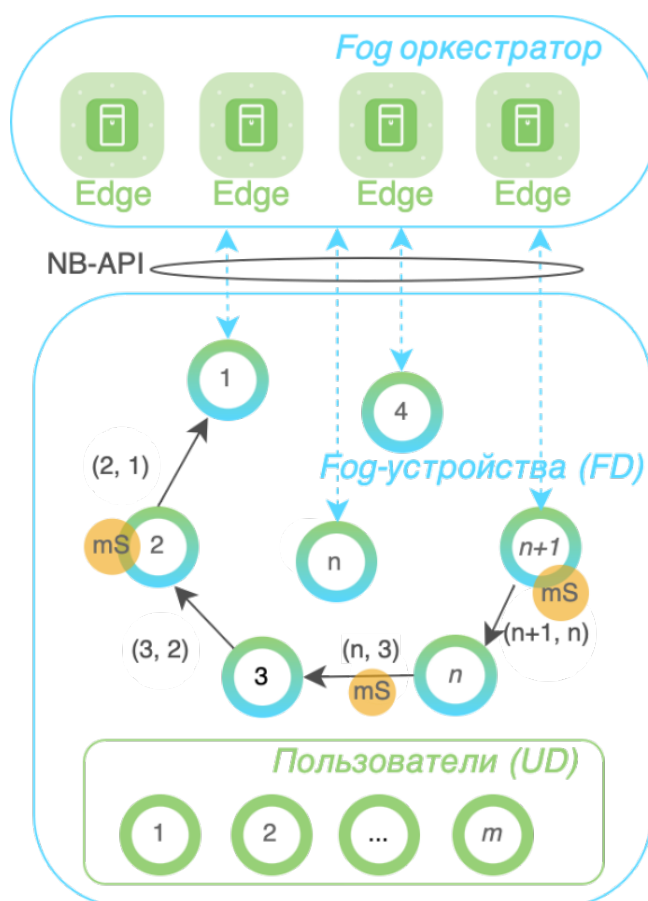


Рисунок 5.1 – Разработанная модель сети динамических туманных вычислений при миграции микросервиса

На модели (рисунок 1.5) представлены следующие элементы [344]:

1. устройства туманных вычислений - *FD* (Fog Devices). Соответственно, представлены следующим набором: FD-1, FD-2, FD-3, FD-4, FD-n, FD-(n+1);
2. пользователи *UD* (User Devices), Представлены набором UD-1, UD-2, UD-m;
3. микросервис *mS*, располагающийся на устройствах FD-(n+1), FD-2 и мигрирующий между устройствами FD-n и FD-3;
4. *Fog orchestrator* (оркестратор инфраструктуры туманных вычислений), который представлен набором серверов граничных вычислений - “Edge”;
5. NB-API (Northbound Application Programming Interface) - северный программный интерфейс, который обеспечивает связь между FG и соответствующим оркестратором Fog. На рисунке приведены примеры связи между оркестратором и FD. Для полноценной работы сегмента Туманных

вычислений, каждое устройства FG имеет соответствующую связь с оркестратором через NB-API для обмена в первую очередь служебной информации.

В условиях динамических туманных вычислений, в первую очередь рассматривается архитектура сети, где туманные устройства коммуницируют согласно принципу D2D (device-to-device), соответственно, важнейшей задачей здесь является выбор транзитных узлов для пересылки пакетов от отправителя к получателю. Таким образом, главной характеристикой маршрута принимается стоимость миграции через него, и стоимость маршрута рассчитывается на основании группы важных параметров состояния сети [344].

Ряд параметров относятся к определяющим QoS, на данный момент обозначенных как:

1. использование ресурсов процессора узла;
2. использование ресурсов оперативной памяти узла;
3. доля потерянных пакетов при передаче данных через канал связи;
4. задержка при передаче данных через канал связи.

Набор данных параметров отслеживается в реальном времени с помощью служебного северного API (application programming interface, с англ., программный интерфейс. Обычно обозначается так интерфейсы прикладного уровня) и пересылаются по сети по служебным каналам связи к оркестратору туманных вычислений, который связан через служебные API с E2E оркестратором (в т.ч. с оркестратором федеративного MEC через MEFB модуль), оркестратором автономной сети.

Таким образом, имея полную картину по нагрузке сети, а также анализ изменения спроса на тот или иной узел, в том числе микросервис, оркестратор туманных вычислений контролирует процесс миграции контейнеров [344] и/или виртуальных машин (зависит от облачной среды, на практике для таких задач более выгоден с точки зрения ресурсных затрат - контейнеры).

Вся получаемая статистика с устройства FD записывается в соответствующее хранилище данных и анализируется, и при возникновении необходимости в миграции микросервиса запускается алгоритм определения наиболее

эффективного маршрута, с учётом как самих возможных путей, так и возможности самих транзитных узлов [344]

В работе [348] был определён алгоритм миграции микросервиса на базе анализа группы параметров. В частности, были исследованы вышеприведённые параметры и составлена целевая функция для расчёта оценки пути.

Отслеживаемые в данном случае характеристики состояния назовём метриками, учитываемыми предлагаемым протоколом. Некоторые из них также учитываются при расчёте уровня качества обслуживания (QoS). Рассмотрим их [344]:

- *Задержка на канале (D_{FD-n}) связи между узлами $FD(n+1)$ и $FG-n$.* Данная метрика измеряется с помощью специальных служб операционной системы и служебного ПО ведомой ноды оркестратора, запущенного на каждом узле. Измеряется в миллисекундах. Данные о задержке, при передаче данных через канал связи, являются достаточно важным параметром, так как миграция должна происходить достаточно быстро, чтобы остановка сервиса, перенос страниц его памяти и состояния, а также возобновление работы в новой среде, были незаметны для пользователей [344];

- *Доля потерянных пакетов (PL_{FD-n}) на канале связи между узлами $FD(n+1)$ и $FG-n$.* Данная метрика измеряется с помощью специальных служб, запущенных на каждом узле. Измеряется в процентах. Важно знать долю потерянных пакетов при передаче данных через канал связи, так как доставка микросервиса на устройство назначения должна быть гарантированной. Соответственно, недопустимо долгое ожидание завершения миграции в том числе потому, что сервер, на который происходит миграция сервиса, резервирует для него необходимое количество ресурсов, невозможность использования которых на протяжении продолжительного времени, при не останавливаемом процессе обработки данных может вызвать увеличение времени отклика на запросы и сбои в работе сети [344];

- *Нагрузка процессоров (CPU_{FD-n}) и оперативной памяти (RAM_{FD-n}) узла $FD-n$;* Метрики измеряются посредством опроса каждого узла через оркестратор.

Измеряются в во флопсах и килобайтах соответственно. Важно знать нагрузки процессора и оперативной памяти узла в активном состоянии, так как при предельном количестве используемых ресурсов у устройства может не хватить оставшихся для приёма и пересылки пакетов при миграции микросервиса [344].

Таким образом, выбор маршрута включает соответствующий процесс взаимодействия оркестратора сети динамических туманных вычислений и n -го устройства FG, сам же алгоритм выбора оптимального маршрута миграции микросервиса на базе расчёта целевой функции.

Алгоритм осуществляет сбор статистики по использованию сетевых и вычислительных ресурсов, хранение данной статистики и последующее вычисление оптимального маршрута миграции микросервиса среди всех доступных маршрутов от узла FD($n+1$) до FG- n . Данный процесс отражён на рисунке 5.2.

Исследуется следующая целевая функция (формула 5.1) для нахождения стоимости одного ребра:

$$f_{FD(n+1),FD-n} = CPU_{FD-n}w_{CPU} + RAM_{FD-n}w_{RAM} + D_{FD-n}w_D + PL_{FD-n}w_{PL}, \quad (5.1)$$

где определены следующие веса (формула 5.2):

$$\begin{aligned} w_{CPU} = w_D = w_{PL} &= 0,275 \\ w_{RAM} &= 0,175 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Исследование влияния данных весов на конечный результат, а также обоснование их значений представлено в работе [348]. Веса, используемые в целевой функции (формула 5.1) должны определяться с помощью метода сравнения совокупности объектов друг с другом или метода опроса экспертов, исходя из условий поставленной задачи;

Существующие веса были рассчитаны на основе метода парных сравнений. Сам метод парных сравнений предполагает сравнение всех исследуемых объектов

во всех возможных парах среди этих объектов по заданному соответствующему критерию. В контексте рассматриваемой задачи были выдвинуты следующие условия [348]:

1. Нагрузка процессора узла имеет больший приоритет, чем нагрузка оперативной памяти узла. В текущей задаче мощность процессора узла Туманных вычислений необходима для обработки процесса получения микросервиса и его пересылки к следующему участнику маршрута;

2. Нагрузка процессора узла приоритетом эквивалентна задержке канала связи и оценке потерянных пакетов на этом канале связи. Данные параметры в задаче выбора маршрута имеют одинаковую значимость и соответственно влияние на конечный результат;

3. Оперативная память узла Туманных вычислений имеет чуть меньший приоритет по отношению к задержке на канале связи и оценке потерянных пакетов на этом же канале связи;

4. Задержка канала связи и доля потерянных пакетов на этом канале связи имеют идентичную значимость.

Функция расчёта стоимости маршрута в общем виде [348] представлена следующей формулой (формула 5.3) [344].

$$F_{route}(1, n + 1) = \sum f_{FD(n+1), FD-n} \quad (5.3)$$

при этом искомый путь миграции микросервиса [348] в сети динамических туманных вычислений определяется как (формула 5.4):

$$route_{migration} = \min_{CPU, RAM, D, PL} \{F_{route}(1, n + 1)\} \quad (5.4)$$

Полученный маршрут (формула 5.4) принимается за эффективный и сообщается вместе с остальной служебной информацией (способ миграции, узел-отправитель, узел-получатель и т.д.) соответствующим узлам Туманных вычислений в сети по служебным каналам связи.

Узлы принимают от оркестратора соответствующие указания, после чего происходит миграция микросервиса с узла $(n+1)$ на узел 1 (см. рисунок 5.1). Таким образом, можно утверждать, что миграция микросервиса будет происходить по наиболее эффективному маршруту среди всех доступных в сети между узлами $FD(n+1)$ до $FG-n$ [344].

Диаграмма взаимодействия между узлом туманных вычислений и соответствующим управляющим оркестратором отражена на рисунке 5.2.

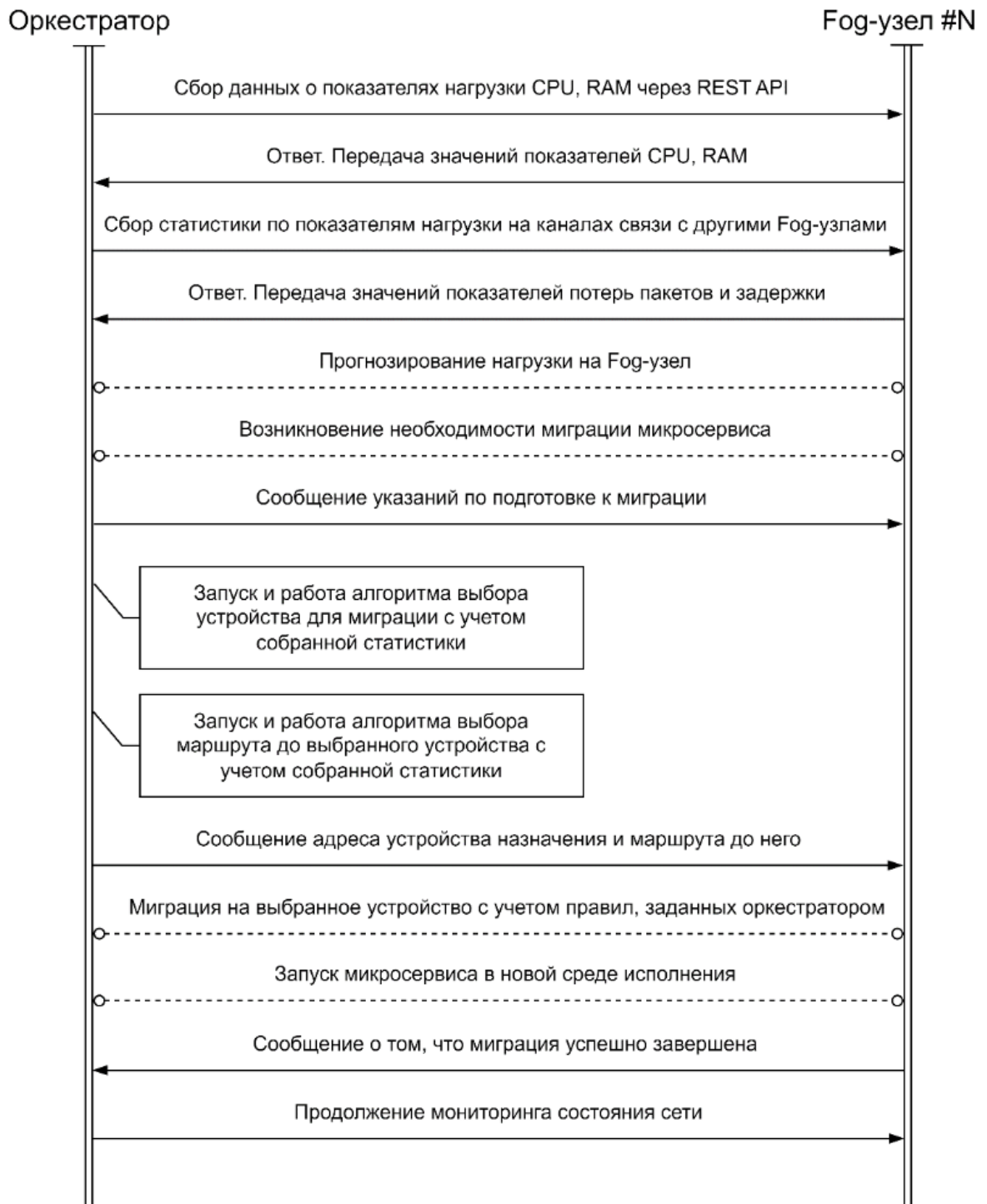


Рисунок 5.2 – Диаграмма взаимодействия [344]

Предлагаемый протокол маршрутизации микросервисов сети устройств туманных вычислений имеет также функционал обнаружения новых устройств для их последующего подключения к вычислительному кластеру [344].

Процесс обнаружения новых устройств в сети туманных вычислений является важной частью стабильного функционирования динамической сети туманных вычислений. Предполагается, что подключение нового устройства в сеть будет инициироваться самим новым устройством, путём регистрации на специальном сервере своих учётных данных для дальнейшего добровольного предоставления свободных ресурсов устройства под задачи обработки данных [344].

Отдельное внимание стоит уделить вопросу безопасности: необходимо обеспечить защиту от несанкционированного доступа в сеть туманных вычислений или подключение с целью нанесения ущерба, или хищения данных.

Эту проблему должна решить технология цифровых сертификатов, позволяющая однозначно верифицировать и идентифицировать конкретное подключаемое устройство. Данный вопрос сейчас активно обсуждается в работе 11 Исследовательской комиссии МСЭ-Т. Однако предположим, что вопрос безопасности решён и для подключения требуется пройти аутентификацию, не допускающую злонамеренных вторжений в сеть, к примеру на основе технологии токенов с ограниченным времени жизни [344].

Рассмотрим возможные состояния устройства на протяжении жизненного цикла этого устройства в качестве узла динамических туманных вычислений. На рисунке 5.3 представлена диаграмма состояний устройства.

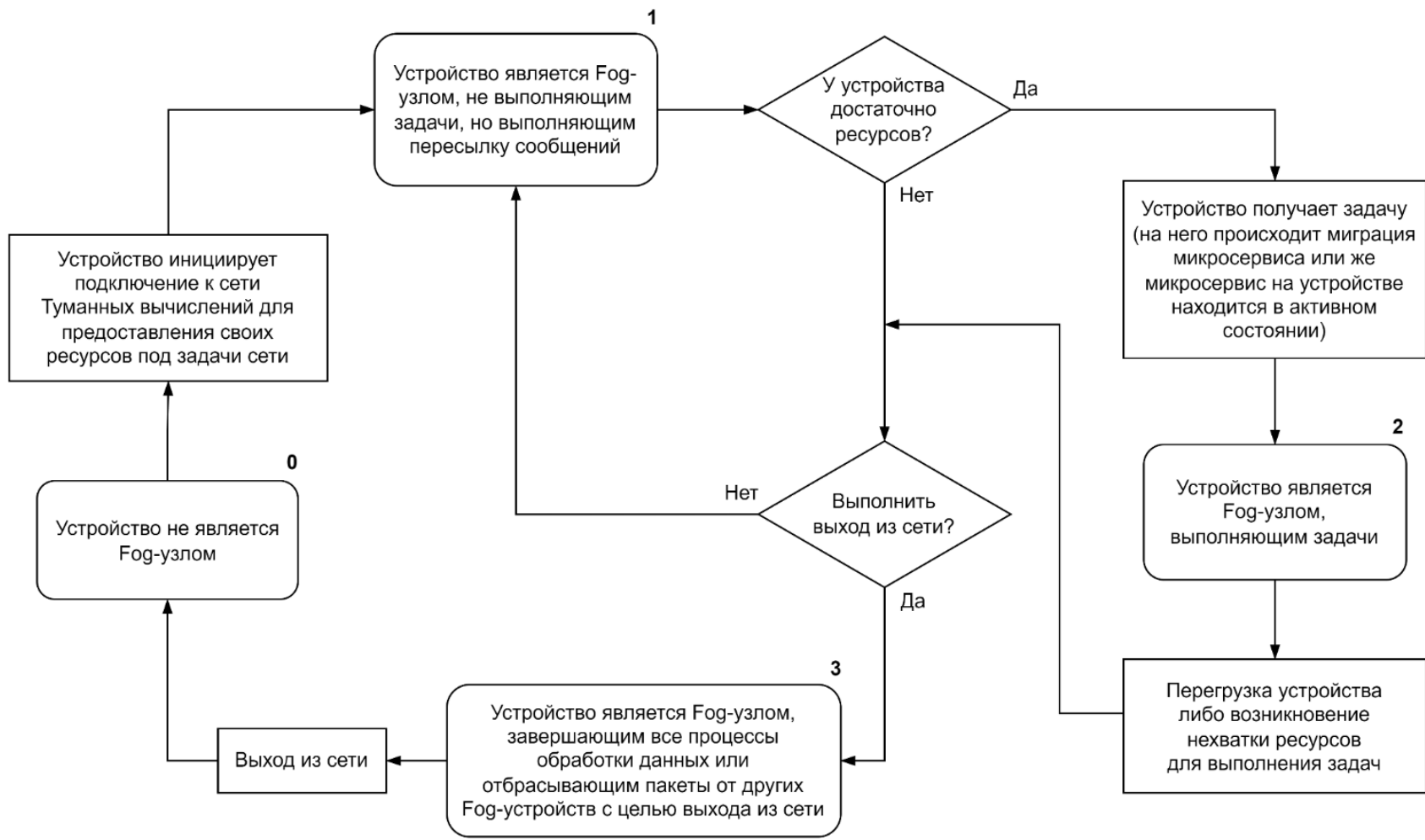


Рисунок 5.3 – Диаграмма состояния узла туманных вычислений

Рассмотрим возможные состояния устройства, представленные на рисунке 5.3 [344]:

Состояние 0 соответствует начальному состоянию узла, именно с него начинается жизненный цикл устройства в роли узла динамических туманных вычислений.

Далее единственным возможным действием, выполняемым для перехода в состояние 1, является включение режима “поделиться ресурсами”. После аутентификации устройства и его подключения к сети, как это было уточнено выше, устройство начинает считаться Fog-узлом и может выполнять пересылку пакетов, то есть узел переходит в состояние 1.

Перед миграцией микросервиса на устройство анализируется количество предоставленных им ресурсов, и если их достаточно, то решение о миграции и последующем выполнении задач будет принято. Если же ресурсов не хватает для решения задач обработки данных, узел будет оставаться в режиме пересылки сообщений, либо может принять решение о выходе из сети.

Предположим, что ресурсов достаточно и микросервис был перенесён на новый Fog-узел, после чего введён в активный режим, тогда узел переходит в состояние 2.

Стоит отметить, что хоть и принцип распределения ресурсов не должен допускать перегрузки узлов, все же такие ситуации исключать нельзя. Если узел, выполняющий задачу, теряет свою способность далее обеспечивать работу микросервиса, то может быть принято решение о выходе узла из сети, либо о переходе устройства в состояние 1, то есть в режим пересылки. Тогда устройство выполняет передачу задач иным узлам с помощью миграции микросервисов.

Если же было принято решение о выходе из сети, тогда устройство также передаёт задачи иным узлам, имеющим для этого достаточное количество ресурсов, все микросервисы с устройства перемещаются на другие Fog-узлы, после чего исходный узел покидает сеть и возвращается в состояние 0.

Состояние 3 соответствует завершению жизненного цикла устройства в роли Fog-узла.

Рассмотрим подробнее переход узла из состояния 0 в состояние 1 [344]. При подтверждении статуса «сдачи в аренду» своих вычислительных ресурсов устройство проходит авторизацию для подключения к сети. Предлагается предоставлять владельцу устройства выбор из двух вариантов подключения:

- прямое подключение на базовую станцию (далее - БС);
- и прямое подключение на БС с поддержкой D2D-коммуникаций по отношению к узлам-соседям.

В соответствии с выбранным вариантом подключения осуществляется тот или иной сценарий поведения исходного устройства как нового узла в сети Туманных вычислений. Рассмотрим упомянутые сценарии. Стоит также уточнить, что согласно модели, представленной на рисунке 1, оркестратор узла динамических туманных вычислений соответствующего сегмента, находится на граничном облаке Edge, которое располагается на самой БС или рядом с ней [344].

1. Сценарий №1 - прямое подключение на БС.

При прямом подключении на БС, сразу после верификации устройства и одобрения заявки на подключение, исходным узлом формируется сообщение Hello-E, направляемое на базовую станцию. Адрес БС сообщается узлу до отправки сообщения, после верификации. Так как пользователь сам инициировал подключение к сети, сервисы, осуществляющие это подключение, в том числе отвечают за первичную установку связи между БС и новым узлом сети, они и формируют сообщение. Сообщение Hello-E необходимо для передачи своего сетевого адреса только что подключённого к сети устройства. БС, при получении от устройства этого сообщения, формирует ответ, подтверждающий получение адреса узла. После получения ответа от БС, устройство воспринимает БС как шлюз для обмена данными с другими узлами сети Туманных вычислений.

2. Сценарий №2 - прямое подключение на БС с поддержкой D2D.

Этот процесс несколько отличается от первого описанного варианта. Помимо установки связи с БС, устройство отправляет широковещательное сообщение Hello-N, направленное на передачу своего адреса ближайшим узлам сети Туманных вычислений - возможным соседям. При этом, на полученное сообщение будут

реагировать только те из узлов, которые также поддерживают D2D, и при этом находятся в ближайшей зоне взаимодействия с исходным узлом - в пределах одного хопа (перехода). Это необходимо не только для того, чтобы поддерживать актуальную топологию сети при подключении к ней новых устройств, но и для возможности быстро устанавливать связь с соседними узлами, если они также поддерживают D2D. Туманные узлы в данном случае будут «общаться» напрямую, поэтому пакеты, отправляемые с устройства, не будут проходить через БС. Предполагается, чтобы через базовую станцию осуществлялась связь Туманных узлов с другими узлами сети, причём такими, которые находятся на расстоянии, большем, чем 1 прыжок (переход). Устройства, получившие пакет Hello, не пересылают его далее, а записывают адрес нового узла в свои таблицы маршрутизации, после чего каждый из них, в случае, если также поддерживает связь D2D, формирует ответ на сообщение Hello-N с информацией о своём адресе. Новое же устройство, получив ответ, записывает адреса из пришедших пакетов в свои таблицы маршрутизации, устанавливается дуплексная связь между узлами-соседями.

Если ни один узел не ответил на отправленное сообщение Hello-N, устройство в любой ситуации считает шлюзом для обмена данными с остальными узлами сети базовую станцию.

После подключения к сети через один из сценариев, устройство полноценно становится частью сети туманных вычислений, то есть переходит в состояние 1. Также другие узлы сети получают возможность производить миграцию различных микросервисов на новый узел, в зависимости от его доступных вычислительных ресурсов, а также использовать его как транзитный при передаче пакетов, если это необходимо [344].

5.4. Моделирование и оценка эффективности предложенного метода

Для апробации предложенного протокола и его анализа была разработана программная модель и реализованы ряд сценариев. Предложенный протокол для динамических туманных вычислений был реализован в среде моделирования NS-3.

Были рассмотрены два основных сценария:

1. *Взаимодействие “устройство UD - устройство FD”* (рис. 5.1) В первом сценарии производилась оценка эффективности предлагаемого протокола, когда устройства выгружают/распределяют свои задачи на FD-н. Для этого была рассмотрена топология из пяти устройств UD, подключённых к узлу туманных вычислений (FD);
2. *Взаимодействие “устройство FD - устройство FD”* (рис. 5.1) Во втором сценарии рассматривалось десять распределённых узлов туманных вычислений FD с различной подвижностью, движущихся по квадрату со стороной десять километров;

В таблице 5.1 представлены рассматриваемые параметры моделирования, использованные для настройки моделирования.

Таблица 5.1 – Параметры моделирования

Параметр	Значение
Сценарий I: UD-FD	1x1 км ²
Сценарий II: FD-FD	10x10 км ²
Количество устройств UD (N)	5
Количество устройств FD	10
Размещение MEC	равноудалённое
Скорость перемещения устройств FD	$V_i \in \{10, 20, 30, 40, 50\}$ км/ч
Дальность передачи	500 м
Максимальный уровень передачи	20 дБм

Параметр	Значение
Память/RAM	2048 Мб
Память/HDD	5 Гб
Процессор/ CPU	€ [0.7,2.4] ГГц
Максимальная рабочая нагрузка	50 событий/с
Скорость передачи данных	18 Мб/с

При выполнении моделирования рассматривались разнородные данные различных приложений. Например, исследовались такие данные, как: данные датчиков ИВ, обработка изображений, обработка видео и управление дорожным движением [344].

При этом, наборы данных для моделирования были составлены из открытых данных, представленных на интернет-ресурсах [349-353]. Сформированные наборы данных позволяют исследовать различные вычислительные задачи, от простых до сложных.

Задачи были разделены на четыре основные категории по сложности вычислений [344]:

1. Категория (I): Очень простые задачи, включая данные датчиков;
2. Категория (II): Простые задачи, эквивалентные обработке простых изображений и вебсайтов;
3. Категория (III): Задачи средней сложности, включая 3D-изображения и простые видеоролики;
4. Категория (IV): Сложные задачи, в том числе обработку видео высокого качества;
5. Категория (V): Высокосложные задачи, включая работу с 3D-видео.

В рамках моделирования, вычислительные задачи случайным образом распределялись между рассматриваемыми устройствами, при этом, выполнение каждой последующей задачи начиналось после выполнения предыдущей на узле.

Для оценки предлагаемого метода рассматривались три основных показателя производительности [344]:

1. Надёжность предложенного протокола оценивалась путём измерения количества успешно полученных пакетов. Коэффициент доставки пакетов (PDR - Packet Delivery Ratio) был рассчитан для предложенного метода и также сравнён с традиционными протоколами;

2. Энергоэффективность с точки зрения затрат энергии на задачу;

3. Задержка оценивалась через расчёт улучшения значения задержки обработки назначенных задач.

Следующее выражение (5.5) использовалось для расчёта процентного улучшения задержки по сравнению с традиционным протоколом и модифицированным протоколом, представленным в статье [354].

$$\begin{aligned}
 & \textit{Latency improvement} (\%) = \\
 & \frac{\textit{Average latency}_{\textit{Traditional}} - \textit{Average latency}_{\textit{System}(i)}}{\textit{Average latency}_{\textit{Traditional}}} \quad \forall i \in \mathbb{R} \quad (5.5)
 \end{aligned}$$

На рисунке 5.4 представлены графики PDR пяти рассматриваемых устройств на разных расстояниях от устройства туманных вычислений. На рисунке также представлены результаты предлагаемого метода и существующего традиционного подхода. PDR отличается от одного устройства к другому из-за разнородности устройств. Однако все устройства достигли более высокого PDR при использовании предлагаемого протокола. По мере удаления устройства UD от FD узла тумана PDR уменьшается; однако это снижение меньше при использовании предлагаемого протокола [344].

В результате анализа полученных результатов, можно утверждать, что предложенный протокол улучшил PDR в среднем на 34% по сравнению с существующими традиционными подходами [344].

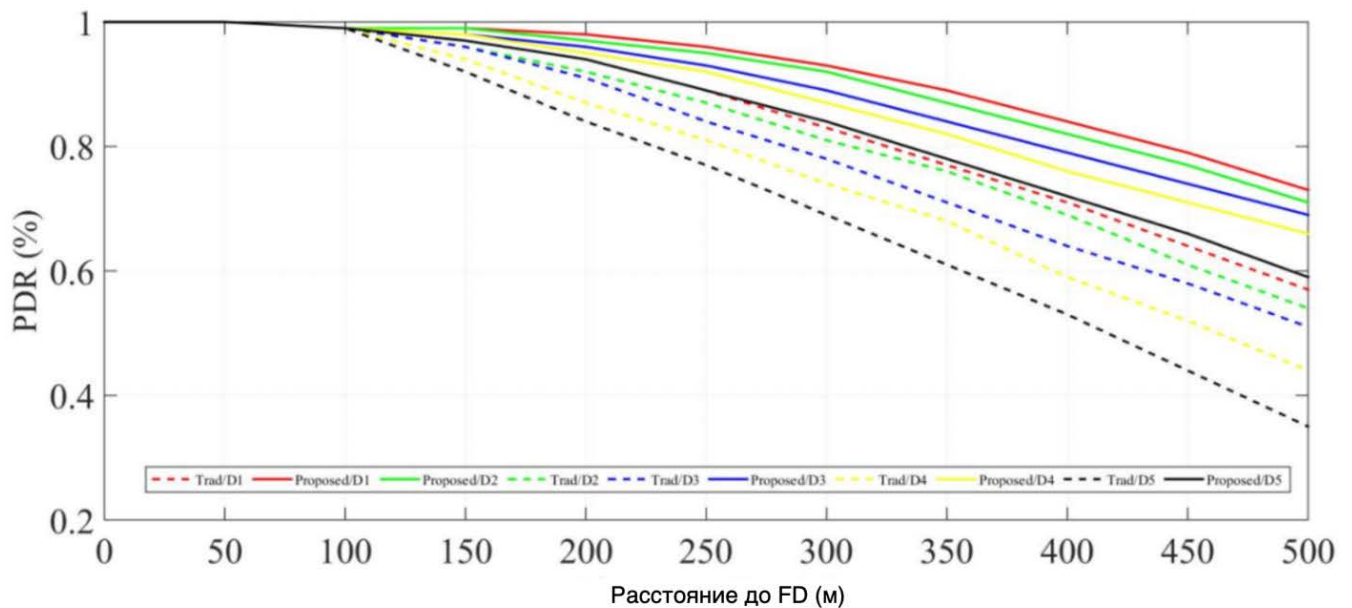


Рисунок 5.4 – Значение параметра PDR

На рисунке 5.5 представлен средний процент потребляемой энергии конечных устройств (по сравнению с полной батареей) в пяти случаях для трёх методов. Тремя рассматриваемыми методами являются 1. Метод №1: рассматриваемая топология сети с традиционным протоколом;

3. Метод №2: рассматриваемая топология с протоколом, введённым в [354];

4. Метод №3: топология с предлагаемым протоколом в данной работе.

Пять рассмотренных случаев относятся к пяти категориям задач, особенности которых были приведены выше. Во всех исследуемых пяти сценариях предложенный метод позволил потреблять меньше энергии, чем в двух других.

Стоит отметить, что предложенный протокол значительно снизил потребление энергии при больших рабочих нагрузках. В основном это связано с внедрением микросервисов и их грамотным распределением в туманных вычислениях [344].

В результате анализа полученных данных моделирования, можно сделать вывод, что предложенный протокол позволил добиться среднего снижения потребляемой энергии на 41% по сравнению с методом (1) (традиционный протокол) и на 29% по сравнению с методом (2) (протокол определён в работе [12]).

Результаты измерений представлены на рисунке 5.5.

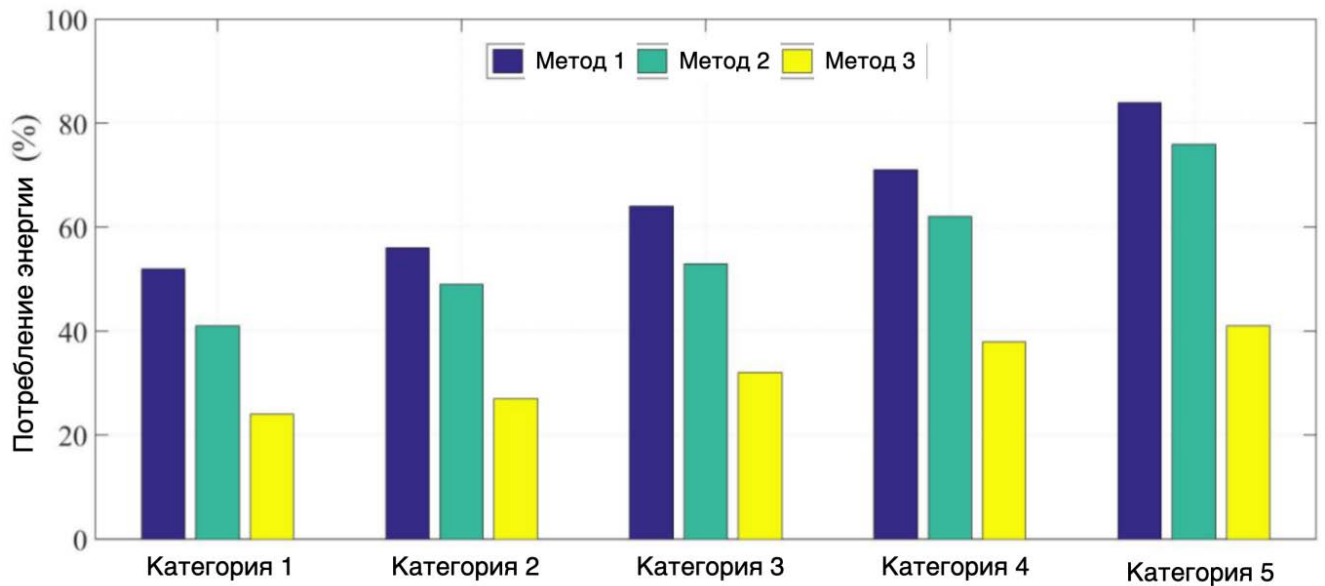


Рисунок 5.5 – Результаты моделирования метода: исследование потребления энергии в сравнении с аналогами [344]

На рисунке 5.6 представлены значения процента улучшения задержки предлагаемой модели по сравнению с традиционными протоколами для передаваемых данных пяти устройств. Результаты были получены для пяти категорий сервисов (определены выше). Таким образом, предложенный протокол уменьшил задержку для всех типов данных, при этом для данных микросервиса высококачественного видео, задержка была значительно снижена по сравнению с традиционными протоколами [344] (двумя другими исследуемыми методами).

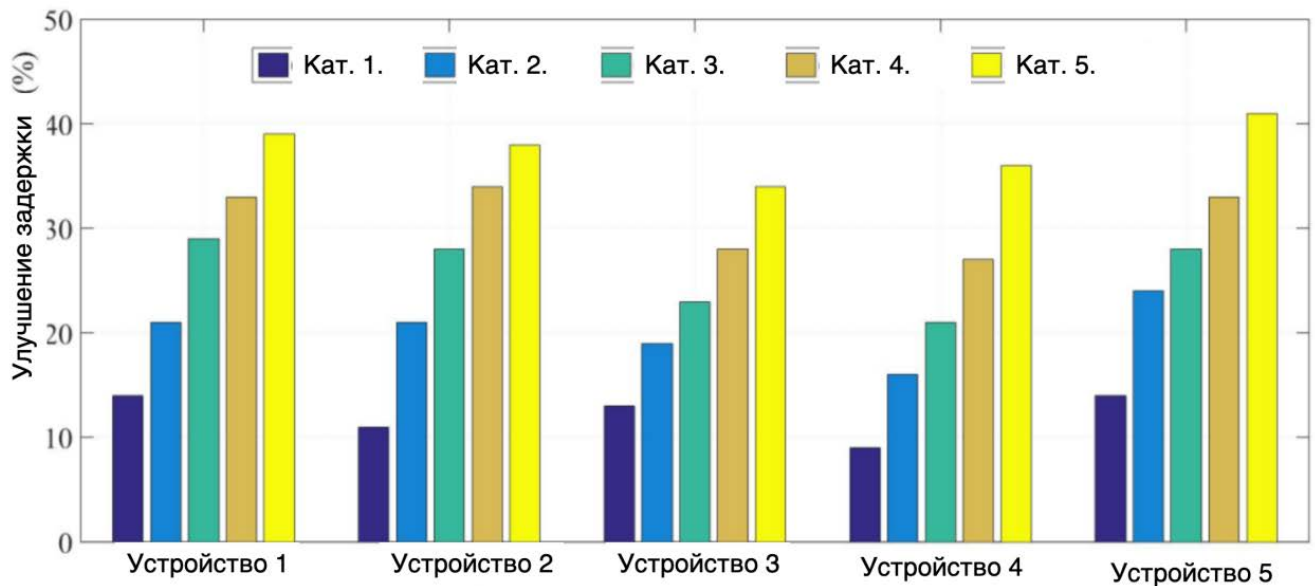


Рисунок 5.6 – Результаты моделирования метода: исследование параметра улучшения задержки (по формуле 5.5) в сравнении с аналогами [344]

Таким образом, в результате проведённого моделирования, была доказана эффективность предложенного протокола как с точки зрения уменьшения задержек, так и для сохранения энергоресурсов устройств сети динамических туманных вычислений [344].

5.5. Выводы по Главе 5

1. В главе 5 представлена краткая аналитическая справка по существующей задаче в области динамических туманных вычислений, касающаяся маршрутизации, в частности для последующей миграции микросервисов высоконагруженного программного обеспечения услуг. В перспективе, услуг телеприсутствия, в том числе URLLC и HRLLC услуг.

2. В главе также был представлен краткий обзор существующих методов маршрутизации в сетях связи (их классификация). В результате были определены требования к методу маршрутизации, который может быть применим для динамических туманных вычислений.

3. В данной главе были представлены разработанная модель и метод маршрутизации в сети динамических туманных вычислений, в том числе для

решения задачи миграции микросервисов в условиях ячеистой топологии кластера туманных вычислений. Метод миграции микросервисов представлен в виде разработанного протокола маршрутизации в среде динамических туманных вычислений, обеспечивающий учёт весов не только ребер графа, но и весов самих устройств туманных вычислений, что позволило по сравнению с существующими, достичь снижения потребляемой энергии устройствами туманных вычислений на 41% и уменьшить долю потерянных пакетов в среднем до 34%. Для оценки эффективности, при моделировании были исследованы другие два метода, которые были сравнены с предложенным по трём метрикам: PDR, улучшение показателя задержки, а также энергопотребление узлов туманных вычислений.

ГЛАВА 6. ПРОБЛЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ОБЪЕКТЫ МЕТАВСЕЛЕННОЙ. КОСТЮМ ТЕЛЕПРИСУТСТВИЯ

6.1. Введение

Ранее в первой главе диссертации были представлены исследования в области следующего технологического развития. В частности, было определено, что ожидается следующей эра сети Интернет, которую можно назвать следующей технологической революцией после прихода в своё время Интернета вещей. В п.1.5 первой главы был представлен анализ существующих трендов в данной области, а также анализ тех работ, которые сейчас ведутся на международном уровне под эгидой специального агентства ООН по стандартизации технологий - МСЭ. Созданная фокус-группа в 2022 году разработала более 55 документов, в числе которых: технические отчёты, технические спецификации и др. Данный задел позволяет сформировать видение технологического “горизонта” при постепенном развитии и внедрении метавселенных. Особенно стоит отметить то, что предполагается создание мультивселенной, которая позволит объединить различные метавселенные, обеспечит функциональной возможностью миграцию аватаров пользователей и т.д.

Выделяются также и отдельный тип метавселенных - промышленные метавселенные, которые образуются поверх производственной инфраструктуры, позволяют сформировать новые инструменты управления производством, а также повысить уровень автономности производства с сокращением человеческого ручного труда.

В рамках вышеуказанных документов приведена классификация метавселенных, которая основана в первую очередь на типизации интеграции двух миров (физического и виртуального/цифрового):

1. NL-MV. В данном классе метавселенных, цифровой мир существует без привязки к физическому миру. В виртуальной метавселенной могут быть свои законы физики, а также объекты, которые не ассоциированы напрямую в объектами физического мира;

2. L1-MV. В данной типе метавселенных, виртуальные объекты (либо все, либо некоторые), подкреплены данными с физических объектов. В данном типе метавселенных технологии Интернета вещей обеспечивают данную интеграцию, где, например, сенсорные сети позволяют в полной мере сформировать облик объекта в метавселенной на основе сбора множества данных;

3. L2-MV. В данном типе метавселенных граница между двумя мирами (физическим и цифровым) стёрта. Процессы физического мира напрямую влияют на виртуальный мир, и также наоборот - процессы происходящие с объектами в метавселенной напрямую влияют на объекты и процессы в физическом (реальном) мире.

Так или иначе существует множество научных вызовов в данной области технологий, как метавселенная. Кроме представления физических объектов в метавселенной на основе множества данных всепроникающих сенсорных сетей и генеративного интеллекта, существует задача формирования аватара пользователя в данной виртуальной среде.

Интерфейс взаимодействия “пользователь - метавселенная” может быть представлен в виде различных форм:

1. очки и/или шлем дополненной/виртуальной реальности. К данному типу склонились большинство ИТ-гигантов, таких как Microsoft, Apple и другие, учитывая собственный опыт, разработки и патенты в данной области технологий - интерфейсы;
2. комплекс камер и камеры с измерением глубины. В данном случае, возможно использовать одну или несколько обычных или трёхмерных камер, в том числе с и без использования специальных нательных меток и хромакея на заднем фоне пользователя;
3. костюм телеприсутствия с сенсорной системой оцифровки движений человека. Данный тип костюма телеприсутствия нацелен только на сбор данных с тела человека и их передачу в объект метавселенной - костюм телеприсутствия (в большинстве случаев он не позволяет реализовать глубокий иммерсивный опыт пользователю);

4. костюм телеприсутствия с сенсорной и обратной реактивной кинестетической связью. данный тип костюма. Данный тип костюма телеприсутствия позволяет предоставить пользователю новый уровень иммерсивности/погружения, обеспечив дуплексную связь с объектами метавселенной и объектами физического мира.

Следовательно, разработка интерфейсов с продвинутым уровнем иммерсивности, позволит в своё время достичь целей формируемых метавселенных. Существующий пласт технологий сетей ИМТ-2020 и будущих сетей ИМТ-2030 является фундаментом, на котором будут строиться первые виды метавселенных. Услуги телеприсутствия сетей ИМТ-2030 могут быть представлены как первый вид тех сервисов, которые могут быть интегрированы в метавселенные.

Таким образом, научной задачей, исследуемой и решаемой в шестой главе является разработка модели данных для датчиков и актуаторов костюма телеприсутствия, а также метода передачи этих данных в объекты мультивселенных.

Основной вклад в данной главе заключается в разработке модели данных для датчиков и актуаторов костюма телеприсутствия, а также метода передачи этих данных в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары), позволяющие обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных.

Глава организована следующим образом:

- в разделе (2) главы презентована существующая модельная сеть лаборатории MeganetLab 6G кафедры Сетей связи и передачи данных СПбГУТ, которая была создана в том числе для проведения исследований в области метавселенной и интерфейсов “пользователь - аватар”;

- в разделе (3) главы представлена проблематика данного типа интерфейсов для взаимодействия с объектами метавселенных;

- в разделе (4) главы представлена разработанная модель данных для датчиков и актуаторов костюма телеприсутствия.

- в разделе (5) представлены разработанный метод передачи данных с костюма телеприсутствия в объекты метавселенной – аватары.

6.2. Модельная сеть для исследований в области метавселенной и интерфейса “пользователь - аватар”

На данный момент в Санкт-Петербургском государственном университете телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича создана международная исследовательская лаборатория «Исследование сетевых технологий с ультра малой задержкой и сверхвысокой плотностью на основе широкого применения искусственного интеллекта для сетей 6G» (MEGANETLAB 6G) в рамках мегагранта Минобрнауки по соглашению № 075-15-2022-1137». Все результаты представленные в данной диссертации получены в рамках работ и на базе модельной сети лаборатории MeganetLab 6G. Архитектура лабораторной сети, её сегменты представлены в отдельной публикации [343].

Для проведения исследований по HTC и TIRO в рамках модельной сети были разработаны соответствующие сегменты:

- ядро сети на базе мультиконтроллерной сети SDN/NFV.
- разработан костюм телеприсутствия с обратной кинестетической связью.

Разработанный костюм телеприсутствия позволяет проводить комплексные исследования в области моделей и методов собираемых и передаваемых данных. Костюм телеприсутствия представлен на рисунке 6.1 (фотография работы сегмента модельной сети с костюмом телеприсутствия, где также представлен цифровой аватар пользователя).



Рисунок 6.1 - Пример работы костюма телеприсутствия

На рисунке 6.1 видно, как костюм передаёт данные о движении пользователя на его цифровой аватар. Также стоит отметить, что разработанный костюм телеприсутствия позволяет получить обратную связь, то есть данный костюм телеприсутствия может быть рассмотрен как один из интерфейсов взаимодействия с метавселенной типа L2-MV.

В рамках текущей задачи, решение которой представлено в данной главе диссертации, костюм телеприсутствия (рис. 6.1) был использован для сбора данных с сенсоров и актуаторов для последующей разработки модели данных и методе их передачи. Данный костюм телеприсутствия представляет в первую очередь инфраструктуру для проведения исследований: существует возможность программирования каждого контроллера и сенсора, реорганизации бортовой сети, настройки кластера контроллеров бортового костюма в условиях интеграции с цифровой средой через разные типы сетевых и программных интерфейсов.

Данный форм-фактор костюмов телеприсутствия с силовой обратной связью напоминает известные экзоскелеты. Однако костюм-телеприсутствия не реализует задачу повышения физических возможностей человека, а только обеспечивает максимально возможный уровень погружения пользователя с возможностью

управления удалёнными аватарами (цифровыми в метавселенной) и физическими - в виде роботизированных систем (например, роботами-аватарами).

6.3. Проблематика интерфейса

Развитие услуг телеприсутствия [355], в первую очередь направлено на повышение их иммерсивности. Для достижения этой цели решаются различные задачи, связанные с совершенствованием методов представления и получения информации [356].

В том числе, это относится к информации, воспринимаемой человеком с помощью как органов зрения, так и других органов чувств. При внедрении услуг телеприсутствия, которые лягут в основу создания метавселенной, необходимо решить задачу интерфейса взаимодействия человека/пользователя, то есть получения, доставки и представления информации о движении человеческого тела, температуре, давлении.

КТП (Костюм Телеприсутствия) представляет собой систему получения и представления информации о движении и тактильных ощущениях, реализованную на основе одежды, в которую внедрены соответствующие датчики и актуаторы, обеспечивающие получение и представление информации. Количество таких датчиков определяется спецификой задач, решаемых с помощью КТП. Будем полагать, что КТП может использоваться для решения двух основных задач: создания виртуальной копии человека (численного представления в памяти вычислительной машины) и управления роботом-аватаром [357] (механическим устройством, повторяющим движения человеческого тела или управляемым этими движениями). Для повышения иммерсивности КТП обеспечивает обратную связь между объектом взаимодействия и оператором в виде тактильных ощущений (механическое сопротивление движению, данные о температуре поверхности). Таким образом, для решения задачи доставки данных между КТП и сервером или аватаром в метавселенной или роботом-аватаром требуется обеспечить доставку информации от датчиков к актуаторам. При этом возникает задача обеспечения

точности и своевременности ее доставки. Ее решению и посвящена настоящая глава [356].

6.4. Разработка модели данных для датчиков и актуаторов костюма телеприсутствия

КТП реализует функции сбора данных о двигательной активности человека и формирование воздействий на органы чувств человека с целью обеспечения интерфейса человек-аватар на уровнях двигательного аппарата и тактильных ощущений. Сбор данных о двигательной активности человека является одной из основных функций этого устройства, обеспечивающей формирование адекватной модели движения виртуальной копии человека или аватара в метавселенной, в том числе физического робота-аватара. Для выполнения этой функции необходим сбор данных об изменении положения рук, ног и туловища человека. С этой целью КТП может быть оборудован группой из m датчиков, регистрирующих изгибы частей тела, углы поворота и ускорения суставов, степени давления в различных точках тела и др [356].

Модель рассматриваемого КТП приведена на рисунке 6.2 [356]. С точки зрения сбора данных о поведении человека модель КТП содержит датчики S_1, \dots, S_m , актуаторы A_1, \dots, A_k , аналого-цифровые (ADC) и цифро-аналоговые преобразователи (DAC) и контроллер C , осуществляющие получение, преобразование и сбор данных с датчиков и передачу сигналов в канал связи. Принимаемые данные проходят обработку контроллером и через цифро-аналоговые преобразователи передаются на актуаторы, реализующие тактильные и двигательные ощущения. Отметим, что аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи не являются обязательным элементом для каждого датчика и актуатора. Необходимость их использования определяется назначением и функциональностью конкретных устройств [356].

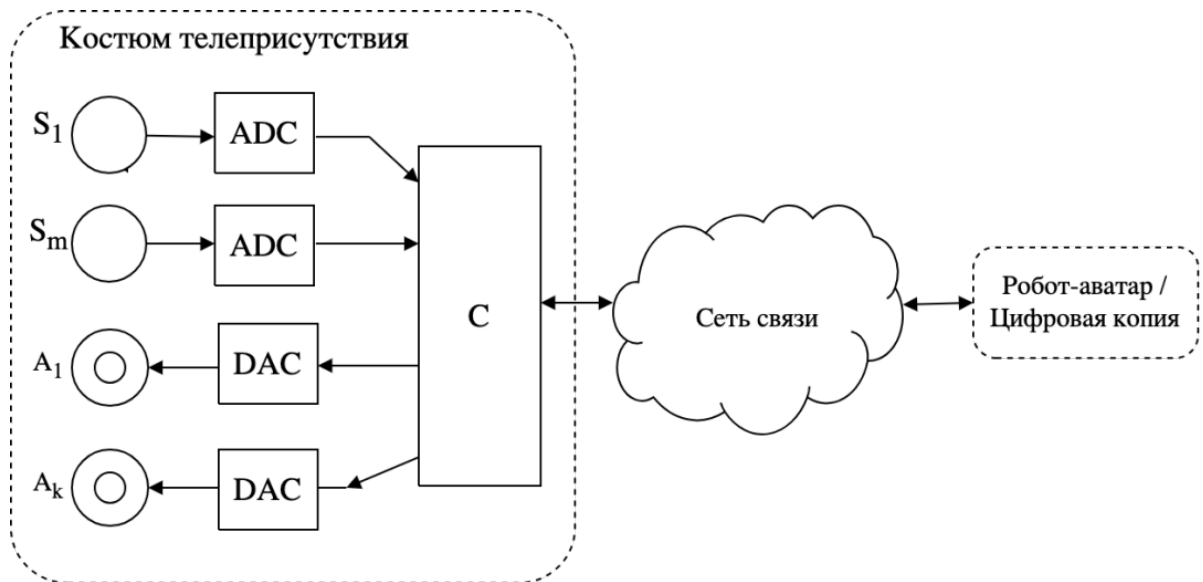


Рисунок 6.2 – Модель сети костюма телеприсутствия

Канал связи соединяет КТП, возможно через сеть связи, с устройством назначения, в качестве которого может быть робот-аватар или цифровая копия, реализуемая в информационной среде. С точки зрения обмена информацией между КТП и аватаром, в том числе роботом-аватаром процесс передачи информации от датчиков до актуаторов идентичен процессу передачи данных от датчиков аватара (цифровой копии) или робота-аватара к актуаторам КТП, поэтому далее будем рассматривать лишь одно направление, в качестве которого выберем направление от КТП к аватару (цифровая копия) или роботу-аватару [356].

Датчики s_1, \dots, s_m можно подразделить на группы по виду регистрируемой величины: датчики угла поворота, ускорения, давления и температуры.

Актуаторы A_1, \dots, A_k также можно подразделить на актуаторы температуры, давления и сопротивления движению.

Данные, передаваемые от датчиков, и данные, передаваемые к актуаторам, можно разделить на три группы по семантическому аспекту передаваемой информации: данные движения, данные температуры, данные давления.

Данные костюма телеприсутствия также можно классифицировать по отношению к частям тела, на которых установлены датчики. Модель данных приведена на рисунке 6.3 [356].

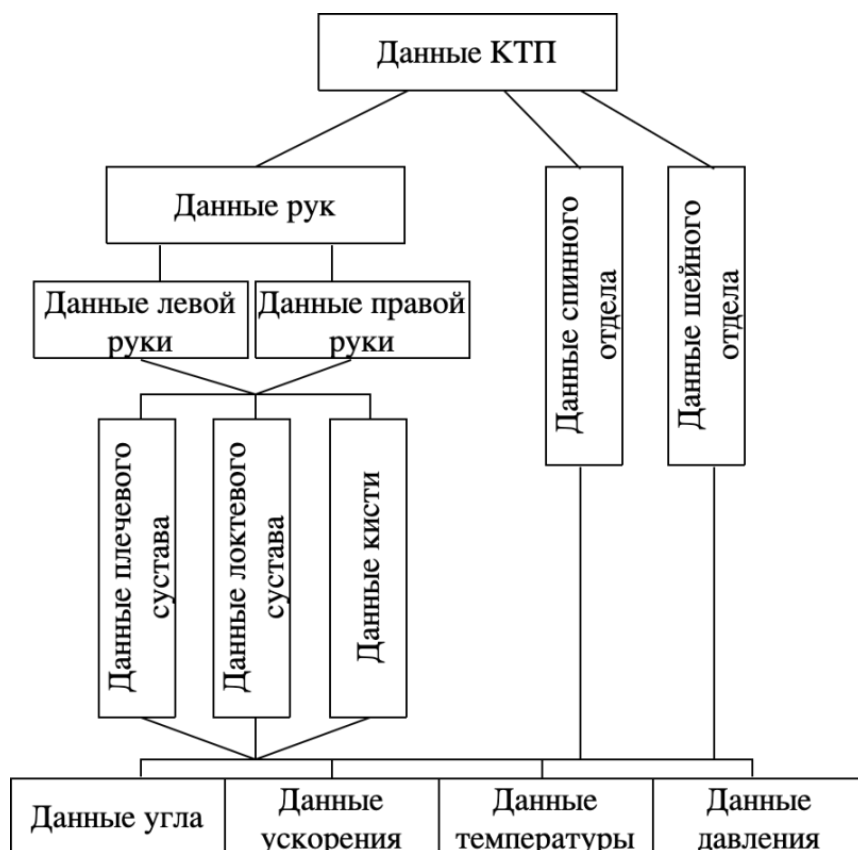


Рисунок 6.3 – Модель данных костюма телеприсутствия

Задачей контроллера, управляющего сбором информации с датчиков костюма телеприсутствия, является формирование данных, отражающих поведение человека с достаточной точностью. Данные, получаемые от сенсоров, представляют собой значения аналоговых сигналов, полученные в некоторые моменты времени. Для адекватного функционирования системы необходимо обеспечить точность и своевременность доставки и обработки данных от сенсоров и передачи данных к актуаторам. Для решения данной задачи необходимо описать модели сигналов, получаемых от датчиков костюма телеприсутствия. В данной работе будет рассмотрена одна из моделей – модель сигналов движения кисти руки [356].

Сигналы, поступающие с выхода датчиков угла поворота, будем рассматривать как случайный процесс. Опишем его реализацию, энергетический спектр и автокорреляционную функцию. Это описание необходимо для выбора метода цифровизации этих сигналов и оценки необходимых сетевых ресурсов для их своевременной доставки в вычислительное устройство. Модель

последовательности этапов доставки сигналов между сенсорами костюма телеприсутствия и актуаторами аватара приведена на рисунке 6.4 [356].

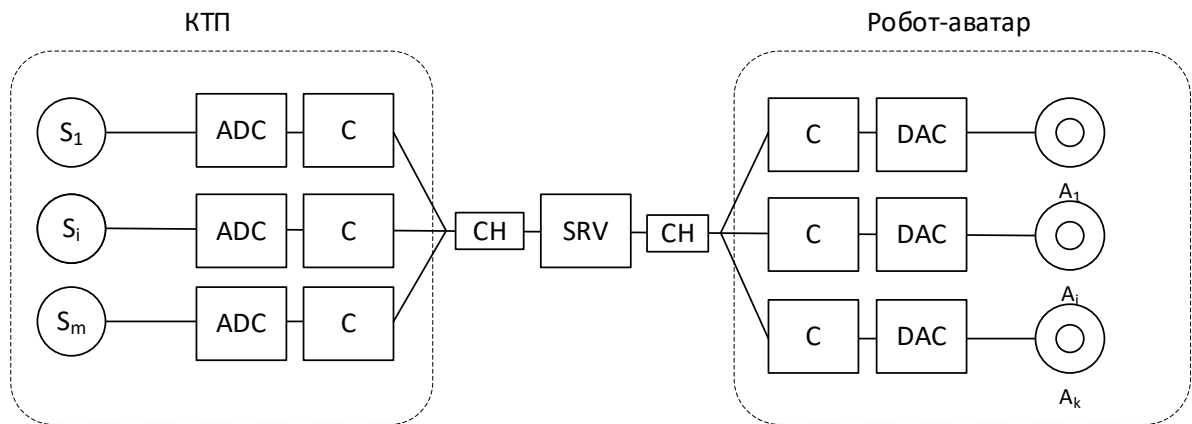


Рисунок 6.4 – Передача сигнала от датчика к актуатору

Процесс преобразования сигналов в цифровую форму (аналого-цифровым преобразователем ADC, а также цифро-аналоговым преобразователем DAC) и их передача вносят ошибку, которая в конечном итоге отражается на функционировании робота-аватара или на формировании виртуальной копии. Эта ошибка включает в себя множество составляющих, обусловленных техническими характеристиками датчиков (сенсоров) и актуаторов, процессами дискретизации, квантования и восстановления [358] сигнала, а также передачей данных по каналу связи (CH) до сервера (SRV) и далее - до получателя. На рисунке 6.4, контроллер, который обеспечивает взаимодействие с датчиками, актуаторами, ADC/DAC и каналом связи представлен как элемент C.

В общем, вносимую системой ошибку можно проиллюстрировать как показано на рисунке 6.5. Исходный сигнал $x(t)$ (синяя кривая на рисунке 6.5), который описывает изменение какого-либо параметра, после цепочки преобразований и передачи по каналу связи претерпевает изменения до состояния, отражаемого сигналом $\tilde{x}(t)$ (красная линия на рис. 4), тогда ошибка может быть выражена как (формула 6.1) [356]:

$$e(t) = x(t) - \tilde{x}(t). \quad (6.1)$$

Следовательно, ошибку можно рассматривать как разницу между состояниями сигнала (точками кривой), то есть между точками на кривых, описывающих исходный и восстановленный сигналы, в моменты времени, относящиеся к одному и тому же состоянию датчика КТП и актуатора или виртуальной копии. Иными словами, движения робота-аватара или аватара в метавселенной могут не в полной мере повторять движения оператора, а также запаздывать во времени.

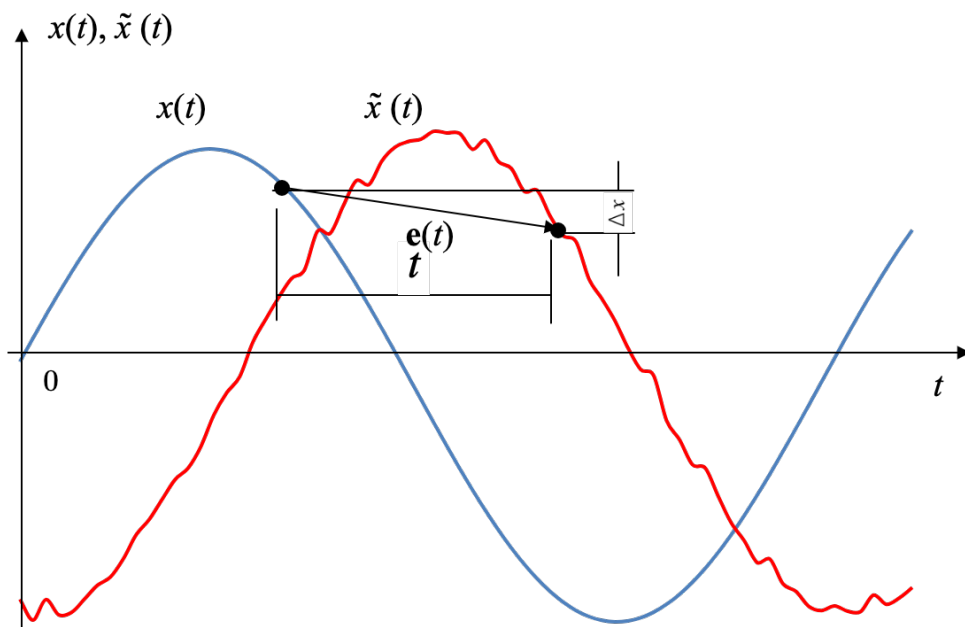


Рисунок 6.5 – Модель исходного и восстановленного сигналов

Равносильно сказанному выше, модель ошибки $e(t)$ можно описать вектором, длина и направление которого определяются составляющими Δx и τ (рисунок 6.5). Длину вектора (модуль) будем рассматривать как показатель качества функционирования системы, т.е. показатель, учитывающий как ошибку квантования, так и задержку доставки (формула 6.2-а и 6.2-б) [356]:

$$\|e(t)\| = \sqrt{\operatorname{Re}(e(t))^2 + \operatorname{Im}(e(t))^2} \quad (6.2-a)$$

или

$$\|e(t)\| = \sqrt{\Delta x^2 + \tau^2}, \quad (6.2-b)$$

где τ – временной сдвиг или суммарная временная задержка исходного сигнала.

Как ошибка квантования, так и задержка отрицательно отражаются на функционировании системы, поэтому целесообразно минимизировать длину вектора ошибки. Однако $\Delta x(t)$ и $\tau(t)$ могут принимать численные значения, отличающиеся на порядок или более, также эти величины могут иметь различное влияние на конечный результат управления. В одних задачах точность позиционирования манипулятора может быть менее критична, чем задержка выполнения операции, а в других наоборот первостепенное значение имеет точность, а не время [356].

Разумеется, при отсутствии противоречий следует минимизировать оба эти параметра, однако при их наличии возникает задача выбора компромисса, которую можно сформулировать как задачу оптимизации (формула 6.3) [356].

$$O = \min_{\Delta x, \Delta \tau} (\omega_x \Delta x + \omega_\tau \tau), \quad \Delta x, \tau \geq 0, \quad \omega_x, \omega_\tau \geq 0, \quad (6.3)$$

которую следует рассматривать как минимизацию суммарных издержек на ошибку и время, а значение коэффициентов ω_x и ω_τ – как условную единицу стоимости ошибки квантования и условную единицу стоимости задержки соответственно.

Рассмотрим модель сигналов датчиков костюма телеприсутствия

Сигналы, производимые датчиками костюма телеприсутствия были условно разделены на две группы по скорости изменения измеряемых параметров: «быстрые» и «медленные». К «медленным» относятся сигналы от датчиков

движения рук, туловища, температуры, а к «быстрым» – сигналы датчиков движения кистей рук и пальцев [356].

Ниже приведены характерные реализации «медленных» и «быстрых» сигналов, получаемых при выполнении регулярных движений.

Одна из типовых реализаций «медленного» сигнала – функция времени $x(t)$ приведена на рисунке 6.6-а. На рисунке 6.6-б представлен энергетический спектр этого сигнала $S(f)$ [359]. Из приведённого графика видно, что сигнал представляет собой непрерывную функцию времени, которая сравнительно медленно изменяется между минимальным и максимальным значениями [356].

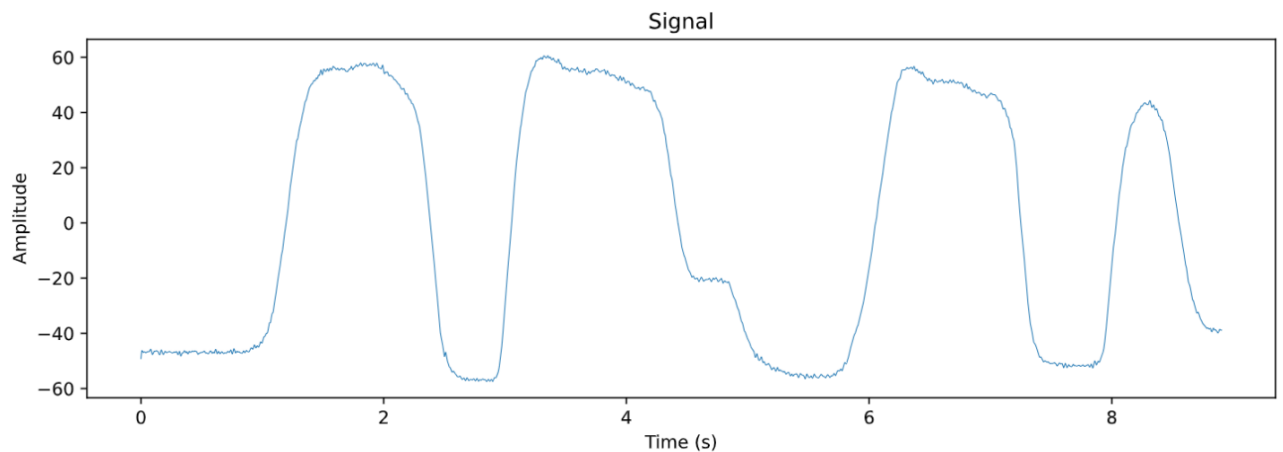


Рисунок 6.6-а - Форма сигнала

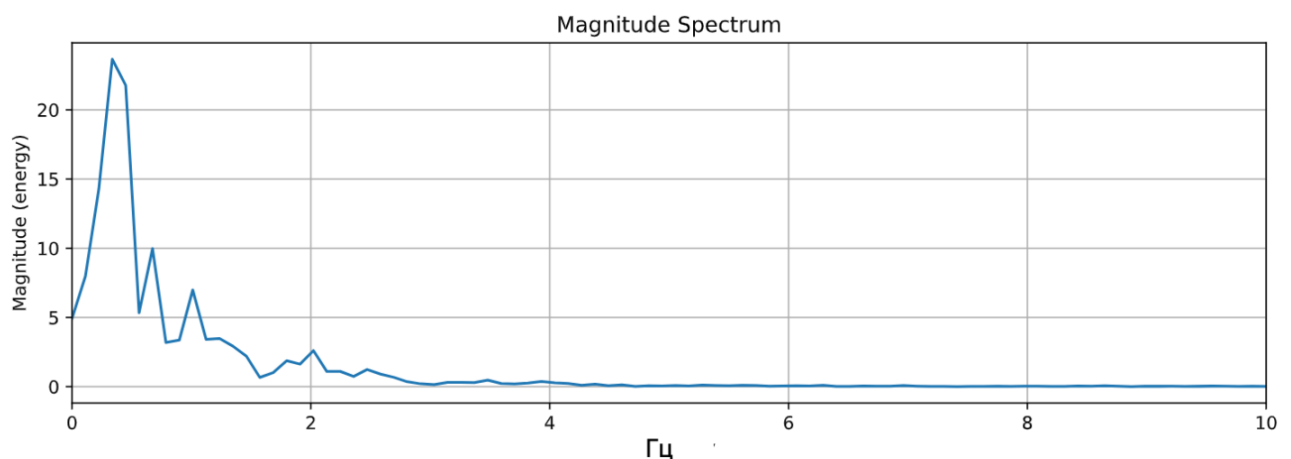


Рисунок 6.6-б - Энергетический спектр сигнала

Из приведённого графика энергетического спектра сигнала видно, что наибольшая доля энергии сосредоточена в сравнительно малом диапазоне частот, приблизительно от 0 до 4 Гц [356].

Типовой пример реализации «быстрого» сигнала как функция времени, приведён на рисунке 6.7-а. Из рисунка видно, что этот сигнал также представляет собой непрерывную зависимость. На рисунке 6.7-б приведён график энергетического спектра этого сигнала, из которого видно, что наибольшая доля его энергии в этом случае также сосредоточена в сравнительно малом диапазоне частот. В полосе частот от 0 до 7 Гц сосредоточено более 85% энергии сигнала, 90% энергии сигнала сосредоточено в полосе от 0 до 12 Гц, а более 99% в полосе до 50 Гц [356].

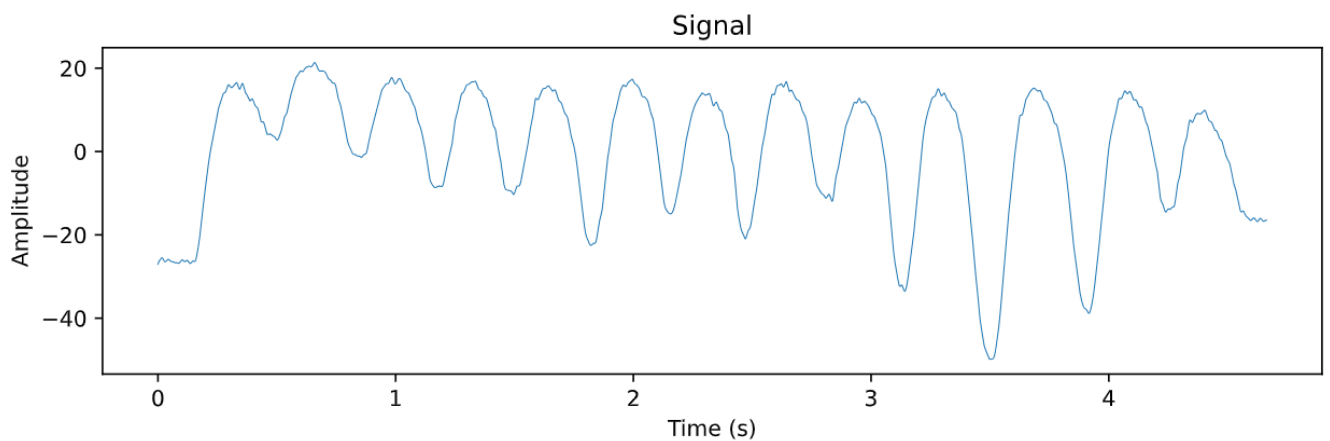


Рисунок 6.7-а - Форма сигнала

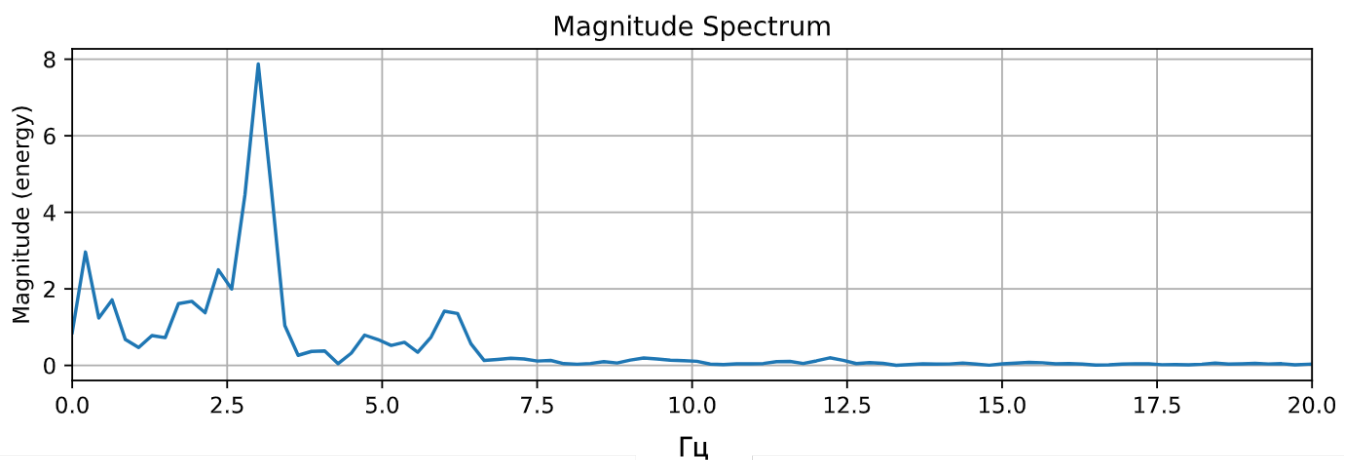


Рисунок 6.7-б - Энергетический спектр сигнала

Из теории обработки сигналов известно, что для точного восстановления сигнала с ограниченным (конечным) спектром частота дискретизации должна выбираться согласно теореме Котельникова (Котельникова-Шеннона-Найквиста) [360, 361], она должна не менее чем вдвое превосходить верхнюю частоту спектра преобразуемого сигнала.

Для описания сигналов на выходах датчиков костюма телеприсутствия рассматривалась их форма $x(t)$ (ряд типовых реализаций при выполнении характерных движений) и энергетический спектр $S(f)$ (модуль спектральной плотности мощности сигнала) (формула 6.4) [356].

$$S(f) = \left\| \int_0^T x(t) e^{-j2\pi f t} dt \right\|, \quad (6.4)$$

где f – частота (Гц).

Зависимость доли энергии сигнала $R(w)$ от полосы частот определяется как (формула 6.5)[356]:

$$R(w) = \frac{\int_0^w S(f) df}{\int_0^{F_{\max}} S(f) df}, \quad (6.5)$$

где F_{\max} – максимальная частота, полученная в результате измерений сигналов на выходах датчиков костюма телеприсутствия. Детальный анализ этой зависимости приведён на рисунке 6.8 [356].

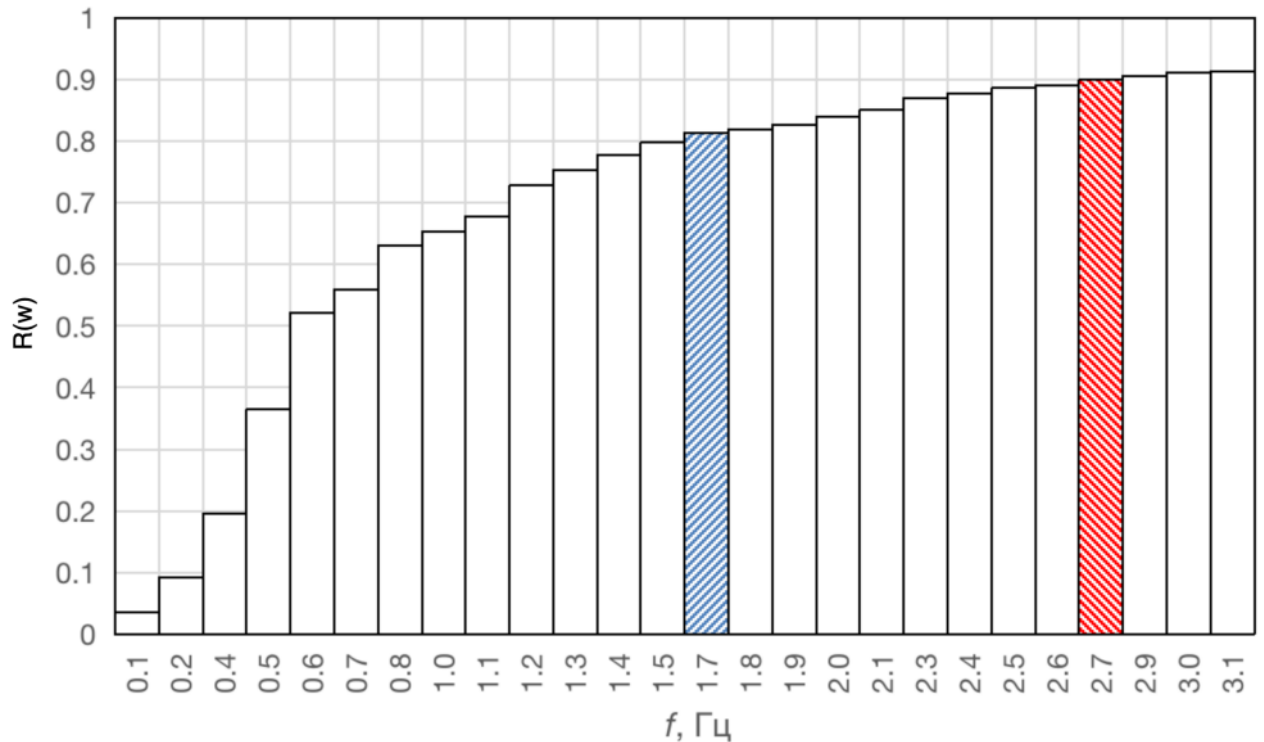


Рисунок 6.8 - Зависимость доли энергии «медленного» сигнала от частоты

Из рисунке 6.8 видно, что наибольшая доля энергии «медленных» сигналов (>80%) сосредоточена в полосе частот от 0 до 1,7 Гц. Более 90% энергии сигнала сосредоточено в полосе от 0 до 2,7 Гц. Доля энергии более 99% лежит в полосе частот о 0 до 42 Гц (на рисунке 6.8 не показано) [356].

Из полученных результатов можно сделать вывод о выборе частоты дискретизации, которая необходима для адекватного представления сигнала: она должна быть не менее 6 Гц [356].

На рисунке 6.9 приведена гистограмма, иллюстрирующая зависимость доли энергии сигнала от полосы частот $R(w)$. На ней показана зависимость доли энергии от полосы частот «быстрых» сигналов, на которой выделены точки, соответствующие 80% и 90%. Из графика видно, что наиболее заметный прирост энергии имеет место на интервале от 0 до 7 Гц, как это и было отмечено выше. Дальнейший прирост характеризуется пологим участком, вплоть до 50 Гц (на графике не приведён) [356].

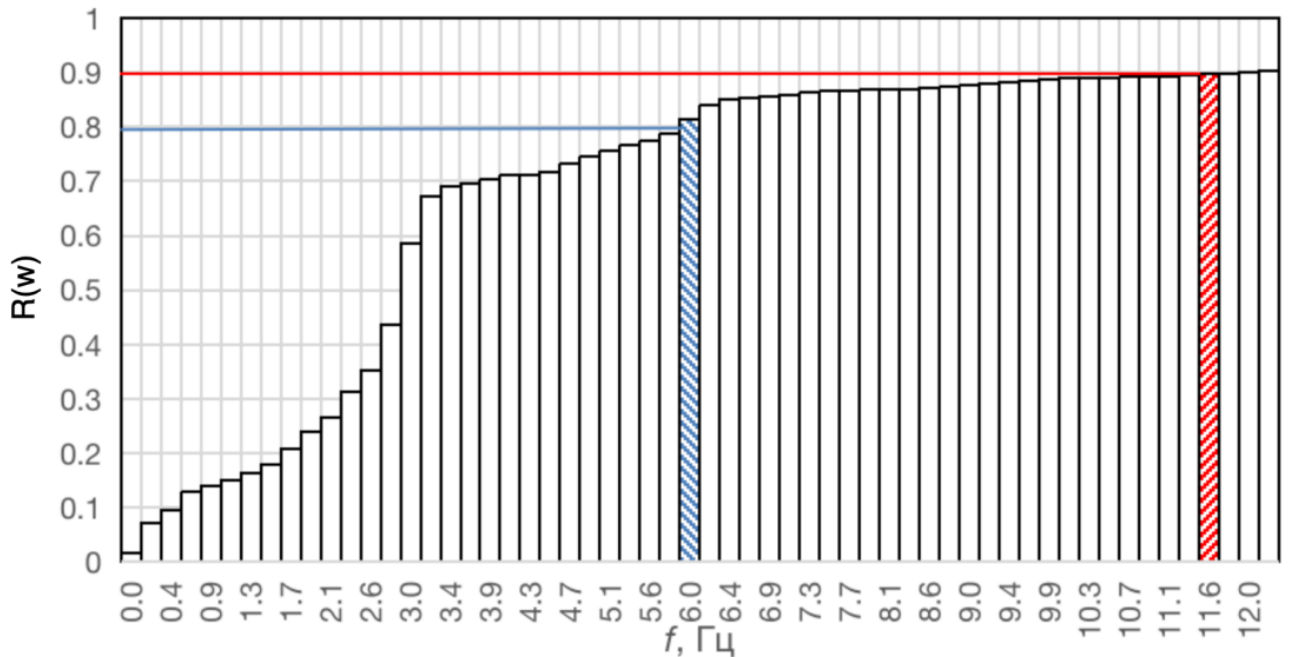


Рисунок 6.9 - Зависимость доли энергии «быстрого» сигнала от частоты

Рассмотренный пример для «быстрых» сигналов также позволяет сделать выбор частоты дискретизации для этого случая, которая может составить 14 Гц [356].

Рассмотрев приведённые примеры, можно сделать вывод, что большинство сигналов, производимых датчиками костюма телеприсутствия, являются сравнительно низкочастотными. Следует отметить, что наиболее высокочастотные составляющие как «медленных», так и «быстрых» сигналов обусловлены шумом на выходах датчиков, поэтому можно предположить, что полезные данные определяет уровень сигнала приблизительно равный 99% частоты. Которая соответствует 42 Гц для «медленных» сигналов и 50 Гц для «быстрых» сигналов [356].

Поэтому при выборе частоты дискретизации целесообразно ограничиться уровнем 90%. В таком случае, следуя теореме Котельникова, для «медленных» сигналов можно выбрать частоту дискретизации, приблизительно равной 6 Гц, а для «быстрых» – 25 Гц [356].

Для устранения шумовой составляющей целесообразно использовать фильтр низкой частоты с частотой среза, превышающей верхнюю частоту сигнала, но вдвое ниже частоты дискретизации.

6.5. Метод передачи данных с костюма телеприсутствия в объекты метавселенной - аватары

Общее количество датчиков костюма телеприсутствия может быть различно, в зависимости от степени детализации движений, например, в используемом для экспериментов костюме телеприсутствия имеется один датчик сгибания пальца руки, в то время как отдельным датчиком могут быть оснащены все фаланги всех пальцев, и тогда число датчиков положения пальцев увеличится с 5 до 15.

И это не предел: в костюме телеприсутствия могут использоваться датчики давления, температуры, угла, общее их количество может исчисляться десятками, сотнями и даже тысячами.

Важнейшими факторами, влияющими на качество функционирования системы управления роботом-аватаром или аватаром (виртуальной копией) на базе костюма телеприсутствия, являются время (задержка) доставки данных и ошибка позиционирования [356].

Определённая выражением (6.3) задача минимизации ошибки предполагает взаимосвязь между ошибкой позиционирования и задержкой. Рассмотрим более подробно эти составляющие [356].

Ошибка позиционирования в общем случае определяется совокупностью ошибок, вносимых всеми элементами в цепи доставки сигнала: ошибкой сенсора, ошибкой аналого-цифрового преобразования (ошибкой квантования), ошибками передачи данных, ошибкой аналого-цифрового преобразования и ошибкой актуатора [356].

Будем полагать, что среди перечисленных элементов наиболее значимой является ошибка квантования. Такое допущение возможно, так как ошибки датчика и актуатора определены их техническими возможностями, а вероятность ошибок в

канале передачи пренебрежимо мала (она может быть уменьшена до нужной величины путём использования соответствующего протокола передачи) [356].

Тогда вносимая составляющая ошибки Δx будет определяться только ошибкой квантования, которая зависит от числа уровней квантования n_c и определяется как (формула 6.6) [356]:

$$\Delta x = \Delta x(k) = \frac{A}{n_c} = \frac{A}{2^k}, \quad (6.6)$$

где A – размах сигнала (В); n_c – число уровней квантования; k – разрядность АЦП.

Согласно сделанным допущениям, составляющая ошибки Δx зависит только от числа уровня квантования (разрядности АЦП).

Задержка доставки в общем случае определяется совокупностью задержек, вносимых датчиком, АЦП, а также временем передачи по каналу связи и актуатором. Заметим, что при формировании пакетов данных накопление данных за несколько интервалов дискретизации, например, как это реализуется при работе аудиокодеков [362, 363], в данном случае невозможно, так как период дискретизации сравнительно велик и это повлечет за собой недопустимый рост задержки [356].

В данном случае сделаем допущение, что существенной является только составляющая задержки, определяемая временем передачи данных по каналу связи. Как правило, канал является узким местом, поэтому такое допущение возможно. Оно справедливо, когда канал протяжённый или имеет сравнительно низкую скорость передачи данных или возможны его перегрузки трафиком [356].

Тогда составляющая ошибки $\Delta \tau$ будет определяться скоростью передачи данных в канале и их количеством. В данном случае мы не считаем отдельным фактором задержку данных в канале, которая может быть вызвана ожиданием передачи в узлах связи, так как эта составляющая может быть учтена соответствующей корректировкой скорости передачи. С учётом сказанного $\Delta \tau$ может быть определена как (формула 6.7) [356]:

$$\tau = \tau(L) = \frac{L}{b}, \quad (6.7)$$

где L – размер передаваемого пакета (бит); b – скорость передачи данных в канале (бит/с).

Размер пакета L определяется количеством опрашиваемых датчиков m , количеством бит, представляющих данные каждого из датчиков, и способом кодирования данных (формула 6.8) [356]:

$$L = \psi \sum_{i=1}^m \eta_i, \quad i = 1, \dots, m, \quad \psi \geq 1, \quad \eta_i \geq 1, \quad [\text{бит}], \quad (6.8)$$

где $\eta_i = 2^{k_i}$ – число бит, представляющих отсчёт i -го датчика;

ψ – коэффициент, учитывающий избыточность используемого кода;

m – количество датчиков.

Время передачи данных в канале в таком случае может быть определено как (формула 6.9) [356]:

$$\tau = \frac{L + \nu}{b} = \frac{1}{b} \left(\psi \sum_{i=1}^m \eta_i + \nu \right), \quad i = 1, \dots, m, \quad \psi \geq 1, \quad \eta_i \geq 1, \quad \nu \geq 1, \quad (6.9)$$

где ν – число бит в заголовке пакета (число служебных бит из расчёта на один пакет).

С учётом полученных выражений для составляющих ошибки, можно записать в следующем виде (формула 6.10) [356]:

$$O(k_i) = \min_{k_i} (r(k_i)),$$

$$r(k_i) = \sum_{i=1}^m \omega_x^{(i)} \frac{A}{2^{k_i}} + \frac{\psi}{b} \sum_{i=1}^m \left[\omega_\tau^{(i)} (2^{k_i} + \nu) \right], \quad (6.10)$$

$$1 \leq k_i \leq k_{\max}, \omega_x, \omega_\tau \geq 0, i = 1, K, m.$$

Выражение (2) определяет целевую функцию и ограничения для решения задачи оптимизации состава пакета с данными костюма телеприсутствия. Оптимизация производится по разрядности АЦП датчиков k_i , данные которых помещаются в пакет. Разрядность k_i может принимать значения от 1 до максимально возможного k_{\max} , которое определяется типами используемых устройств. В отличие от задачи оптимизации (6.3) здесь рассматривается множество различных датчиков, данные которых могут иметь разную значимость для выполнения задачи, поэтому в выражении используются условные единицы стоимости ошибок $\omega_x^{(i)}$ и $\omega_\tau^{(i)}$ для каждого из m типов датчиков (данных). В общем случае задача – это задача поиска экстремума (минимума) функции многих переменных [356].

При рассмотрении всего двух датчиков можно данную зависимость изобразить в виде графика поверхности (представлен на рисунке 6.10). Для $m=2$ и постоянной скорости передачи $b=10^6$ бит/с целевая функция (формула 6.10) [356].

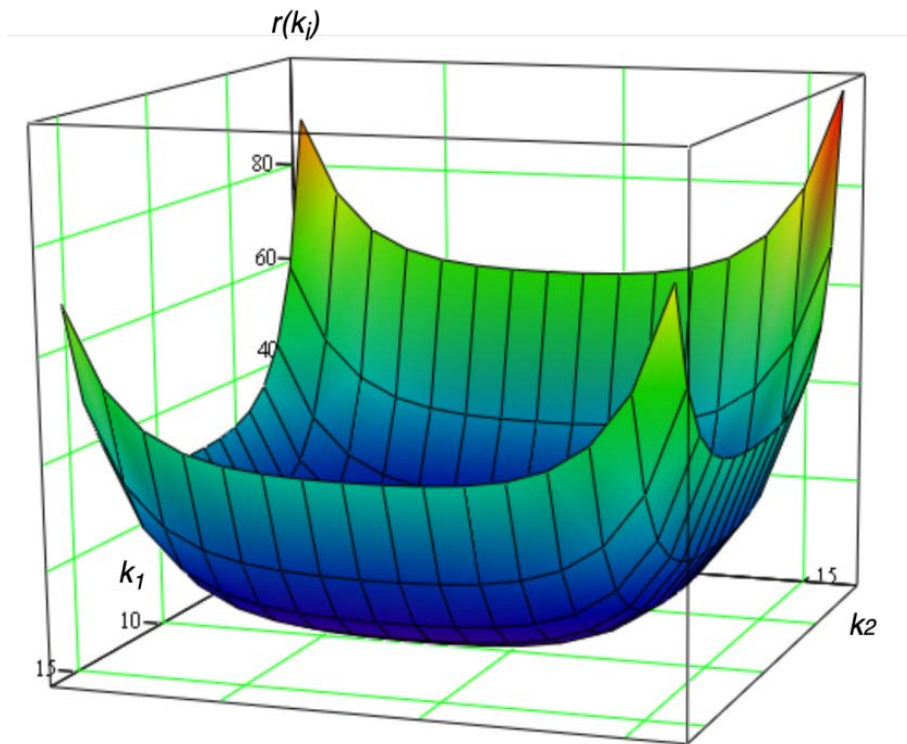


Рисунок 6.10 - Вид целевой функции при $m=2$

Из приведённого графика на рисунке 6.10 видно, что целевая функция имеет выраженный минимум, который достигается при некотором соотношении разрядностей первого и второго датчиков.

В приближенной к реальности ситуации количество датчиков составляет несколько десятков, поэтому для решения такой задачи требуется использовать численный метод оптимизации. Функция выпуклая, поэтому могут быть использованы различные методы оптимизации функций многих переменных. В данном примере применялся метод сопряжённых градиентов, который при принятых значениях дал решение $k_1=8$ бит и $k_2=9$ бит [356].

Получение данных о состоянии костюма телеприсутствия требует опроса и преобразования сигналов множества датчиков и их доставки в точку назначения, которой может быть робот-аватар или цифровая копия (аватар в метавселенной) [356].

При этом вносится ошибка, которая включает в себя две основные составляющие: ошибку контролируемой величины (значения сигнала) и ее задержку. При этом передача данных костюмом телеприсутствия вносит задержку,

существенная составляющая которой определяется временем передачи пакета и пропорциональна его размеру, который в свою очередь зависит от разрядности АЦП, используемых для получения данных о сигналах датчиков. Поэтому повышение разрядности (точности представления сигнала) приводит к росту задержки доставки. Задачу доставки данных КТП можно решать с позиции минимизации ошибки, для чего нужно обеспечить компромисс между разрядностью используемых АЦП и временем доставки. Для этого введены условные единицы стоимости (штрафа) за ошибку контролируемой величины и за ее задержку. Для поставленной задачи предложено решение через минимизацию суммарной величины издержек (штрафа) путём выбора разрядности используемых АЦП [356].

6.6. Выводы по Главе 6

В шестой главе представлена существующая модельная сеть лаборатории MeganetLab 6G кафедры Сетей связи и передачи данных СПбГУТ, которая была создана в том числе для проведения исследований в области метавселенной и интерфейсов “пользователь - аватар”. Был представлен и кратко описан разработанный в лаборатории костюм телеприсутствия, который был использован для генерации данных, на основе которых были проведены исследования и предложены решения в данной главе.

1. В данной главе также представлена проблематика данного типа интерфейсов для взаимодействия с объектами метавселенных. Костюмы телеприсутствия позволяют повысить уровень иммерсивности как для услуг телеприсутствия, так и станут базовым интерфейсом пользователя для взаимодействия с объектами метавселенных. В том числе позволяют сформировать более продвинутый аватар пользователя в метавселенных. Данные костюмы направлены в том числе не только на задачу считывания движений пользователя и их передачу в аватар, а также для формирования системы обратной связи от среды метавселенной и других воздействий, которые направлены на аватар пользователя.

Следовательно, исследования в области разработки наиболее эффективных методов и моделей данных, сигналов, сетей костюмов телеприсутствия являются на данный момент очень актуальными.

2. В главе была разработана и представлена модель данных для датчиков и актуаторов костюма телеприсутствия, а также метод передачи этих данных в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары), позволяющие обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Решена научная проблема разработки и исследования комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия в (мета-)мультивселенной при использовании костюмов телеприсутствия.

2. Проведены исследования в области сетей связи пятого и последующих поколений, включая сети ИМТ-2030. Определены роли и место туманных вычислений, миграции микросервисов для услуг телеприсутствия в развитии сетей и систем связи. Представлены архитектурные решения для туманных вычислений, определены задачи в данной области исследований. Были также определены существующие вызовы развития перспективных сетей ИМТ-2030 и услуг телеприсутствия, учитывая возросшие потребности в предоставлении качества обслуживания и соответствующие сложности ввиду гетерогенности сетей, устройств, а также сложившейся конъюнктуры рынка, представленной в стратегии развития сети Российской Федерации и технических отчётах Международного Союза Электросвязи. В первой главе диссертации, кроме того, было уделено внимание одной из актуальных задач в области современных и перспективных сетей связи - интеграции методов искусственного интеллекта, представленных МСЭ в качестве автономных сетей связи. Согласно принципу эмерджентности систем, задача интеллектуализации сетей связи непрерывно связана с такими интегрированными системами в общую инфраструктуру, как туманные вычисления.

3. Проведены исследования существующего положения дел в области разработок мета и мультивселенных, а также костюмов телеприсутствия как интерфейса между вселенными и пользователями, в том числе аватарами и роботами-аватарами. Представленный анализ международных отчётов по метавселенным позволил сформулировать существующую научную проблему развития метавселенных, а также их архитектурные принципы построения, и определить ряд потенциальных технологий, таких как: генеративный

искусственный интеллект, аватары, цифровые двойники, блокчейн, применимых в метавселенных. В результате проведенных исследований в данной области, были также определены вызовы, которые стоят перед международным сообществом учёных и инженеров. При этом представлена существующая дорожная карта стандартизации метавселенных, которая была принята в технической спецификации МСЭ в июне 2024 на заседании специальной фокус-группы по Метавселенным при TSAG;

4. Предложена новая архитектура сети, в которой все услуги связи могут быть предоставлены на базе распределенных туманных вычислений, а для динамического распределения ресурсов сети образуются новые структуры - туманности, как результат её кластеризации. Оценка эффекта от внедрения туманных вычислений в перспективные сети связи показала, что при сделанных допущениях, основанных в том числе на основе данных из открытых источников, внедрение туманных вычислений позволит достичь доли замыкания пользовательского трафика до 35%, при этом её распределение близко к бета-распределению. Если же учесть оценку для традиционного построения сети, стандартизованную в РД 45.120-2000, в частности то, что процент интенсивности внутристанционной нагрузки для крупномасштабных сетей имеет величину 15-17% и оценку внедрения туманных вычислений (представлена в главе 2 диссертации), то уменьшение доли трафика, поступающего в ядро сети, может составить до 20%.

5. Предложена новая архитектура сети с поддержкой распределенных оркестраторов и динамических туманных вычислений в рамках общей интегрированной сети. Предложенная архитектура учитывает территориальную статистику РФ, для которой были дальше проведены исследования, в частности разработана модель для труднодоступных регионов. В частности, был рассмотрен сценарий движения сельскохозяйственной техники, которая также может быть представлена в виде динамического кластера туманных вычислений. Рассмотренный сценарий далее был уточнен предложенной моделью сети динамических туманных вычислений, основанной на точечных процессах Нейманна-Скотта ввиду гетерогенности кластера.

6. В главе 3 диссертации также был предложен метод обеспечения стабильности кластера динамических туманных вычислений, где на примере сценария (п.4) была предложена целевая функция и метод её минимизации. В качестве метода был предложен алгоритм динамической кластеризации, который производит выбор положения центра кластера динамических туманных вычислений (точка нахождения координатора), минимизируя при этом вероятность выхода элемента из кластера за счёт приближения центра к наиболее «неустойчивым» элементам.

7. В главе 4 диссертации представлен результат проведённых исследований в области применения бессерверной архитектуры в динамических туманных вычислениях. Было определено, что данный тип архитектуры позволит достичь более эффективного использования ресурсов, особенно в динамических туманных вычислениях. Одним из важных результатов перехода к бессерверной архитектуре в туманных вычислениях может быть введение типизации микросервисов услуг, что в итоге сможет породить новые системные и бизнес-модели, например, “шеринг микросервисов”, а также сделать среду динамических туманных вычислений более детерминированной для распределения задач.

8. В главе 4 диссертации была также представлена разработанная модель сети туманных вычислений для поиска группы устройств с целью последующей миграции группы контейнеров бессерверной платформы. Здесь же был разработан метод функционирования сети с использованием бессерверной архитектуры для миграции групп типовых микросервисов при применении метаэвристического алгоритма стаи серых волков для определения группы устройств, на которую будет мигрировать группа контейнеров с микросервисами. Представленные результаты моделирования показали эффективность предложенной модели и метода.

9. В главе 5 диссертации были представлены разработанная модель и метод маршрутизации в сети динамических туманных вычислений, в том числе для решения задачи миграции микросервисов в условиях ячеистой топологии кластера туманных вычислений. Метод миграции микросервисов представлен в виде протокола маршрутизации. Метод обеспечивает учёт весов не только рёбер графа,

но и весов самих устройств туманных вычислений, что в результате позволило по сравнению с существующими методами достичь снижения потребляемой энергии устройствами туманных вычислений на 41% и уменьшить долю потерянных пакетов в среднем до 34%.

10. В главе 6 представлена новая научная проблема в области создания интерфейсов для взаимодействия с объектами метавселенных - костюма телеприсутствия. В результате проведенного анализа было определено, что костюмы телеприсутствия позволят повысить уровень иммерсивности пользователя как для услуг телеприсутствия, так и станут базовым интерфейсом пользователя для взаимодействия в метавселенных.

11. В главе 6 была разработана и представлена модель данных для датчиков и актуаторов костюма телеприсутствия, а также разработан и представлен метод передачи этих данных в объекты метавселенных (например, в цифровые и/или физические аватары), при этом позволяющий обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных.

12. На основе представленных результатов исследований могут быть сформулированы следующие рекомендации: как определено, сети 2030 будут представлять собой интегрированную сеть связи, включая наземный, морской, воздушный и низкоорбитальный сегмент, которая позволит достичь ЦУР, сети 2030 в том числе последующего поколения должны быть достаточно автономны (внедрены технологии искусственного интеллекта), технологии построения сетей и услуг должны учитывать требования по их энергоэффективности, а также эффективности используемых вычислительных ресурсов (использование граничных и туманных вычислений), при этом архитектура услуг телеприсутствия должна учитывать микросервисный принцип и возможности использования бессерверной архитектуры совместно с туманными вычислениями.

13. Представленное в диссертации решение научной проблемы разработки и исследования комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия, в том числе при

использовании костюмов телеприсутствия, позволяет определить актуальное направление исследований в области сетей связи – (мета-)мультивселенные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITU-T Recommendation Y.2060/Y.4000. Overview of the Internet of things: ITU-T, Geneva. – June 2012.
2. Laghari D. A review and state of art of internet of things (IoT) / Laghari, K. Wu, R.A. Laghari, M. Ali, and A. A. Khan // Arch. Comput. Methods Eng. – 2022. – vol. 29, no. 3, – P. 1395 – 1413.
3. Bhuiyan M. N. Internet of things (IoT): A review of its enabling technologies in healthcare applications, standards protocols, security, and market opportunities / M.N. Bhuiyan, M.M. Rahman, M.M. Billah, D. Saha // IEEE Internet Things J. – 2021. – vol. 8, no. 13, – P. 10474 – 10498.
4. Кучерявый А.Е. Интернет вещей / Кучерявый А.Е. // Электросвязь. – 2015. – No 1. – С. 21.
5. Volkov A. Interaction of the IoT traffic generated by a smart city segment with SDN core network / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Khakimov, A., Vladuko, A., Kirichek R. // In 2017 Lecture Notes in Computer Science – Springer-Verlag GmbH-2017.
6. Volkov A. Detection and Recognition of Moving Biological Objects for Autonomous Vehicles using Intelligent Edge Computing/LoRaWAN Mesh System / Muthanna, A., Kovtunencko, A., Al-Sveity, M., Elgendy I. // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and System., 2020.
7. Бушеленков С.Н. Анализ и формирование структуры сети интернета вещей на основе моделей решеток. / Бушеленков С.Н., Парамонов А.И. // Электросвязь. – 2021. – No 7. – С. 23-28.
8. Тонких Е.В. Планирование структуры сети интернета вещей с использованием фракталов / Е.В. Тонких, А.И. Парамонов, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2021. – No 4. – С. 55-62.
9. Тонких Е.В. Анализ беспроводной сети интернета вещей высокой плотности. / Тонких Е.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. – 2020. – No 1. – С.44-48.

10. ITU-R Recommendation M.2083-0. IMT Vision, Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond: ITU-R, Geneva. – September 2015.
11. Кучерявый А. Е. Сети связи с ультрамалыми задержками // Труды НИИР. 2019. No 1. С. 69–74.
12. Кучерявый А.Е. Тактильный интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками / А.Е. Кучерявый, М.А. Маколкина, Р.В. Киричек // Электросвязь. – 2016. – No 1. – С. 44 – 46.
13. Выборнова, А.И. Тактильный интернет: новые возможности и задачи / Выборнова, А.И.; Кучерявый, А.Е. // В сборнике: Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТиТТ-2016 Первый научный форум "Телекоммуникации: теория и технологии" 3Т - 2016, Самара, С.133-134.
14. International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops / А.А. Ateya, А. Muthanna, А. Koucheryavy, М. Khayyat // Toward Tactile Internet, 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT 2019). – 2019. – P. 8970990.
15. Кучерявый Е.А. Разработка и исследование комплекса моделей и методов распределения ресурсов в беспроводных гетерогенных сетях связи / Кучерявый Е.А. // Диссертация на соискание уч. ст. д.т.н., М., 2018.
16. Marochkina A., Ultra-Dense Internet of Things Model Network. / Marochkina A., Paramonov A., Tatarnikova T.M. // Communications in Computer and Information Science. 2022. Т. 1552. С. 111-122.
17. Нуриллоев И.Н., Обеспечение связности наземных сегментов летающей сенсорной сети с помощью БПЛА / Нуриллоев И.Н., Киричек Р.В., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Интернет вещей и 5G. 2016. С. 21-25.
18. Воробьева Д.М., Модель сети интернета вещей с мультимодальным распределением узлов и метод применения подвижных головных узлов для сбора данных. / Воробьева Д.М., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2021. No 10. С. 30-38.

19. Technical Specification. FG-NET2030 – Focus Group on Technologies for Network 2030. Network 2030 Architecture Framework. ITU-T, Geneva. – June 2020.
20. Technical Specification. FG-NET2030 – Focus Group on Technologies for Network 2030. Network 2030 - Terms and Definitions for Network 2030. ITU-T, Geneva. – June 2020.
21. Technical Report. FG-NET2030 – Focus Group on Technologies for Network 2030. Network 2030 - Additional Representative Use Cases and Key Network Requirements for Network 2030. ITU-T, Geneva. – June 2020.
22. Technical Report. FG-NET2030 – Focus Group on Technologies for Network 2030. Network 2030 - Network 2030 - Gap Analysis of Network 2030 New Services, Capabilities and Use cases. ITU-T, Geneva. – June 2020.
23. Technical Report. FG-NET2030 – Focus Group on Technologies for Network 2030. Network 2030 – FG-NET2030-Sub-G1 Representative use cases and key network requirements for Network 2030, Capabilities and Use cases. ITU-T, Geneva. – January 2020.
24. ITU-R Recommendation M.2160-0. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond: ITU-R, Geneva. – September 2015.
25. Резолюция Генеральной Ассамблеи ООН от 25 сентября 2015 г. № 70/1. Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. Нью-Йорк. - сентябрь 2015.
26. Распоряжение Правительства РФ от 24 ноября 2023 г. № 3339-р. Об утверждении Стратегии развития отрасли связи РФ на период до 2035 г., Москва. – Ноябрь 2023.
27. Бородин А.С. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики / А.С. Бородин А.С., А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2017. No 5. С. 45–49.
28. Кучерявый А.Е. Сети связи ожидает блестящее наукоемкое будущее / Электросвязь. 2022. No 1. С. 3-5.

29. Volkov A. Clustering algorithms for UAV placement in 5G and Beyond Networks / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Abaz, A., Kovalenko, V. // 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2020.
30. Volkov A. IoT Traffic Prediction with Neural Networks Learning Based on SDN Infrastructure / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Abdelah A., Makolkina M., Paramonov A. // Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12563. Springer, Cham., 2021.
31. Волков А.Н. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 / Волков А.Н., Кучерявый А.Е., Мутханна А.С.А. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 2. С. 32-43.
32. Volkov A., A.Muthanna, A.Koucheryavy. AI/machine learning for ultra-reliable low-latency communication // ITU News. No. 5. December 2020. p. 62-65.
33. Technical Specification ETSI TS 123 01 v16.6.0 Release 16. 5G. System architecture for the 5G System (5GS). ETSI, France. – October 2020.
34. Elmeadawy, S., & Shubair, R.M. 6G wireless communications: Future technologies and research challenges. In 2019 international conference on electrical and computing technologies and applications (ICECTA) // IEEE. – 2019. March. – P. 1 – 5.
35. Ateya, A. Study of 5G services standardization: Specifications and requirements / A. Ateya, A. Muthanna, M. Makolkina, A. Koucheryavy // in 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), – 2018. – P. 1–6.
36. Guo F. Enabling massive IoT toward 6G: A comprehensive survey / F. Guo, F.R. Yu, H. Zhang, X. Li, H. Ji, V.C.M. Leung // IEEE Internet Things J. – 2021. – vol. 8, no. 15, pp. – P. 11891–11915.
37. Дунайцев Р.А. Интегрированная сеть космос-воздух-земля-море как основа сетей связи шестого поколения / Р.А. Дунайцев, А.С. Бородин, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2022. – No. 10. – С. 5–8.

38. Мутханна А.С.А. Интегральное решение проблемы размещения контроллеров и балансировки нагрузки / Мутханна А.С // Труды учебных заведений связи. 2023 Т. 9. No 2. С. 81-93.
39. Allam Z. Future (post-COVID) digital, smart and sustainable cities in the wake of 6G: Digital twins, immersive realities and new urban economies. / Z. Allam, D.S. Jones // Land use policy – 2021. 101. – P. 105201.
40. Long W. A promising technology for 6G wireless networks: Intelligent reflecting surface / W. Long, R. Chen, M. Moretti, W. Zhang, J. Li // Journal of Communications and Information Networks, – 2021. No 6(1). – P. 1 – 16.
41. Волков А. Н. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 / Волков А. Н., Мутханна А. С. А., Кучерявый А. Е. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. No 2. С. 32–43. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-32-43.
42. Инкин. Г. Архитектура беспроводных сетей на базе дронов в условиях разрушенной инфокоммуникационной инфраструктуры / А.Н. Волков, А. Морачевский // Материалы 77-й региональной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 2023. С. 145-149.
43. Марочкина А.В. Трехмерные многослойные гетерогенные сверхплотные сети. / Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Маколкина М.А., Мутханна А.С.А., Выборнова А.И., Дунайцев Р.А., Захаров М.В., Горбачева Л.С., Чан З.Т., Марочкина А.В. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2022. Т. 10. No 3. С. 1-12.
44. Атея А.А. Интеллектуальное ядро для сетей связи 5G и тактильного интернета на базе программно-конфигурируемых сетей / А.А. Атея, А.С. Мутханна, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. – 2019. – No 3. – С. 34-40.
45. Maier, M. Toward 6G: A new era of convergence. In Optical Fiber Communication Conference // Optica Publishing Group.–2021. June, – P. F4H-1.

46. Chen, N. Toward 6G internet of things and the convergence with RoF system / N. Chen, M. Okada // *IEEE Internet of Things Journal*, – 2020. No 8(11). – P. 8719–8733.
47. Lu Y. 6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues / Y. Lu, X. Zheng // *Journal of Industrial Information Integration*, – 2020. 19, 100158.
48. ITU-T Recommendation Y.3104. Architecture of the IMT-2020 network: ITU-T, Geneva. – December 2018.
49. ITU-T Recommendation Y.3102. Framework of the IMT-2020 network: ITU-T, Geneva. – May 2018.
50. ITU-T Recommendation Y.3300. Framework of Software-defined networking: ITU-T, Geneva. – June 2014.
51. Мутханна А.С. Метод размещения SDN-контроллеров на мобильных узлах сетей VANET для высокоплотных и сверхплотных сетей 6G / Мутханна А.С. // *Электросвязь*. 2023. No 8. С. 19-27.
52. Taleb T. On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration / T. Taleb, K. Samdanis, B. Mada, H. Flinck, S. Dutta, D. Sabella, // *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 19, no. 3, – 2017. – P. 1657 – 1681.
53. Волков А.Н. Программируемые сети SDN: учебное пособие / Владыко А.Г., Мутханна А.С.А., Киричек Р.В., Маколкина М.А., Парамонов А.И., Волков А.Н. Издательство «Лигр». 2019. ISBN: 978-5-907207-41-7
54. Chen M. Task Offloading for Mobile Edge Computing in Software Defined Ultra-Dense Network / M. Chen, Y. Hao // *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 3, – Mar., 2018. – P. 587 – 597.
55. Мутханна А.С. Модель интеграции граничных вычислений в структуру сети «воздух–земля» и метод выгрузки трафика для сетей Интернета Вещей высокой и сверхвысокой плотности / Мутханна А.С // *Труды учебных заведений связи*. 2023. № 9(3). С. 42–59.

56. Mao Y. A survey on mobile edge computing: The communication perspective[J] / Y. Mao, C. You, J. Zhang, et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2017. 19(4). – P. 2322–2358.
57. Noor T.H. Mobile cloud computing: Challenges and future research directions[J] / T.H. Noor, S. Zeadally, A. Alfazi, et al. // Journal of Network and Computer Applications. – 2018. 115. – P. 70-85.
58. Othman M. A survey of mobile cloud computing application models[J] / M. Othman, S.A. Madani, S.U. Khan, et al. // IEEE communications surveys & tutorials, – 2013. – N 16(1). – P. 393–413.
59. Wang J. Edge cloud offloading algorithms: Issues, methods, and perspectives[J] / J. Wang, J. Pan, F. Esposito, et al. // ACM Computing Surveys (CSUR), – 2019. 52(1): – P. 1–23.
60. Yaqoob I. Mobile ad hoc cloud: A survey / I. Yaqoob, E. Ahmed, A. Gani, et al. // Wireless Communications & Mobile Computing, – 2016. – 16(16). – P. 2572–2589.
61. Liu F. A survey on edge computing systems and tools / F. Liu, G. Tang, Y. Li, et al. // Proceedings of the IEEE, – 2019. – N 107(8). – P. 1537–1562.
62. Мухизи С. Модели сегментации и кластеризации ресурсов в программно-конфигурируемых сетях / Мухизи С., Атея А.А., Мутханна А.С., Киричѐк Р.В. // Электросвязь. 2019. № 4. С. 26-31.
63. Волков А.Н. Методы реализации контроллеров SDN в сети БПЛА / Мутханна А.С.А., Волков А.Н., Коваленко В.Н., Модель М.В. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 4.
64. Волков А.Н. Методы реализации контроллеров SDN в сети БПЛА / Мутханна А.С.А., Волков А.Н. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 4.
65. Yao G. On the Capacitated Controller Placement Problem in Software Defined Networks / G. Yao, J. Bi, Y. Li, L. Guo // IEEE Communications Letters. – 2014. Vol. 18. Iss. 8. – P. 1339–1342. DOI:10.1109/LCOMM.2014.2332341

66. Волков А.Н. МЕС и SDN/NFV как решение по обеспечению 1 мс в сетях связи 5G/ИМТ-2020 / Волков А.Н., Атея А.А., Мутханна А.С.А., Киричек Р.В. // Сборник трудов 73-я Всероссийской научно-технической конференции, посвященной Дню радио. Санкт-Петербург, 20-28 апреля 2018 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 267 с.
67. Sahoo K.S. Metaheuristic Solutions for Solving Controller Placement Problem in SDN-based WAN Architecture /K.S. Sahoo, A. Sarkar, S.K. Mishra, B. Sahoo, D. Puthal, M.S. Obaidat, et al. // Proceedings of the 14th International Joint Conference on e-Business and Telecommunications (ICETE 2017) and 8th International Conference on Data Communication Networking (DCNET), Madrid, Spain, 15–23 July 2017. SciTePress Digital Library, – 2017. – P. 15–23. DOI:10.5220/0006483200150023
68. Волков А.Н. Приложение дополненной реальности на сети 5G/ИМТ-2020 с использованием SDN и NFV / Шыпота Н.А., Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Маколкина М.А. // Сборник трудов 73-я Всероссийской научно-технической конференции, посвященной Дню радио. Санкт-Петербург, 20-28 апреля 2018 г. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 267 с.
69. Ateya A.A. Chaotic salp swarm algorithm for SDN multi-controller networks / A.A. Ateya, A. Muthanna, A. Vybornova, A.D. Algarni, A. Abuarqoub, Y. Koucheryavy, et al. // Engineering Science and Technology, an International Journal. – 2019. – Vol. 22. Iss. 4. – P. 1001 – 1012. DOI: 10.1016/j.jestch.2018.12.015
70. Волков А.Н. Разработка ядра модельной сети ИМТ-2020 на основе концепций SDN и NFV / Волков А.Н., Митьковец А.В., Шыпота Н.А., Мутханна А.С.А., Киричек Р.В. // Интернет вещей и 5G (INTHITEN 2017) 3-я международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых / Под ред. А.Е. Кучерявого. 2017. С. 131 с.
71. Wang G. A K-means-based network partition algorithm for controller placement in software defined network / G. Wang, Y. Zhao, J. Huang, Q Duan, J. Li // Proceedings of the International Conference on Communications (ICC, Kuala

Lumpur, Malaysia, 22–27 May 2016). IEEE. – 2016. DOI:10.1109/ICC.2016.7511441.

72. Волков А.Н. Разработка метода тестирования системы менеджмента интернета вещей в концепции умного города на базе сети SDN / Волков А.Н., Мутханна А.С.А. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2017). Сборник научных статей VI Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х т. СПб.: СПбГУТ, 2017. С. 190.
73. Мухизи С. Исследование моделей балансировки нагрузки в программно-конфигурируемых сетях / Мухизи С., Мутханна А.С., Киричек Р.В., Кучерявый А.Е. // Электросвязь. 2019. No 1. С. 23-29.
74. Jaballah W.B. Survey on software-defined VANETs: Benefits, challenges, and future directions / W.B. Jaballah, M. Conti, C.A. Lal // arXiv preprint arXiv:1904.04577. – 2019. <https://dblp.org/rec/bib/journals/corr/abs-1904-04577>
75. Волков А.Н. NFV и живая миграция виртуальных машин / Митьковец А.В., Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Киричек Р.В. // Сборник трудов 73-я Всероссийской научно-технической конференции, посвященной Дню радио. Санкт-Петербург, 20-28 апреля 2018 г. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. 267 с.
76. Волков А.Н. Проблемы и требования для реализации технологии V2X / Мутханна А.С.А., Волков А.Н., Аль-Свейти М.А.М. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 3.
77. Volkov A. SDN approach to control internet of thing medical applications traffic /Muthanna, A., Pirmagomedov, R., Kirichek R. // In Communications in Computer and Information Science. Springer-Verlag GmbH-2017.
78. Volkov A. Load Balancing Algorithm in SDN Multicontroller Network / Zhetov, A., Kaijalainen, V., Mogilatov, A., Muthanna, A // In Proceedings of the 7th International Conference on Future Networks and Distributed Systems pp. 689-693., December 2023.

79. Davide Calandra. Digital twin- and extended reality-based telepresence for collaborative robot programming in the 6G perspective / F. Gabriele Praticò, Alberto Cannavò, Claudio Casetti, Fabrizio Lamberti // *Digital Communications and Networks*, Volume 10, Issue 2, 2024, P. 315-327, ISSN 2352-8648, <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.10.007>.
80. Koucheryavy, A.E. A First-Priority Set of Telepresence Services and a Model Network for Research and Education / M.A. Makolkina, A.I. Paramonov, A.I. Vybornova, A.S.A. Muthanna, R.A. Dunaytsev, S.S. Vladimirov, V.S. Elagin, O.A. Markelov, O.I. Vorozheykina, A.V. Marochkina, L.S. Gorbacheva, B.O. Pankov & B.N. Anvarzhonov // *In Distributed Computer and Communication Networks. DCCN 2022. Communications in Computer and Information Science*, vol 1748. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8_17.
81. M. Maier. 6G as if People Mattered: From Industry 4.0 toward Society 5.0 // 2021 International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN), Athens, Greece, 2021, pp. 1-10, doi: 10.1109/ICCCN52240.2021.9522181.
82. C.D. Alwis. Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research / A. Kalla, Q.Phham, P. Kumar, K. Dev, W. Hwang, M. Liyanage // *in IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 836-886, 2021, doi: 10.1109/OJCOMS.2021.3071496.
83. S. Xuemin. Toward immersive communications in 6G / G. Jie, L. Mushu, Z. Conghao, H. Shisheng, H. Mingcheng , Z. Weihua // *Frontiers in Computer Science*, Vol. 4, 2023, doi: 10.3389/fcomp.2022.1068478, ISSN: 2624-9898
84. Peng, H. 6G toward Metaverse: Technologies, Applications, and Challenges / P.C. Chen, P.H. Chen, Y.S. Yang, C.C. Hsia, L.C. Wang // *In 2022 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium. IEEE*, 2022. August. – P. 6–10.
85. Volkov A. Framework of QoS management for time constraint services with requested network parameters based on SDN/NFV infrastructure / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Khakimov, A., Muhizi, S., Kirichek R. // *In 2018 10th*

International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)» - IEEE-2018.

86. Volkov A. SDN Load Prediction Algorithm Based on Artificial Intelligence / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Adam, A., Ateya, A., Proshutinsky K. // Communications in Computer and Information Science, vol. 1141. Springer, Cham., 2019.
87. Haibeh L.A. A survey on mobile edge computing infrastructure: Design, resource management, and optimization approaches / L.A. Haibeh, M.C.E. Yagoub, A. Jarray // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 27591–27610.
88. Cruz P. On the edge of the deployment: A survey on multi-Access Edge Computing / P. Cruz, N. Achir, A. C. Viana // ACM Comput. Surv. – 2022.
89. Jeong S. Mobile edge computing via a UAV-mounted cloudlet: Optimization of bit allocation and path planning / S. Jeong, O. Simeone, J. Kang // IEEE Trans. Veh. Technol. – 2018. – P. 2049 – 2063.
90. B. Karabekir. Energy-efficient clustering-based mobile routing algorithm for wireless sensor networks / M. A. Aydin, and A. H. Zaim // Electrica. – 2021. – vol. 21, no. 1. – pp. 41–49.
91. Volkov A. Approaches for Multi-tier cloud structure management / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Kovalenko, V. // In 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, ICUMT 2019.
92. Tran T.X. Collaborative mobile edge computing in 5G networks: New paradigms, scenarios, and challenges / Hajisami, A., Pompili, D. // IEEE Communications Magazine 55, 2017, 54–61. doi:10.1109/MCOM.2017.1600863.
93. Khan A. ur R. A Survey of Mobile Cloud Computing Application Models / A. ur R. Khan, M. Othman, S.A. Madani, S.U. Khan // IEEE Commun. Surv. Tutor., – 2014. vol. 16, no. 1. –P. 393–413.
94. Волков А.Н. Применение туманные вычислений для обработки трафика в сетях с кластерами БПЛА и многоуровневой облачной архитектурой МЕС / Коваленко В.Н., Волков А.Н., Мутханна А.С.А. // Актуальные проблемы

инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022). XI Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Санкт-Петербург, 2022. С. 288-293.

95. Brummett T. Performance Metrics of Local Cloud Computing Architectures / T. Brummett, P. Sheinidashtegol, D. Sarkar, and M. Galloway // in 2015 IEEE 2nd International Conference on Cyber Security and Cloud Computing, New York, NY, USA, – 2015. – P. 25–30.
96. Волков А.Н. Система распределенных вычислений на основе летающего сегмента сети, глубоко имплементированного в архитектуру сетей связи 5G/IMT-2020 и сетей 2030 / Коваленко В.Н., Мутханна А.С.А., Родакова А.О., Волков А.Н. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2021). X Юбилейная Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. СПб, 2021.
97. Liu Y Adaptive Multi-Resource Allocation for Cloudlet-Based Mobile Cloud Computing System / Y. Liu, M.J. Lee, Y. Zheng // IEEE Trans. Mob. Comput., vol. 15. no. 10. – Oct., 2016. – P. 2398–2410.
98. Verbelen T. Cloudlets: bringing the cloud to the mobile user / T. Verbelen, P. Simoens, F. De Turck, B. Dhoedt, // in Proceedings of the third ACM workshop on Mobile cloud computing and services - MCS '12, Low Wood Bay, Lake District, UK, – 2012. – P. 29.
99. Beck M.T. Mobile Edge Computing: A Taxonomy / M.T. Beck, M. Werner, S. Feld, and T. Schimper. – 2014. – P. 7.
100. Liu J. Offloading Schemes in Mobile Edge Computing for Ultra-Reliable Low Latency Communications / J. Liu, Q. Zhang // IEEE Access, vol. 6, – 2018.
101. Kim Y. Dual-Side Optimization for Cost-Delay Tradeoff in Mobile Edge Computing / Y. Kim, J. Kwak, and S. Chong // IEEE Transaction. Veh. Technol., vol. 67, no. 2. – February, 2018. – P. 1765–1781.
102. Волков А.Н. Инфраструктурные технологии в распределенных вычислениях для реализации услуг дополненной реальности / Воронина К.С., Коваленко В.Н., Мутханна А.С.А., Волков А.Н. // Научно-

техническая конференция Санкт-Петербургского НТОРЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2021. № 1 (76). С. 169-171

103. Trinh H. Energy-Aware Mobile Edge Computing and Routing for Low-Latency Visual Data Processing // *IEEE Transaction Multimedia*, vol. 20, no. 10. – Oct., 2018. – P. 2562–2577.
104. Thinh T.Q. Offloading in Mobile Edge Computing: Task Allocation and Computational Frequency Scaling / J. Tang, Q. D. La, and T.Q.S. Quek // *IEEE Transaction Communication*. – 2017. – pp. 3571–3584.
105. Yang L. Mobile Edge Computing Empowered Energy Efficient Task Offloading in 5G / H. Zhang, M. Li, J. Guo, H. Ji // *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 7. – Jul., 2018. – P. 6398–6409.
106. Волков А.Н. Исследование подходов управления многоуровневой облачной структурой / Мутханна А.С.А., Коваленко В.Н., Волков А.Н. // *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019)*. Сб. науч. ст. VIII Международной научно-технической и научно-методической конференции: в 4 т. 2019
107. Chen X. Efficient Multi-User Computation Offloading for Mobile-Edge Cloud Computing / L. Jiao, W. Li, and X. Fu // *IEEEACM Transaction Networks*, volume: 24, no. 5. – October, 2016. – P. 2795 – 2808.
108. Vallina-Rodriguez N. Energy management techniques in modern mobile handsets / J. Crowcroft // *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. – 2012. 15(1). – pp. 179–198.
109. Kumar K. Cloud Computing for Mobile Users: Can Offloading Computation Save Energy / Y.H. Lu // *Computer*. – 2010. 43(4). – pp. 51–56.
110. Elgendy I. A. An efficient and secured framework for mobile cloud computing / W-Z Zhang, C-Y Liu // *IEEE Transactions on Cloud Computing*. – 2018. 9(1). – pp. 79–87.
111. Satyanarayanan M. The case for vm-based cloudlets in mobile computing / P. Bahl, R. Caceres, and others // *IEEE pervasive Computing*. – 2009. volume: 8(4), pp. 14–23.

112. Mach P. Mobile edge computing: A survey on architecture and computation offloading / Z. Becvar // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, – 2017. volume: 19(3). pp. 1628–1656.
113. Волков А.Н. Снижение круговой задержки и нагрузки в многоуровневой облачной архитектуре / Мутханна А.С.А., Коваленко В.Н., Волков А.Н. // *СПБНТОРЭС: Труды ежегодной научно-технической конференции, посвященной Дню радио*. Санкт-Петербург, 2019 г.
114. Satria D. Recovery for overloaded mobile edge computing / D. Park, M. Jo // *Future Generation Computer Systems*. – 2017. volume: 70, pp. 138-147.
115. Sheng Z. Energy efficient cooperative computing in mobile wireless sensor networks / C. Mahapatra, V.C. Leung, and others // *IEEE Transactions on Cloud Computing*. – 2015. volume: 6(1). pp.114 – 126.
116. Khalili S. Inter-layer per-mobile optimization of cloud mobile computing: a message-passing approach / Simeone O. // *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. – 2016. volume: 27(6), pp.814-827.
117. Liu L. Multi-objective optimization for computation offloading in mobile-edge computing / Z. Chang, X. Guo, and others // *2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. – 2017, pp. 832-837.
118. Wang Y. Mobile-edge computing: Partial computation offloading using dynamic voltage scaling / M. Sheng, X. Wang, and others // *IEEE Transactions on Communications*, – 2016. volume: 64(10), pp. 4268-4282.
119. Volkov A. AR/VR service migration algorithm based distributed edge computing system for Telesurgery / Kharlamov, M., Al-Sveiti, M., Karpychev, M., Muthanna, A. // *In Proceedings of the 7th International Conference on Future Networks and Distributed Systems.*, pp. 647-656., December 2023.
120. Mao Y. Dynamic computation offloading for mobile-edge computing with energy harvesting devices / J. Zhang, K.B. Letaief // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, – 2016. volume: 12, pp.3590-3605.
121. Sun, L. Edge-Cloud Computing and Artificial Intelligence in Internet of Medical Things: Architecture, Technology and Application / Jiang, X., Ren, H., Ren, H.,

- & Guo, Y. // IEEE Access, volume: 8., <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997831>
122. Silitonga, D. Edge Computing in E-commerce Business: Economic Impacts and Advantages of Scalable Information Systems / Rohmayanti, S. A. A., Aripin, Z., Kuswandi, D., Sulistyono, A. B., & Juhari // EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems, 2024., volume: 11(1). <https://doi.org/10.4108/eetsis.4375>
 123. Volkov A. Service Migration Algorithm for Distributed Edge Computing in 5G/6G Networks / Kuznetsov, K., Kuzmina, E., Lapteva, T., Muthanna, A., Aziz, A. // In International Conference on Next Generation Wired/Wireless Networking., pp. 320-337. Cham: Springer Nature Switzerland., December 2023.
 124. Khan, W. Z. Edge computing: A survey. / Ahmed, E., Hakak, S., Yaqoob, I., & Ahmed, A. // Future Generation Computer Systems, 2019., volume: 97, pp.219–235. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.050>
 125. Cao, K. An Overview on Edge Computing Research / Liu, Y., Meng, G., & Sun, Q. // IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020., <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991734>.
 126. Hossain, M. D. The role of microservice approach in edge computing: Opportunities, challenges, and research directions / Sultana, T., Akhter, S., Hossain, M. I., Thu, N. T., Huynh, L. N. T., Huh, E. N., and others // ICT Express. Korean Institute of Communications and Information Sciences., 2023, December, <https://doi.org/10.1016/j.ict.2023.06.006>.
 127. Volkov A. Novel AI-based scheme for traffic detection and recognition in 5G based networks / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Ateya, A. // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems., 2019.
 128. Raeisi-Varzaneh M. Resource Scheduling in Edge Computing: Architecture, Taxonomy, Open Issues and Future Research Directions / Dakkak O., Habbal A., Kim B.S. // IEEE Access. 2023., volume:11, pp. 25329–25350. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3256522>.
 129. Technical Specification ETSI GS MEC 030 V3.3.1. (2022-03). Multi-access Edge Computing (MEC); V2X Information Services API.

130. Technical Specification ETSI GS MEC 003 V3.1.1 (2022-03). Multi-access Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture.
131. Technical Specification ETSI TS 123 558 V17.3.0 (2022-05). 5G; Architecture for enabling Edge Applications.
132. Technical Specification 3GPP TS 23.558 version 17.3.0 Release 17. (2023).
133. Group Report ETSI GR MEC 035 V3.1.1 (2021-06). Multi-access Edge Computing (MEC); Study on Inter-MEC systems and MEC-Cloud systems coordination.
134. GSMA Official Document OPG.02 - Operator Platform: Requirements and Architecture, July 2023.
135. ETSI White Paper No. 49. MEC federation: deployment considerations. 1st edition – June 2022., ISBN:979109262070.
136. M.-Y. Lin. Resource Request Dispatch in Standalone and Federated MEC Systems: A Matching Game Approach / L.-H. Yen and H. Baghban // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Marrakesh, Morocco, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/WCNC.2019.8886075.
137. Group Specification ETSI GS MEC 040 V3.1.1 (2023-02). Multi-access Edge Computing (MEC); Federation enablement APIs.
138. OpenFog Reference Architecture for Fog Computing. OPFRA001.020817, OpenFog Consortium., February 2017, USA.
139. Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. Fog Computing Conceptual Model. NIST Special Publication 500-325., March 2018., USA., doi: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.500-325>.
140. International Standard ISO/IEC/IEEE 42010:2022. Software, systems and enterprise — Architecture description, ISO/IEC JTC 1/SC 7, Edition 2, November 2022.
141. Taherkordi A. Data-Centric IoT Services Provisioning in Fog-Cloud Computing Systems: Poster Abstract / A. Taherkordi, F. Eliassen // in Proceedings of the Second International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation - IoTDI '17, Pittsburgh, PA, USA, – 2017. – P. 317–318.

142. Luan T.H. Fog Computing: Focusing on Mobile Users at the Edge / T.H. Luan, L. Gao, Z. Li, Y. Xiang, G. We, L. Sun. – P. 11.
143. Mukherjee M. Survey of fog computing: Fundamental, network applications, and research challenges / M. Mukherjee, L. Shu, D. Wang // IEEE Communications Surveys & Tutorials, – 2018. 20(3). – pp. 1826-1857.
144. Oueis J. Small cell clustering for efficient distributed fog computing: A multi-user case / J. Oueis, E.C. Strinati, S. Sardellitti, et al. // 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall). – 2015. – pp. 1–5.
145. Goudarzi M. An application placement technique for concurrent IoT applications in edge and fog computing environments / M. Goudarzi, H. Wu, M. Palaniswami, R. Buyya // IEEE Trans. Mob. Comput. – 2021. – No 20. – pp. 129 –1311.
146. Muthanna A. Secure and reliable IoT networks using fog computing with software-defined networking and blockchain. / A. Muthanna, A.A. Ateya, A. Khakimov, et al. // J Sensor Actuator Netw. – 2019. – No 8(1). – pp.15.
147. Mahmoud M. Distributed Edge Computing to Assist LPWAN: Fog-MEC Model / M. Mahmoud, A.A. Ateya, A. Muthanna, A. Zaghloul, R. Kirichek, A. Koucheryavy // In The 5th International Conference on Future Networks & Distributed Systems – December 2021.– pp.587-594.
148. Ungurean I. Software Architecture of a Fog Computing Node for Industrial Internet of Things / I. Ungurean, N.C. Gaitan // Sensors. – 2021. – No. 21(11). – pp. 37-15.
149. Akbar A. SDN-Enabled Adaptive and Reliable Communication in IoT-Fog Environment Using Machine Learning and Multiobjective Optimization / A. Akbar, M. Ibrar, M.A. Jan, A.K. Bashir, L. Wang // IEEE Internet of Things Journal. – 2020, volume: 8(5). – pp. 3057-3065.
150. Volkov A. Traffic Type Recognition in 6G Software-Defined Networking for Telepresence Services / Mineeva, V., Muthanna, A., Koucheryavy, A. // In 2024 26th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT), pp. 01-06. IEEE, February 2024.

151. Hu L. If-rans: intelligent traffic prediction and cognitive caching toward fog-computing-based radio access networks. / L. Hu, Y. Miao, J. Yang, A. Ghoneim, M.S. Hossain, M. Alrashoud // IEEE Wireless Communications. – 2020, volume: 27(2)., – pp. 29-35.
152. Volkov A. Resource Allocation Computing Algorithm for UAV Dynamical Statements based on AI Technology / Kovalenko, V., Rodakova, A., Hamza Mohammed Ridha Al-Khafaji, Muthanna, A., Koucheryavy, A. // Webology, Volume 19, Number 1., January 2022.
153. Volkov A. Deep Learning for IoT Traffic Prediction Based on Edge Computing / Muthanna, A., Koucheryavy, A., Abdelah A., Galyamov D. // Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. DCCN 2020. Communications in Computer and Information Science, vol 1337. Springer, Cham., 2021.
154. Muthanna A. Secure and reliable IoT networks using fog computing with software-defined networking and blockchain. / A. Muthanna, A. Ateya, A. Khakimov, I. Gudkova, A. Abuarqoub, K. Samouylov, A. Koucheryavy // Journal of Sensor and Actuator Networks. – 2019. – Volume: 8(1), pp-15.
155. Das, R. A review on fog computing: Issues, characteristics, challenges, and potential applications / Inuwa, M.M. // Telematics and Informatics Reports. Elsevier B.V. June 2023., <https://doi.org/10.1016/j.teler.2023.100049>
156. Yi, S. A survey of fog computing: Concepts, applications and issues. / Li, C., & Li, Q // In Mobidata 2015 - Proceedings of the 2015 Workshop on Mobile Big Data, co-located with MobiHoc 2015., Vol. June 2015, pp.37–42. <https://doi.org/10.1145/2757384.2757397>
157. Волков А.Н. Туманные вычисления в сетях ИМТ-2030 для услуг телеприсутствия / Волков А.Н., Кучерявый А.Е // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления, Россия, Москва, ИПУ РАН, 2024.
158. Naposan Y.P.N. Fog Computing-Based System for Decentralized Smart Parking System by Using Firebase / I Gde Dharma Nugraha // Jurnal Nasional Teknik

Elektro Dan Teknologi Informasi, volume: 13(1), 2024, pp. 44–52.
<https://doi.org/10.22146/jnteti.v13i1.10095>

159. Волков А.Н. Исследование и разработка методов построения инфраструктуры и предоставления услуг сетей связи на основе технологий искусственного интеллекта // Диссертация на соискание уч. ст. к.т.н., СПб., 2018.
160. Costa, B. Orchestration in Fog Computing: A Comprehensive Survey / Bachiega, J., De Carvalho, L.R., & Araujo, A.P.F. // ACM Computing Surveys. Association for Computing Machinery., March 2023., <https://doi.org/10.1145/3486221>
161. Volkov A. Microservice-Based Fog Testbed for 6G Applications / Kuzmina, E., Tefikova, M., Muthanna, A., Ateya, A.A., Koucheryavy, A. // International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT pp.174-182
162. Sabireen, H. A Review on Fog Computing: Architecture, Fog with IoT, Algorithms and Research Challenges. / Neelananarayanan, V. // ICT Express, volume: 7(2), 2021, pp.162–176. <https://doi.org/10.1016/j.ict.2021.05.004>
163. Chiang, M. Fog and IoT: An Overview of Research Opportunities / Zhang, T. // IEEE Internet of Things Journal. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., December 2016., <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2584538>.
164. Taleb, T. On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration / Samdanis, K., Mada, B., Flinck, H., Dutta, S., & Sabella, D // IEEE Communications Surveys and Tutorials, volume:19(3), 2017, pp. 1657–1681. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2705720>.
165. Volkov A. Migration Routing Algorithm for Microservice Based Fog Computing System. / Kuzmina, E., Tefikova, M., Muthanna, A., Koucheryavy, A. // In 2024 26th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACTION), pp. 183-186. IEEE, February 2024.
166. ITU-T Recommendation Y.3102. Framework of the IMT-2020 network: ITU-T, Geneva. – May 2018.

167. ITU-T Recommendation Y.3100. Terms and definitions for IMT-2020 network: ITU-T, Geneva. – 2017.
168. ITU-T Recommendation Y.3101. Requirements of the IMT-2020 network: ITU-T, Geneva. – 2018.
169. ITU-T Recommendation Y.3110. IMT-2020 network management and orchestration requirements: ITU-T, Geneva. – 2017.
170. ITU-T Recommendation Y.3111. IMT-2020 network management and orchestration framework: ITU-T, Geneva. – 2017.
171. ITU-T Recommendation Y.3150. High-level technical characteristics of network softwarization for IMT-2020: ITU-T, Geneva. – 2018.
172. ITU-T Recommendation Y.3172. Architectural framework for machine learning in future networks including IMT-2020: ITU-T, Geneva. – 2019.
173. ITU-T Recommendation Y.3400. Coordination of networking and computing in IMT-2020 networks and beyond - Requirements: ITU-T, Geneva. – 2023.
174. ITU-T Recommendation Y.3200. Fixed, mobile and satellite convergence – Requirements for IMT-2020 networks and beyond: ITU-T, Geneva. – 2023.
175. ITU-T Recommendation Y.3130. Requirements of IMT-2020 fixed mobile convergence: ITU-T, Geneva. – 2022.
176. Technical Report 3GPP TR 22.822 (2018), Study on using satellite access in 5G, Stage 1 (Release 16).
177. ITU-T Recommendation Y.3209. Fixed, mobile and satellite convergence - Traffic scheduling for IMT-2020 networks and beyond: ITU-T, Geneva. – 2024.
178. ITU-T Recommendation Y.3210. Fixed, mobile and satellite convergence - Distributed ledger technology for IMT-2020 networks and beyond: ITU-T, Geneva. – 2024.
179. ITU-T Recommendation Y.3211. Fixed, mobile and satellite convergence - Requirements of supporting airborne broadband communication for IMT-2020 networks and beyond: ITU-T, Geneva. – 2024.

180. ITU-T Recommendation Y.3212. Fixed, mobile and satellite convergence - Requirements of supporting High Altitude Platform for IMT-2020 networks and beyond: ITU-T, Geneva. – 2024.
181. ITU-T Recommendation Y.3214. Fixed, mobile and satellite convergence - Service function chain (SFC) for IMT-2020 networks and beyond: ITU-T, Geneva. – 2024.
182. ITU-T Recommendation Y.3215. Fixed, mobile and satellite convergence - Requirements of network sharing for IMT-2020 networks and beyond: ITU-T, Geneva. – 2024.
183. ITU-T Recommendation Y.3216. Fixed, mobile and satellite convergence - Distributed core network for IMT-2020 networks and beyond: ITU-T, Geneva. – 2024.
184. ITU-T Recommendation Y.3213. Fixed, mobile and satellite convergence - Policy control for IMT-2020 networks and beyond: ITU-T, Geneva. – 2024.
185. ITU-T Recommendation Y.3208. Fixed, mobile and satellite convergence - Session management with satellite backhaul for IMT-2020 networks and beyond: ITU-T, Geneva. – 2024.
186. Mohammadi, M., Al-Fuqaha, A., Sorour, S. Guizani, M.: ‘Deep Learning for IoT Big Data and Streaming Analytics: A Survey’, IEEE Communications Surveys & Tutorials.
187. Карташевский И.В. Анализ среднего времени задержки в системе массового обслуживания при обработке коррелированного трафика / Карташевский И.В., Волков А.Н., Киричек Р.В. // Электросвязь. 2019. № 3. С.41-50.
188. Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard and L. D. Jackel: Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition, Neural Computation, 1(4):541-551, Winter 1989.
189. Hochreiter, S. Long Short-Term Memory. Neural Computation, volume: 9(8), & Schmidhuber, J. 1997, pp.1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>.

190. Zhang, Q., Yang, L.T., Chen, Z. and Li, P.: 'A survey on deep learning for big data', *Information Fusion*, 2018, 42, pp.146-157.
191. S. Zhongfu and Y.S.D. Keming, "Development Trend of Internet of Things and Perspective of Its Application in Agriculture", *Agriculture Network Information*, vol. 5, (2010), pp. 5-8.
192. Wang, S. Machine learning in network anomaly detection: A survey / Balarezo, J. F., Kandeepan, S., Al-Hourani, A., Chavez, K. G., & Rubinstein, B. // *IEEE Access*, volume: 9, 2021, 152379–152396. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3126834>
193. A. Ateya. Intelligent core network for Tactile Internet system / A. Muthanna, I. Gudkova, A. Vybornova and A. Koucheryavy // *International Conference on Future Networks and Distributed Systems*, ACM, P.15, Cambridge, July 2017.
194. Волков А.Н. Наносети, как одно из проявлений ИМТ-2020 / Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Пирмагомедов Р.Я. // *Информационные технологии и телекоммуникации*. – 2017. – Т. 5. – №. 3.
195. Buczak, A. L. A Survey of Data Mining and Machine Learning Methods for Cyber Security Intrusion Detection. / & Guven, E. // *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, volume: 18(2), 2016, pp.1153–1176. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2494502>
196. Zhang, C. Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey / Patras, P., & Haddadi, H. // *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, volume: 21(3), 2019, pp.2224–2287. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2904897>
197. Lim, W. Y. B. Federated Learning in Mobile Edge Networks: A Comprehensive Survey / Luong, N. C., Hoang, D. T., Jiao, Y., Liang, Y. C., Yang, Q., Miao, C. // *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, volume: 22(3), 2020. pp.2031–2063. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2986024>
198. Phyu, H. P. Machine Learning in Network Slicing - A Survey / Naboulsi, D., & Stanica, R. // *IEEE Access*, volume: 11, 2023., 39123–39153. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3267985>.

199. Волков А.Н. Искусственный интеллект в сетях связи / Волков А.Н., Кучерявый А.Е., Бородин А.С., Мутханна А.С.А., Абделлах А.Р. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. сборник научных статей: в 4х томах. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. Санкт-Петербург, 2021. С. 8-18.
200. Phyu, H. P. Towards Energy Efficiency in RAN Network Slicing. In Proceedings - Conference on Local Computer Networks, LCN / Naboulsi, D., Stanica, R., & Poitau, G. // IEEE Computer Society. 2023. <https://doi.org/10.1109/LCN58197.2023.10223377>.
201. Attaran, M. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities / , & Celik, B. G. // Decision Analytics Journal, volume:6., 2023., <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>.
202. Tao, F. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data./ , Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. // International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94(9–12), 3563–3576., 2018., <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.
203. Jones, D. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. / Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, volume: 29, pp.36–52., 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
204. García, C.E. Model predictive control: Theory and practice-A survey. / Prett, D.M., & Morari, M. // Automatica, 25(3), pp.335–348., 1989. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(89\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0005-1098(89)90002-2).
205. Kuruvatti, N. P., Habibi, M. A., Partani, S., Han, B., Fellan, A., & Schotten, H.D. Empowering 6G Communication Systems With Digital Twin Technology: A Comprehensive Survey / Kuruvatti, N. P., Habibi, M. A., Partani, S., Han, B., Fellan, A., & Schotten, H. D. // IEEE Access, – 2022.

206. Allam Z. Future (post-COVID) digital, smart and sustainable cities in the wake of 6G: Digital twins, immersive realities and new urban economies. / Z. Allam, D.S. Jones // Land use policy – 2021. – pp. 105-201.
207. Masaracchia A. Digital Twin for 6G: Taxonomy, Research Challenges, and the Road Ahead / A. Masaracchia, V. Sharma, B. Canberk, O.A. Dobre, T.Q. Duong // IEEE Open Journal of the Communications Society, – 2022.
208. Sanaei Z. Heterogeneity in Mobile Cloud Computing: Taxonomy and Open Challenges / Z. Sanaei, S. Abolfazli, A. Gani, R. Buyya // IEEE Communication Surveys. Tutor., volume: 16, no. 1, 2014., pp. 369-392.
209. Group Report. ETSI GR ENI 004 V1.1.1 (2018-06). Experiential Networked Intelligence (ENI); Terminology for Main Concepts in ENI.
210. Technical Specification. 3GPP TS 23.501. System architecture for the 5G System (5GS).
211. GSMA Official Document IR.92 IMS Profile for Voice and SMS. Version 18.0., April 2023.
212. ITU-T Recommendation Y.3061 Autonomous networks – Architecture framework: ITU-T, Geneva. – 2023.
213. ITU-T Recommendation Y.3115 AI enabled cross-domain network architectural requirements and framework for future networks including IMT-2020: ITU-T, Geneva. – 2022.
214. ITU-T Recommendation Y.3177 Architectural framework for artificial intelligence-based network automation for resource and fault management in future networks including IMT-2020: ITU-T, Geneva. – 2021.
215. Group Specification. ETSI GS ZSM 009-1 V1.1.1 (2021-06). Zero-touch network and Service Management (ZSM); Closed-Loop Automation; Part 1: Enablers.
216. Волков А. Н. Метавселенная как следующий виток развития сетевых технологий // 79-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. 2024. С.210-212.

217. A.A.A.Ateya, A.A.A.El-Latif, A.Muthanna, A.Volkov, A.Koucheryavy/
Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Network. River Book,
233p, 2024.
218. Peng, H. 6G toward Metaverse: Technologies, Applications, and Challenges. /
P.C. Chen, P.H. Chen, Y.S. Yang, C.C. Hsia, L.C. Wang // In 2022 IEEE VTS
Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS) // IEEE. – 2022.
August, – P. 6–10.
219. Volkov A. Efficient Transmission of Holographic Images: A Novel Approach
Toward 6G Telepresence Services / Svechnikov, D., Pankov, B., Nesterova, Y.,
Ateya, A.A., Koucheryavy, A. // In International Conference on Distributed
Computer and Communication Networks., pp. 34-43., Cham: Springer Nature
Switzerland., September 2023.
220. Dwivedi, Y. K. Metaverse beyond the hype: Multidisciplinary perspectives on
emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy.
/ , Hughes, L., Baabdullah, A. M., Ribeiro-Navarrete, S., Giannakis, M., Al-
Debei, M. M., ... Wamba, S. F.// International Journal of Information
Management, 66., 2022., <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2022.102542>
221. Wang, G. Development of metaverse for intelligent healthcare. / Badal, A., Jia,
X., Maltz, J. S., Mueller, K., Myers, K. J., ... Zeng, R. // Nature Machine
Intelligence, 4(11), 2022., pp.922–929. <https://doi.org/10.1038/s42256-022-00549-6>.
222. Huynh-The, T. Blockchain for the metaverse: A Review / Gadekallu, T. R.,
Wang, W., Yenduri, G., Ranaweera, P., Pham, Q. V., ... Liyanage, M. // Future
Generation Computer Systems, 143, 2023., pp.401–419.
<https://doi.org/10.1016/j.future.2023.02.008>.
223. Park, S. M. A Metaverse: Taxonomy, Components, Applications, and Open
Challenges. / Kim, Y. G. // IEEE Access, 10, 2022. pp.4209–4251.,
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3140175>.
224. Wang, Y. A Survey on Metaverse: Fundamentals, Security, and Privacy / Su, Z.,
Zhang, N., Xing, R., Liu, D., Luan, T. H., & Shen, X. // IEEE Communications

Surveys and Tutorials, 25(1), 2023. pp. 319–352,
<https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3202047>.

225. Ali, S. Metaverse in Healthcare Integrated with Explainable AI and Blockchain: Enabling Immersiveness, Ensuring Trust, and Providing Patient Data Security / , Abdullah, Armand, T.P.T., Athar, A., Hussain, A., Ali, M., ... Kim, H.C. // Sensors, volume: 23(2), 2023. <https://doi.org/10.3390/s23020565>.
226. Buhalis, D. Metaverse as a disruptive technology revolutionising tourism management and marketing / Buhalis, D., Leung, D., & Lin, M. // Tourism Management. Elsevier Ltd., 2023, <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2023.104724>.
227. Волков А.Н. Сетевая вселенная / Волков А.Н., Кучерявый А.Е., Мутханна А.С.А. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция; сб. науч. ст. в 4 т. / СПбГУТ, 2024. Т. 1, 2024. С. 9-11.
228. Hwang, G. J. Definition, roles, and potential research issues of the metaverse in education: An artificial intelligence perspective / Chien, S.Y. // Computers and Education: Artificial Intelligence, 3, 2022 <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2022.100082>.
229. Волков А.Н. Влияние изменения методов обеспечения качества обслуживания на цифровой аватар / Минеева В.Д., Житов А.А., Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е. // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления, Россия, Москва, ИПУ РАН, 2024.
230. Svechnikov, D. Holographic Images Delivery Model Toward 6G Telepresence Services. / Dunaytsev, R., Muthanna, A., Aziz, A. // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. NEW2AN ruSMART 2023 2023. Lecture Notes in Computer Science, vol 14542. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-60994-7_28.
231. Cipresso, P. The past, present, and future of virtual and augmented reality research: A network and cluster analysis of the literature / Giglioli, I.A.C.,

- Raya, M. A., & Riva, G. // *Frontiers in Psychology*, 9(NOV), 2018, <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02086>.
232. Dwivedi, Y. Metaverse marketing: How the metaverse will shape the future of consumer research and practice / K., Hughes, L., Wang, Y., Alalwan, A. A., Ahn, S. J., Balakrishnan, J., et al // *Psychology and Marketing*, 40(4), 2023, pp. 750–776. <https://doi.org/10.1002/mar.21767>.
233. Dwivedi, Y.K. Metaverse beyond the hype: Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy / Hughes, L., Baabdullah, A. M., Ribeiro-Navarrete, S., Giannakis, M., Al-Debei, M. M., ... Wamba, S. F. // *International Journal of Information Management*, 66, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2022.102542>.
234. Wang, Y. A Survey on Metaverse: Fundamentals, Security, and Privacy / Su, Z., Zhang, N., Xing, R., Liu, D., Luan, T. H., & Shen, X. // *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 25(1), 2023, pp. 319–352. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3202047>
235. Mourtzis, D. Human centric platforms for personalized value creation in metaverse / Panopoulos, N., Angelopoulos, J., Wang, B., & Wang, L. // *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 2022, pp. 653–659. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.11.004>.
236. Dionisio, J. D. N. 3D virtual worlds and the metaverse: Current status and future possibilities / Burns, W. G., & Gilbert, R. // *ACM Computing Surveys*, 45(3), 2013, <https://doi.org/10.1145/2480741.2480751>.
237. Duan, H. Metaverse for Social Good: A University Campus Prototype / Li, J., Fan, S., Lin, Z., Wu, X., & Cai, W. // In *MM 2021 - Proceedings of the 29th ACM International Conference on Multimedia*. Association for Computing Machinery, Inc., 2021, pp. 153–161 <https://doi.org/10.1145/3474085.3479238>.
238. Allam, Z. The Metaverse as a Virtual Form of Smart Cities: Opportunities and Challenges for Environmental, Economic, and Social Sustainability in Urban Futures. / Sharifi, A., Bibri, S. E., Jones, D. S., & Krogstie, J. // *Smart Cities*, 5(3), 2022, pp. 771–801. <https://doi.org/10.3390/smartcities5030040>.

239. Bibri, S. E. The Metaverse as a virtual form of data-driven smart cities: the ethics of the hyper-connectivity, datafication, algorithmization, and platformization of urban society / Allam, Z. // *Computational Urban Science*, 2(1), 2022, <https://doi.org/10.1007/s43762-022-00050-1>.
240. Bibri, S. E. The Metaverse as a Virtual Form of Data-Driven Smart Urbanism: On Post-Pandemic Governance through the Prism of the Logic of Surveillance Capitalism. / Allam, Z. // *Smart Cities*, 5(2), 2022, pp. 715–727. <https://doi.org/10.3390/smartcities5020037>.
241. Kaddoura, S. The rising trend of Metaverse in education: challenges, opportunities, and ethical considerations / Al Hussein, F. // *PeerJ Computer Science*, 9., 2023., <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1252>.
242. Lv, Z. Generative artificial intelligence in the metaverse era. // *Cognitive Robotics*. KeAi Communications Co., 2023, <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.06.001>.
243. Abilkaiyrkyzy, A. Metaverse Key Requirements and Platforms Survey / Elhagry, A., Laamarti, F., & Saddik, A. E. // *IEEE Access*, 11, 2023, 117765–117787. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3325844>.
244. Lee, U. K. UTAUT in Metaverse: An “Ifland” Case / Kim, H. // *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 17(2), 2022, pp. 613–635. <https://doi.org/10.3390/jtaer17020032>.
245. Wang, H. A Survey on the Metaverse: The State-of-the-Art, Technologies, Applications, and Challenges. / Ning, H., Lin, Y., Wang, W., Dhelim, S., Farha, F., ... Daneshmand, M. // *IEEE Internet of Things Journal*, 10(16), 2023., 14671–14688. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3278329>.
246. Wu, T. C. Scoping review of metaverse in emergency medicine / Ho, C. T. B. A // *Australasian Emergency Care*. Elsevier Australia., 2023., <https://doi.org/10.1016/j.auec.2022.08.002>
247. Richter, S. What is novel about the Metaverse? / & Richter, A. // *International Journal of Information Management*, 73, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102684>

248. Zhao, Y. Metaverse: Perspectives from graphics, interactions and visualization / Jiang, J., Chen, Y., Liu, R., Yang, Y., Xue, X., & Chen, S // *Visual Informatics*. Elsevier B.V., 2022. <https://doi.org/10.1016/j.visinf.2022.03.002>.
249. Weking, J. Metaverse-enabled entrepreneurship / Desouza, K. C., Fielt, E., & Kowalkiewicz, M. // *Journal of Business Venturing Insights*, 19. 2023., <https://doi.org/10.1016/j.jbvi.2023.e00375>.
250. Dolgui, A. Metaverse supply chain and operations management / Ivanov, D. // *International Journal of Production Research*, 61(23). 2023, 8179–8191. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2240900>.
251. Волков А.Н. Интерфейс взаимодействия Пользователь – Метавселенная / А.Н. Волков // 79-я Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио: сб. докладов / СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Санкт-Петербург. 2024. С. 213-215.
252. Jackson, I. Generative artificial intelligence in supply chain and operations management: a capability-based framework for analysis and implementation / Ivanov, D., Dolgui, A., & Namdar, J. // *International Journal of Production Research.*, 2024, <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2309309>.
253. Hennig-Thurau, T. Social interactions in the metaverse: Framework, initial evidence, and research roadmap / Aliman, D. N., Herting, A. M., Cziehso, G. P., Linder, M., & Kübler, R. V. // *Journal of the Academy of Marketing Science*, 51(4), 2023, pp. 889–913. <https://doi.org/10.1007/s11747-022-00908-0>.
254. Mladenović, D. MetaWOM – toward a sensory word-of-mouth (WOM) in the metaverse / Ismagilova, E., Filieri, R., & Dwivedi, Y. K. // *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 36(6), 2024. 2144–2163. <https://doi.org/10.1108/IJCHM-04-2023-0474>
255. Flavián, C. The dark side of the metaverse: The role of gamification in event virtualization / Ibáñez-Sánchez, S., Orús, C., & Barta, S // *International Journal of Information Management*, 75, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2023.102726>.

256. Tang, F. The Roadmap of Communication and Networking in 6G for the Metaverse / Chen, X., Zhao, M., & Kato, N. // *IEEE Wireless Communications*, 30(4), 2023. pp.72–81. <https://doi.org/10.1109/MWC.019.2100721>.
257. Xu, M. A Full Dive Into Realizing the Edge-Enabled Metaverse: Visions, Enabling Technologies, and Challenges. / , Ng, W. C., Lim, W. Y. B., Kang, J., Xiong, Z., Niyato, D., ... Miao, C. // *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 25 (1), 2023., pp. 656–700. <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3221119>.
258. Wang, Y. Mobile Edge Computing, Metaverse, 6G Wireless Communications, Artificial Intelligence, and Blockchain: Survey and Their Convergence / & Zhao, J. // In *2022 IEEE 8th World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2022*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT54382.2022.10152245>.
259. Zhang, L. Overview of the Integration of Communications, Sensing, Computing, and Storage as Enabling Technologies for the Metaverse over 6G Networks / Du, Q., Lu, L., & Zhang, S. // *Electronics (Switzerland)*, 12(17)., 2023., <https://doi.org/10.3390/electronics12173651>.
260. Pena-Rios, A.. Guest Editorial The Metaverse and the Future of Education. / & Wu, J. G. // *IEEE Transactions on Learning Technologies*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. <https://doi.org/10.1109/TLT.2023.3324843>.
261. Technical Report. FGMV-52 – Focus Group on metaverse. Metaverse standardization landscape for gap analyses. ITU-T, Geneva. – June 2024.
262. Technical Report. FGMV-51 – Focus Group on metaverse. Standardization roadmap for metaverse. ITU-T, Geneva. – June 2024.
263. Technical Specification. FGMV-50 – Focus Group on metaverse. Methodology on assessment of GHG emissions of metaverse. ITU-T, Geneva. – June 2024.
264. Technical Report. FGMV-49 – Focus Group on metaverse. Metaverse Sustainability: Driving energy efficiency and GHG emissions reduction. ITU-T, Geneva. – June 2024.

265. Technical Report. FGMV-48 – Focus Group on metaverse. Guidance on how to build a metaverse for all: Part II - Survey. ITU-T, Geneva. – June 2024.
266. Technical Specification. FGMV-26 – Focus Group on metaverse. Requirements for communication between human-avatar languages in the metaverse. ITU-T, Geneva. – March 2024.
267. Technical Report. FGMV-18 – Focus Group on metaverse. Guidance on how to build a metaverse for all – Part I: Legal Framework. ITU-T, Geneva. – December 2023.
268. Technical Report. FGMV-17 – Focus Group on metaverse. Guidelines and requirements on interpreting in the metaverse. ITU-T, Geneva. – December 2023.
269. Technical Report. FGMV-16 – Focus Group on metaverse. Accessibility in a sustainable metaverse. ITU-T, Geneva. – December 2023.
270. Technical Specification. FGMV-15 – Focus Group on metaverse. Accessibility requirements for metaverse services supporting IoT. ITU-T, Geneva. – December 2023.
271. Technical Specification. FGMV-08 – Focus Group on metaverse. Design criteria and technical requirements for sustainable metaverse ecosystems. ITU-T, Geneva. – October 2023.
272. Technical Specification. FGMV-05 – Focus Group on metaverse. Requirements of accessible products and services in the metaverse: Part II – User perspective. ITU-T, Geneva. – October 2023.
273. Technical Specification. FGMV-04 – Focus Group on metaverse. Requirements of accessible products and services in the metaverse: Part I – System design perspective. ITU-T, Geneva. – October 2023.
274. Technical Report. FGMV-03 – Focus Group on metaverse. Guidelines to assess inclusion and accessibility in metaverse standard development. ITU-T, Geneva. – October 2023.
275. Technical Report. FGMV-47 – Focus Group on metaverse. Economic Value Creation and Competition in metaverse. ITU-T, Geneva. – June 2024.

276. Technical Report. FGMV-14 – Focus Group on metaverse. Regulatory and economic aspects in the metaverse: Data protection. ITU-T, Geneva. – December 2023.
277. Technical Report. FGMV-07 – Focus Group on metaverse. Policy and regulation opportunities and challenges in the metaverse. ITU-T, Geneva. – October 2023.
278. Technical Report. FGMV-46 – Focus Group on metaverse. The essential components of trusted data use in building a trustworthy metaverse. ITU-T, Geneva. – June 2024.
279. Technical Report. FGMV-45 – Focus Group on metaverse. Challenges to achieving trustworthy metaverse. ITU-T, Geneva. – June 2024.
280. Technical Report. FGMV-44 – Focus Group on metaverse. Security for things across metaverses in aspects of data processing and management. ITU-T, Geneva. – June 2024.
281. Technical Report. FGMV-23 – Focus Group on metaverse. Considering online and offline implications in efforts to build confidence and security in the metaverse. ITU-T, Geneva. – March 2024.
282. Technical Report. FGMV-13 – Focus Group on metaverse. Responsible Use of AI for Child Protection in the metaverse. ITU-T, Geneva. – December 2023.
283. Technical Report. FGMV-12 – Focus Group on metaverse. Children's age verification in the metaverse. ITU-T, Geneva. – December 2023.
284. Technical Report. FGMV-11 – Focus Group on metaverse. Embedding safety standards and the user control of Personally Identifiable Information (PII) in the development of the metaverse. ITU-T, Geneva. – December 2023.
285. Technical Report. FGMV-10 – Focus Group on metaverse. Cyber risks, threats, and harms in the metaverse. ITU-T, Geneva. – December 2023.
286. Technical Report. FGMV-06 – Focus Group on metaverse. Guidelines for consideration of ethical issues in standards that build confidence and security in the metaverse. ITU-T, Geneva. – October 2023.

287. Technical Report. FGMV-43 – Focus Group on metaverse. High-level interoperability architecture for cross-platform metaverse. ITU-T, Geneva. – June 2024.
288. Technical Report. FGMV-42 – Focus Group on metaverse. Interoperability of identity of things across metaverse platforms. ITU-T, Geneva. – June 2024.
289. Technical Specification. FGMV-19 - Focus Group on metaverse. Service scenarios and high-level requirements for metaverse cross-platform interoperability. ITU-T, Geneva. – December 2023.
290. Technical Specification. FGMV-29 - Focus Group on metaverse. Reference model for the metaverse based on a digital twin enabling integration of virtual and physical worlds. ITU-T, Geneva. – March 2024.
291. Technical Specification. FGMV-28 - Focus Group on metaverse. Requirements for the metaverse based on digital twins enabling integration of virtual and physical worlds. ITU-T, Geneva. – March 2024.
292. Technical Specification. FGMV-41 - Focus Group on metaverse. The reference framework of industrial metaverse. ITU-T, Geneva. – June 2024.
293. Technical Specification. FGMV-40 - Focus Group on metaverse. Multimedia aspect of metaverse architecture. ITU-T, Geneva. – June 2024.
294. Technical Specification. FGMV-31 - Focus Group on metaverse. Requirements, functional framework and capability of IoT for metaverse. ITU-T, Geneva. – April 2024.
295. Technical Specification. FGMV-39 - Focus Group on metaverse. Use cases and requirements for virtual and real fusion coding in metaverse applications. ITU-T, Geneva. – June 2024.
296. Technical Specification. FGMV-38 - Focus Group on metaverse. Framework and requirements for the construction of human-driven 3D digital human application system for metaverse. ITU-T, Geneva. – June 2024.
297. Technical Report. FGMV-37 – Focus Group on metaverse. Landscape and use cases for the industrial metaverse. ITU-T, Geneva. – June 2024.

298. Technical Report. FGMV-36 – Focus Group on metaverse. The future of travel in the metaverse: landscape and use cases. ITU-T, Geneva. – June 2024.
299. Technical Report. FGMV-30 – Focus Group on metaverse. Overview of the application requirements of metaverse on emergency management in chemical industrial parks. ITU-T, Geneva. – April 2024.
300. Technical Report. FGMV-27 – Focus Group on metaverse. Guidelines for metaverse application in power system. ITU-T, Geneva. – March 2024.
301. Technical Specification. FGMV-22 - Focus Group on metaverse. Capabilities and requirements of generative artificial intelligence in metaverse applications and services. ITU-T, Geneva. – December 2023.
302. Technical Report. FGMV-09 – Focus Group on metaverse. Power metaverse: Use cases relevant to grid side and user side. ITU-T, Geneva. – October 2023.
303. Technical Report. FGMV-35 – Focus Group on metaverse. Building a People-centred CitiVerse. ITU-T, Geneva. – June 2024.
304. Technical Report. FGMV-34 – Focus Group on metaverse. Definitions of CitiVerse. ITU-T, Geneva. – June 2024.
305. Technical Specification. FGMV-33 - Focus Group on metaverse. Glossary for metaverse. ITU-T, Geneva. – June 2024.
306. Technical Report. FGMV-32 – Focus Group on metaverse. Definitions of CitiVerse. ITU-T, Geneva. – June 2024.
307. Technical Report. FGMV-25 – Focus Group on metaverse. Near-term and long-term Implications for people in the metaverse. ITU-T, Geneva. – March 2024.
308. Technical Report. FGMV-24 – Focus Group on metaverse. A framework for confidence in the metaverse. ITU-T, Geneva. – March 2024.
309. Technical Report. FGMV-21 – Focus Group on metaverse. Principles for building concepts and definitions related to metaverse. ITU-T, Geneva. – March 2024.
310. Technical Specification. FGMV-20 - Focus Group on metaverse. Definition of metaverse. ITU-T, Geneva. – December 2023.
311. Technical Report. FGMV-02 – Focus Group on metaverse. Metaverse: an analysis of definitions. ITU-T, Geneva. – October 2023.

312. Technical Report. FGMV-01 – Focus Group on metaverse. Exploring the metaverse: opportunities and challenges. ITU-T, Geneva. – July 2023.
313. International Standard ISO/IEC 18039:2019 Information technology — Computer graphics, image processing and environmental data representation — Mixed and augmented reality (MAR) reference model. February 2019.
314. J. Smart. Metaverse Roadmap: Pathways to the 3D Web // Acceleration Studies Foundation (ASF)., 2007.
315. M. Ball. THE METAVERSE And How It Will Revolutionize Everything // W. W. Norton & Company, Inc., 2022.
316. ITU-T Recommendation Y.3121. Quality of service requirements and framework for supporting deterministic communication services in local area networks for IMT-2020: ITU-T, Geneva. – January 2023.
317. International Standard ISO/IEC 23005-4:2018 Information technology — Media context and control Part 4: Virtual world object characteristics. September 2018.
318. ITU-T Recommendation F.748.15. Framework and metrics for digital human application systems: ITU-T, Geneva. – March 2022.
319. ITU-T Recommendation P.10/G.100. New definitions for inclusion in Recommendation ITU-T P.10/G.100. Amendment 2: ITU-T, Geneva. – May 2024.
320. ITU-T Focus Group Report D.WG1-01 - Exploring the metaverse: opportunities and challenges, FG-MV meeting, Shanghai. July 2023.
321. Волков А.Н. Туманность в перспективных сетях связи для услуг телеприсутствия / А.Н. Волков // Электросвязь. 2024. №4. С. 7-13.
322. Волков А.Н. Структуры распределенной динамической вычислительной системы туманных вычислений для микросервисов (DD-Fog) / А.Н. Волков // Электросвязь. 2021. №7. – С. 34-43.
323. Latva-Aho, M. Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence / M. Latva-Aho, K. Leppänen // 6G Flagship, University of Oulu, Oulu

324. McDonald, A. Cisco: 79% of world's mobile traffic to be video by 2022 / A. McDonald // Digital TV Europe (web-site). – <https://www.digitaltveurope.com/2019/02/20/cisco-79-of-worlds-mobile-traffic-to-be-video-by-2022/#close-modal>.
325. Волков А.Н. Стабильность кластера в динамических туманных вычислениях / А.Н. Волков // Электросвязь. 2024. №6. С. 8-17.
326. Волков А.Н. Искусственный Интеллект в сетях связи пятого и последующих поколений / Волков А.Н., Кучерявый А.Е, Бородин А.С., Мутханна А.С.А. // Электросвязь. 2021. №1. С.17-22
327. Кучерявый А.Е. Сети связи следующего поколения / А.Е. Кучерявый, А.Л. Цуприков. – М.: ФГУП ЦНИИС, 2006. - 280 с.
328. Ким Дж.-О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О. Ким, Ч.У. Мьюллер, У.Р. Клекка и др. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с. 11.
329. Мандель И.Д. Кластерный анализ / И.Д. Мандель. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 176 с.
330. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р.Н. Вадзинский. – М.: Наука, 2001. – 295 с.
331. Марочкина А.В. Моделирование и кластеризация трехмерной сети интернета вещей с применением метода оценки фрактальной размерности / А.В. Марочкина // Электросвязь. – 2023. – № 6. – С. 60–66.
332. Марочкина А.В. Выбор головных узлов кластеров в трехмерных сетях интернета вещей высокой плотности / А.В. Марочкина // Электросвязь. – 2023. – № 7. – С. 26-32.
333. Muthanna A. Survey on intelligence edge computing in 6G: Characteristics, challenges, potential use cases, and market drivers / A. Muthanna, A. Al-Ansi, A.M. Al-Ansi, I.A. Elgendy, A. Koucheryavy // Future Internet 13 (5), 118., 2021.
334. Волков А.Н. Метод прогнозирования нагрузки на контроллеры SDN с помощью технологий Искусственного интеллекта / А.Н. Волков, А.Е. Кучерявый // Электросвязь. 2021. № 2.

335. Волков А.Н. Динамические туманные вычисления и бессерверная архитектура: на пути к зеленым ИКТ / А.Н. Волков // Труды учебных заведений связи. 2024;10(3). С. 24-34.
336. Market Overview // Straits research. URL: <https://straitresearch.com/report/data-center-equipment-market> (дата обращения 31.05.2024).
337. Колбанёв М.О. Пути создания зеленых информационных технологий / М.О. Колбанёв, И.И. Палкин, Е.Д. Пойманова, Т.М. Татарникова // Гидрометеорология и экология. 2021. № 62. С. 127–138. DOI:10.33933/2074-2762-2021-62-127-138. EDN:OEJEMQ.
338. Manner J. Black software – the energy unsustainability of software systems in the 21st century / J. Manner // Oxford Open Energy. 2023. Vol. 2. DOI:10.1093/ooenergy/oia011.
339. Alloghani M.A. Architecting Green Artificial Intelligence Products: Recommendations for Sustainable AI Software Development and Evaluation // Artificial Intelligence and Sustainability. Signals and Communication. Cham: Springer, 2024. PP. 65–86. DOI:10.1007/978-3-031-45214-7_4.
340. Schwartz R., Dodge J., Smith N.A., Etzioni O. Green AI // Communications of the ACM. 2020. Vol. 63. Iss. 12. PP. 54–63. DOI:10.1145/3381831.
341. Li Y. Research on the structural features and influence mechanism of the green ICT transnational cooperation network / Y. Li, Z. Zhu, Y. Guan, Y. Kang // Economic Analysis and Policy. 2022. Vol. 75. PP. 734–749. DOI:10.1016/j.eap.2022.07.003.
342. Кричевский Г.Е. Экология и «Зеленые технологии». Как сдержать превращение биосферы в техносферу? / Г.Е. Кричевский // НБИКС – Наука. Технологии. 2019. Т. 3. № 8. С. 22–26.
343. Волков А.Н. Перспективные исследования сетей и услуг 2030 в лаборатории 6G Meganetlab СПбГУТ / Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е., Бородин А.С., Парамонов А.И., Владимиров С.С., Фокин Г.А., Дунайцев Р.А., Захаров М.В., Горбачева Л.С., Паньков Б.О., Анваржонов Б.Н. // Электросвязь. 2023. № 6. С. 5-14.

344. Волков А.Н. Задача маршрутизации в сети динамических туманных вычислений / А.Н. Волков // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 116-126.
345. Лавшук О.А. Метод маршрутизации в сетях ПоТ с использованием кластеризации для протокола RPL / О.А. Лавшук, Н.И. Листопад // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 4 (57). – С. 74–80. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_74. – EDN: RVSCGG
346. Волков А.Н. Идентификация трафика сервисов в сетях связи ИМТ-2020 и последующего поколения на основе метаданных потоков и алгоритмов машинного обучения / А.Н. Волков, А.Е.Кучерявый // Электросвязь. – 2020. – №11. – С. 21-28.
347. C. Mariocco Methods and apparatus to coordinate edge platforms / K. Doshi et all // US Patent, Pub.no.: US 2021/0014133 A1, Applicant: Intel Corporation, 2021.
348. Волков А.Н. Определение маршрута миграции микросервиса в сети туманных вычислений / Тефикова М.Р., Кузьмина Е.А., Волков А.Н. // Информационные технологии и телекоммуникации. 2023. Т. 11. № 1. С. 50-60.
349. Cruz, S.; Aguiar, A. Cooperative Localization in Vehicular Networks Dataset 2020.
350. From Images to 3D Shapes (FI3S) Available online: <https://www.kaggle.com/datasets/lehomme/from-images-to-3d-shapesfi3s> (accessed on 20 April 2024).
351. TikTok Dataset Available online: <https://www.kaggle.com/datasets/yasaminjafarian/tiktokdataset> (accessed on 20 April 2024).
352. YouTube Faces With Facial Keypoints Available online: <https://www.kaggle.com/datasets/selfishgene/youtube-faces-with-facial-keypoints> (accessed on 20 April 2024).

353. Google Scraped Image Dataset Available online: <https://www.kaggle.com/datasets/duttadebadri/image-classification> (accessed on 20 April 2024).
354. Ateya, A.A. Latency and energy-efficient multi-hop routing protocol for unmanned aerial vehicle networks. // Muthanna, A., Gudkova, I., Gaidamaka, Y. and Algarni, A.D. /International Journal of Distributed Sensor Networks, 15(8), 2019. p.1550147719866392.
355. Кучерявый А.Е. Модельная сеть для исследований и обучения в области услуг телеприсутствия / Кучерявый А.Е., Маколкина М.А., Парамонов А.И., и др. // Электросвязь. – 2022. – № 1. – С. 14-20.
356. Волков А.Н. Интерфейс взаимодействия с Метавселенной / А.Н. Волков // Электросвязь. 2024. №7. С. 36-42
357. Tejwani, R. An Avatar Robot Overlaid with the 3D Human Model of a Remote Operator / R. Tejwani, C. Ma, P. Bonato, H.H. Asada // 2023 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).
358. Michaeli, L. Error Models of the Analog to Digital Converters / L. Michaeli, J. Šaliga // Measurement Science Review. – 2014. – Vol. 14, Issue 2. – P. 62-77.
359. Peng, X. High-Precision ADC Spectrum Testing under Non-Coherent Sampling Conditions / X. Peng, J. Li, D. Zhang et al.
360. Котельников В.А. О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи (Приложение). – Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, № 7. – С. 762-770.
361. Зюко А.Г. Теория электрической связи / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров. – М.: Радио и связь, 1999. – 432 с.
362. RFC 6569. Guidelines for Development of an Audio Codec within the IETF.
363. Web audio codec guide. – [https:// developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Media/Formats/Audio_codecs#g.711_pulse_code_modulation_of_voice_frequencies](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Media/Formats/Audio_codecs#g.711_pulse_code_modulation_of_voice_frequencies).
364. Волков А.Н. Исследование сетевых технологий с ультра малой задержкой и сверхвысокой плотностью на основе широкого применения искусственного

интеллекта для сетей 6G / Абд Эль-Латиф А.А., Кучерявый А.Е.,
Парамонов А.И., Мутханна А.С.А, и др. // Отчет о НИР № 075-15-2022-1137,
2023.

365. Волков А.Н. Прикладные научные исследования в области создания сетей связи 2030, включая услуги телеприсутствия с сетевой поддержкой, и экспериментальная проверка решений при подготовке отраслевых кадров / Брусиловский С.А, Нестеров А.А., Кучерявый А.Е., Федоров С.Л, и др. // Отчет о НИР № 075-15-2022-1137, 2023.

Приложение А

Программное обеспечение алгоритмов

Программная модель алгоритма стаи серых волков (GWO)

```
import csv
import numpy as np

def initialization(FileName, PopSize, D, LB, UB):
    wolves = np.random.uniform(LB, UB, (PopSize, D))
    row = input_data(FileName, PopSize)
    for i in range(PopSize):
        for j in range(D):
            wolves[i][j] = row[i][j]
    return wolves

def GWO(name_file, PopSize, MaxT, LB, UB, D, Fobj):
    Alpha_Pos = np.zeros(D)
    Alpha_Fit = np.inf
    Beta_Pos = np.zeros(D)
    Beta_Fit = np.inf
    Delta_Pos = np.zeros(D)
    Delta_Fit = np.inf

    Positions = initialization(name_file, PopSize, D, UB, LB)
    Convergence_curve = np.zeros(MaxT)

    l = 0
    while l < MaxT:
        for i in range(Positions.shape[0]):
            BB_UB = Positions[i, :] > UB
            BB_LB = Positions[i, :] < LB
            Positions[i, :] = (
                (Positions[i, :] * (~ (BB_UB + BB_LB))) + UB * BB_UB + LB * BB_LB
            )
            Fitness = Fobj(Positions[i, :])

            if Fitness < Alpha_Fit:
                Alpha_Fit = Fitness
```

```

        Alpha_Pos = Positions[i, :]

    if Fitness > Alpha_Fit and Fitness < Beta_Fit:
        Beta_Fit = Fitness
        Beta_Pos = Positions[i, :]

    if Fitness > Alpha_Fit and Fitness > Beta_Fit and Fitness < Delta_Fit:
        Delta_Fit = Fitness
        Delta_Pos = Positions[i, :]

a = 2 - 1 * (2 / MaxT)
for i in range(Positions.shape[0]):
    for j in range(Positions.shape[1]):
        r1 = np.random.random()
        r2 = np.random.random()

        A1 = 2 * a * r1 - a
        C1 = 2 * r2

        D_Alpha = abs(C1 * Alpha_Pos[j] - Positions[i, j])
        X1 = Alpha_Pos[j] - A1 * D_Alpha

        r1 = np.random.random()
        r2 = np.random.random()

        A2 = 2 * a * r1 - a
        C2 = 2 * r2

        D_Beta = abs(C2 * Beta_Pos[j] - Positions[i, j])
        X2 = Beta_Pos[j] - A2 * D_Beta

        r1 = np.random.random()
        r2 = np.random.random()

        A3 = 2 * a * r1 - a
        C3 = 2 * r2

        D_Delta = abs(C3 * Delta_Pos[j] - Positions[i, j])
        X3 = Delta_Pos[j] - A3 * D_Delta

        Positions[i, j] = (X1 + X2 + X3) / 3

l += 1

```



```
    Convergence_curve[l - 1] = Alpha_Fit
    return Alpha_Fit, Alpha_Pos, Beta_Fit, Beta_Pos, Delta_Fit, Delta_Pos,
Convergence_curve

def input_data(name_file, number):
    x_arr = []
    y_arr = []
    s_arr = []
    arr = []

    with open(name_file, encoding="utf-8") as r_file:
        file_reader = csv.reader(r_file, delimiter=";")

        i = 0
        for row in file_reader:
            if i == number:
                break

            i += 1
            arr.append(row)
            x_arr.append(float(row[0]))
            y_arr.append(float(row[1]))
            s_arr.append(float(row[2]))

    return arr

if __name__ == "__main__":
    # Целевая функция
    def objective_function(x):
        # print(T_r(x), T_c(x), S(x))
        return 0.33 * x[0] + 0.33 * x[1] + 0.33 * x[2]

    Fun_name = objective_function
    LB = -100
    UB = 100
    D = 3
    PopSize = 100
    MaxT = 1
    name_file = "all_53.csv"
```

```

Alpha_Fit, Alpha_Pos, Beta_Fit, Beta_Pos, Delta_Fit, Delta_Pos,
Convergence_curve = GW0(
    name_file, PopSize, MaxT, LB, UB, D, Fun_name
)

print("Best Fitness =", Alpha_Fit)
print("Best Solution = ", Alpha_Pos)
print("Beta Fitness =", Beta_Fit)
print("Beta Solution = ", Beta_Pos)
print("Delta Fitness =", Delta_Fit)
print("Delta Solution = ", Delta_Pos)

```

Программная модель алгоритма роя частиц (PSO)

```

import csv
import time

import numpy as np

def input_data(name_file, number):
    x_arr = []
    y_arr = []
    s_arr = []
    arr = []

    with open(name_file, encoding="utf-8") as r_file:
        file_reader = csv.reader(r_file, delimiter=";")

        i = 0
        for row in file_reader:
            if i == number:
                break

            i += 1
            arr.append(row)
            x_arr.append(float(row[0]))
            y_arr.append(float(row[1]))
            s_arr.append(float(row[2]))

    return arr

```

```

def initialization(FileName, PopSize, D, LB, UB):
    wolves = np.random.uniform(LB, UB, (PopSize, D))
    row = input_data(FileName, PopSize)
    for i in range(PopSize):
        for j in range(D):
            wolves[i][j] = row[i][j]
    return wolves

# Определим функцию для оптимизации
def objective_function(x):
    return 0.33 * x[0] + 0.33 * x[1] + 0.33 * x[2]

# Класс для реализации PSO
class ParticleSwarmOptimizer:
    def __init__(self, num_particles, num_dimensions, bounds, num_iterations,
w=0.5, c1=1, c2=2):
        self.num_particles = num_particles
        self.num_dimensions = num_dimensions
        self.bounds = bounds
        self.num_iterations = num_iterations
        self.w = w
        self.c1 = c1
        self.c2 = c2

        # Инициализация частиц
        # self.positions = np.random.uniform(low=bounds[0], high=bounds[1],
size=(num_particles, num_dimensions))
        self.positions = initialization('all_53.csv', num_particles,
num_dimensions, bounds[0], bounds[1])
        self.velocities = [0.0 for _ in range(num_particles)]
        print(self.velocities)

        # self.velocities = np.random.uniform(low=-1, high=1, size=(num_particles,
num_dimensions))
        self.pbest_positions = self.positions.copy()

    def optimize(self):

```

```

self.start_time = time.time()
self.pbest_scores = np.array([objective_function(x) for x in
self.positions])
self.gbest_position = self.positions[np.argmin(self.pbest_scores)]
self.gbest_score = np.min(self.pbest_scores)

for t in range(self.num_iterations):
    for i in range(self.num_particles):
        r1 = np.random.random(self.num_dimensions)
        r2 = np.random.random(self.num_dimensions)

        # Обновление скорости частицы
        self.velocities[i] = (self.w * self.velocities[i] +
                               self.c1 * r1 * (self.pbest_positions[i] -
self.positions[i]) +
                               self.c2 * r2 * (self.gbest_position -
self.positions[i]))

        # Обновление позиции частицы
        self.positions[i] = self.positions[i] + self.velocities[i]

        # Ограничение позиции частиц в пределах заданных границ
        self.positions[i] = np.clip(self.positions[i], self.bounds[0],
self.bounds[1])

        # Оценка новой позиции
        score = objective_function(self.positions[i])

        # Обновление лучшей позиции частицы
        if score < self.pbest_scores[i]:
            self.pbest_positions[i] = self.positions[i]
            self.pbest_scores[i] = score

        # Обновление лучшей глобальной позиции
        if score < self.gbest_score:
            self.gbest_position = self.positions[i]
            self.gbest_score = score

        # Отображение текущего лучшего результата
        print(f"Iteration {t + 1}/{self.num_iterations}, Best Score:
{self.gbest_score}")

```

```
print(time.time()-self.start_time)
return self.gbest_position, self.gbest_score

# Параметры PSO
num_particles = 100
num_dimensions = 3
bounds = (1, 10)
num_iterations = 100

# Запуск PSO
pso = ParticleSwarmOptimizer(num_particles, num_dimensions, bounds,
num_iterations)
best_position, best_score = pso.optimize()

print(f"Best Position: {best_position}")
print(f"Best Score: {best_score}")
```

Приложение Б

Акты реализации диссертационных исследований

Экз. _ из 3



МИНИСТЕРСТВО
ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«Ордена Трудового Красного Знамени
Российский научно-исследовательский
институт радио имени М.И. Кривошеева»
(ФГБУ НИИР)

Почтовый адрес: Казакова ул., д. 16, Москва, 105064
Телефон: (495) 647-17-77, факс: (499) 261-00-90
E-mail: info@niir.ru, <http://www.niir.ru>
ОКПО 56622156, ОГРН 1227700388827
ИНН/КПП 9709082715/770901001

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора
по науке ФГБУ НИИР, кандидат
технических наук



№ _____

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Волкова Артёма Николаевича на тему «Разработка и исследование комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15– Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Комиссия в составе:

Председатель комиссии – зам. директора НТЦ Анализа ЭМС С.Ю. Пастух, к.т.н.;

Члены комиссии – главный научный сотрудник НТЦ Систем спутниковых телекоммуникаций Л.О. Мырова, д.т.н., профессор;
заместитель начальника отдела НТЦ Анализа ЭМС Е.В. Тонких, к.т.н.;

начальник отдела НТЦ Анализа ЭМС Н.В. Варламов,

установила, что в диссертационной работе Волкова Артёма Николаевича, доцента кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета им. проф. М.А.Бонч-Бруевича, к.т.н. на тему «Разработка

и исследование комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия» получены новые научные результаты, которые внедрены в 2023 - 2024 гг. в рамках выполнения государственных контрактов по научно-техническому и методическому обеспечению выполнения Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций функций администрации связи Российской Федерации в части, касающейся международно-правовой защиты интересов Российской Федерации в области электросвязи и радиосвязи в виде предложений (вкладов) от имени администрации связи Российской Федерации (Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации) в Сектор стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи (МСЭ-Т).

На базе вкладов, представленных на заседаниях Исследовательской комиссии 11 (ИК11) «Требования к сигнализации, протоколы, спецификации испытаний и борьба с контрафактными устройствами электросвязи/ИКТ» МСЭ-Т (в мае и октябре 2023 года) по разработке новой Рекомендации МСЭ-Т UHD-T «Тестирование трехмерных сетей IoT сверхвысокой плотности (The testing of 3D ultra-high density IoT networks)» (вклады C189 и C341, соответственно), была утверждена в декабре 2023 года и опубликована в 2024 году на сайте МСЭ новая Рекомендация МСЭ-Т Q.4071 (12/2023) «Тестирование трехмерных сетей IoT сверхвысокой плотности (The testing of 3D ultra-high density Internet of things networks)».

Кроме того, на заседаниях Исследовательской комиссии 11 (ИК11) «Требования к сигнализации, протоколы, спецификации испытаний и борьба с контрафактными устройствами электросвязи/ИКТ» МСЭ-Т (октябрь 2023 года) были представлены вклады с предложением по открытию нового направления исследования МСЭ-Т Q.RMP-Fc «Протокол маршрутизации микросервисов для сегмента туманных вычислений (Routing microservices protocol for fog computing segment)» (C350) и предложениями в базовый текст проекта новой Рекомендации МСЭ-Т Q.RMP-Fc «Протокол маршрутизации микросервисов для сегмента туманных вычислений (Routing microservices protocol for fog computing segment)» (C351), и Исследовательской комиссии 13 «Сети будущего и появляющиеся сетевые технологии» МСЭ-Т (ноябрь 2023 года) с предложением по открытию нового направления исследования МСЭ-Т Y.ORCH-DIS «Структура распределенных оркестраторов для сельских сетей на базе STIN (Framework of distributed orchestrators for rural networks based on STIN)» (вклад C712).

Вышеуказанные вклады определили позицию Администрации связи Российской Федерации в области тестирования, разработки протоколов и развития сетей, в том числе и перспективных сетей будущего, в части разработки протоколов для сегментов сети для туманных вычислений на заседаниях ИК11 МСЭ-Т и построения сетей в сельской местности на основе распределенных

оркестраторов на заседаниях ИК13 МСЭ-Т, и являются основой для разработки соответствующих рекомендаций Сектора стандартизации электросвязи Международного союза электросвязи.

Председатель комиссии



С.Ю. Пастух

Члены комиссии



Л.О. Мырова



Е.В. Тонких



Н.В. Варламов

Подписи С.Ю. Пастуха, Л.О. Мыровой, Е.В. Тонких, Н.В. Варламова заверяю.

Начальник отдела кадров ФГБУ НИИР




Е.П. Буянова

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ
ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

Юридический адрес: набережная реки Мойки,
д. 61, литера А, Санкт-Петербург, 191186

Почтовый адрес: пр. Большевиков, д. 22, корп. 1,
Санкт-Петербург, 193232

Тел.(812) 3263156, Факс: (812) 3263159

<http://sut.ru>

E-mail: rector@sut.ru

ОКПО 01179934 ОГРН 1027809197635

ИНН 7808004760 КПП 784001001

ОКТМО 40909000

12.07.2024 № 04/54
на № _____ от _____

Утверждаю

Первый проректор – проректор по
учебной работе, канд. техн. наук, доцент



Абилов
Альберт Виноерович

Акт

о внедрении научных результатов,
полученных Волковым Артёмом Николаевичем

Комиссия в составе Елагина В.С., и.о. декана факультета инфокоммуникационных сетей и систем, Дунайцева Р.А., доцента кафедры сетей связи и передачи данных и Ворожейкиной О.И., заведующей лабораторией кафедры сетей связи и передачи данных составила настоящий акт о том, что научные результаты, полученные Волковым Артёмом Николаевичем, использованы в учебном процессе СПбГУТ:

1. Разработана новая архитектура сетей связи, отличающаяся от известных тем, что все услуги связи предоставляются на основе туманных вычислений, образующих туманности для динамического распределения ресурсов сети. А также, разработаны модель данных для датчиков и актуаторов, а также метод передачи этих данных, отличающиеся от известных тем, что данные формируются с использованием костюма телеприсутствия и передаются в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары), что позволяет обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных. Данные научные результаты используются при чтении лекций и проведении практических занятий по курсу «Интернет вещей и самоорганизующиеся сети» (Рабочая Программа № 23.05/105-Д, утверждена Первым проректором-проректором по учебной работе А.В. Абилов 23.03.2023), разделы Программы: Сети связи 2030. Децентрализация сетей связи. Услуги телеприсутствия; Требования к качеству обслуживания и качеству восприятия, модели трафика для самоорганизующихся сетей.

2. Разработаны модель и метод построения сетей связи общего пользования, отличающиеся от известных тем, что с целью предоставления услуг телеприсутствия в сельской местности и труднодоступных районов предложено использовать для предоставления услуг распределенные оркестраторы совместно с Туманными вычислениями и динамическую кластеризацию для обеспечения максимальной

стабильности кластера без необходимости миграции микросервисов. Научный результат используется при чтении лекций и проведении практических занятий по курсу «Современные проблемы науки в области инфокоммуникаций» (Рабочая Программа № 23.05/344-Д, утверждена Первым проректором-проректором по учебной работе А.В. Абиловым 23.06.2023), раздел Программы: Концепции развития сетей связи. Текущее состояние развития сетей. Прогнозы развития сетей связи.

3. Разработаны модель и метод для бессерверной архитектуры для миграции групп микросервисов на группы устройств туманной сети и использован метаэвристический алгоритм стаи серых волков для определения группы устройств, на которые будет мигрировать группа контейнеров с микросервисами. А также Разработан и согласован на международном уровне новый протокол маршрутизации, который обеспечивает взаимодействие устройств Туманных вычислений при миграции микросервисов. Данные научные результаты используются при чтении лекций и проведении практических занятий по курсу «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» (Рабочая Программа № 21.05/780-Д, утверждена Первым проректором-проректором по учебной работе А.В. Абиловым 03.07.2021), раздел Программы: Методы исследования процессов, явлений и объектов; Эффективность функционирования (использования) систем, сетей и устройств связи.

Полученные научные результаты использованы 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 2022г. № 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.

Полученные научные результаты использованы при выполнении научно-исследовательских работ (НИР) "Прикладные научные исследования в области создания сетей связи 2030, включая услуги телеприсутствия с сетевой поддержкой, и экспериментальная проверка решений при подготовке отраслевых кадров" в 2023г. № 123060900012-6.

И.о. декана факультета ИКСС,
канд. техн. наук, доцент

В.С. Елагин

Доцент кафедры ССиПД,
канд. техн. наук

Р.А. Дунайцев

Зав. лабораторией кафедры ССиПД

О.И. Ворожейкина



Утверждаю

Заместитель Генерального директора

ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ»

А.Б. Васильев



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Артема Николаевича Волкова на тему “Разработка и исследование комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия”

Настоящим актом подтверждаем, что научные результаты диссертационной работы Артема Николаевича Волкова “Разработка и исследование комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия”, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, внедрены в ПАО “ГИПРОСВЯЗЬ” при разработке “Методики планирования сетей связи при внедрении туманных вычислений”.

При разработке были использованы следующие новые научные результаты из диссертации А.Н. Волкова:

- Новая архитектура сетей для предоставления услуг связи, в том числе услуг телеприсутствия, на основе туманных вычислений, образующих туманности

для динамического распределения ресурсов сети, что позволяет уменьшить трафик, поступающий в ядро сети, на 20%;

- Модель и метод построения сетей связи общего пользования, обеспечивающий предоставление услуг телеприсутствия в сельской местности и труднодоступных районах на основе распределенных оркестраторов совместно с туманными вычислениями, позволяющий на основе динамической кластеризации обеспечить максимальную стабильность кластера (сохранение его структуры) без необходимости миграции микросервисов.

Председатель комиссии:

Директор департамента по
системно-сетевым разработкам,
экспертизе и консалтингу

 А.А. Иванов

Члены комиссии:

Начальник информационно-
аналитического отдела

 Ю.А. Нопина

РӨСӘЙ ФЕДЕРАЦИЯҢЫ ФӘН ҺӘМ
ЮГАРЫ БЕЛЕМ БИРЕУ МИНИСТРЛЫҒЫ
ЮГАРЫ БЕЛЕМ БИРЕУ
ФЕДЕРАЛЬ ДӘУЛӘТ БЮДЖЕТ МӨҒАРИФ
УЧРЕЖДЕНИЕҢЫ

«ӨФӨ ФӘН ҺӘМ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
УНИВЕРСИТЕТЫ»
(Өфө университеты)

Заки Вәлиди урамы, 32, Өфө калаһы, БР, 450076

тел.: 8 (347) 272-63-70 факс: (347) 273-67-78 e-mail: rector@uust.ru https://uust.ru
ОКПО 79067778 ОГРН 1220200037474 ИНН/КПП 0274975591/027401001

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И
ТЕХНОЛОГИЙ»

(Уфимский университет, УУНиТ)

Заки Вәлиди ул., 32, Уфа, РБ, 450076



от «__» _____ 20__ г. № _____
на № _____ от _____



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор
по развитию образования
Ю. В. Рахманова

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Волкова Артёма Николаевича на тему «Разработка и исследование комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15– Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Комиссия в составе директора института электротехнического инжиниринга, к.т.н., доцента Ю. О. Уразбахтиной, и.о. заведующего кафедрой телекоммуникационных систем, доцента кафедры телекоммуникационных систем, к.т.н., Р. В. Кутлуярова, доцента кафедры телекоммуникационных систем, к.т.н., Г. С. Воронкова составила настоящий акт в том, что научные результаты, полученные Артёмом Николаевичем Волковым в диссертации «Разработка и исследование комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия», использованы в учебном процессе Уфимского университета науки и технологий, а именно:

1. При чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплине «Современные системы беспроводной связи» (для обучающихся по направлению подготовки магистров 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профиль «Технологии беспроводной связи и интернет вещей»)

2. При чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплине «Введение в интернет вещей» (для обучающихся по направлению подготовки магистров 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профиль «Технологии беспроводной связи и интернет вещей»)

3. При чтении лекций и проведении практических занятий по дисциплине «Проектирование и техническая эксплуатация систем передачи данных» (для обучающихся по направлению подготовки магистров 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профиль «Технологии беспроводной связи и интернет вещей»).

При проведении занятий по указанным дисциплинам используются следующие новые научные результаты, полученные Артёмом Николаевичем Волковым в диссертационной работе:

1. Модель и метод использования бессерверной архитектуры для миграции групп типовых микросервисов при применении метаэвристического алгоритма стаи серых для определения группы устройств, на которую будет мигрировать группа контейнеров с микросервисами, что позволяет как определить группу устройств, а не единичное устройство, так и уменьшить время принятия решения о миграции в десятки раз по сравнению с известным метаэвристическим алгоритмом роя частиц.

2. Модель и метод построения сетей связи общего пользования, обеспечивающий предоставление услуг телеприсутствия в сельской местности и труднодоступных районах на основе распределенных оркестраторов совместно с туманными вычислениями, позволяющий на основе динамической кластеризации обеспечить максимальную стабильность кластера (сохранение его структуры) без необходимости миграции микросервисов.

3. Метод миграции микросервисов на основе разработанного протокола маршрутизации в среде динамических туманных вычислений, обеспечивающий учёт весов не только ребер графа, но и весов самих устройств туманных вычислений, что позволило по сравнению с существующими, достичь снижения потребляемой энергии устройствами туманных вычислений на 41% и уменьшить долю потерянных пакетов в среднем до 34%.

4. Модель данных для датчиков и актуаторов костюма телеприсутствия, а также метод передачи этих данных в объекты мультивселенных (цифровые и/или физические аватары), позволяющие обеспечить минимизацию суммарных издержек на ошибки квантования и задержку передачи данных.

Директор института электротехнического
инжиниринга, к.т.н., доцент

Ю. О. Уразбахтина

И. о. заведующего кафедрой
телекоммуникационных систем, к.т.н.

Р. В. Кутлуяров

Доцент кафедры телекоммуникационных систем,
к. т. н.

Г. С. Воронков