

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 55.2.004.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
МИНИСТЕРСТВА ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 14 октября 2026 г. № 21

О присуждении Березкину Александру Александровичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Разработка и исследование комплекса моделей и методов по уменьшению задержки информационных потоков при взаимодействии с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи» по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций принята к защите 24 июня 2026 года, протокол № 6, диссертационным советом 55.2.004.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, 191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 61, приказ № 258/нк от 27 марта 2019 года.

Соискатель Березкин Александр Александрович, 03 августа 1982 года рождения, работает инженером II категории в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Информационно-аналитический центр поддержки ГАС «Правосудие», филиал в Ленинградской области, Судебный департамент при Верховном суде Российской Федерации.

Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Модели и методы декодирования помехоустойчивых кодов на основе нейросетевого базиса» по научной специальности 05.13.01 – Системный анализ,

управление и обработка информации защитил в 2009 году в диссертационном совете Д 219.004.02, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича». С 2021 года по настоящее время работает доцентом кафедры программной инженерии и вычислительной техники в указанной организации.

Диссертация выполнена на кафедре программной инженерии и вычислительной техники Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Санкт-Петербурга Киричек Руслан Валентинович, основное место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», ректор.

Официальные оппоненты:

1. Канаев Андрей Константинович, доктор технических наук, профессор, основное место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра «Электрическая связь», профессор кафедры.

2. Колбанёв Михаил Олегович, доктор технических наук, профессор, основное место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный экономический университет», кафедра информационных систем и технологий, профессор кафедры.

3. Карташевский Игорь Вячеславович, доктор технических наук, доцент, основное место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», научно-исследовательская лаборатория «Инновационные проекты», заведующий лабораторией.

Все официальные оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук» (ИПУ РАН), г. Москва, в своем положительном заключении, подписанным Вишневым Владимиром Мироновичем, доктором технических наук, профессором, главным научным сотрудником ИПУ РАН, утвержденным Новиковым Дмитрием Александровичем, доктором технических наук, академиком РАН, директором ИПУ РАН, указала, что в диссертации решена важная научная проблема разработки научно-методического аппарата обоснования облика системы информационного обмена и оценки её эффективности, обеспечивающего уменьшение задержки информационных потоков при соблюдении требований к перцептивному качеству восстановленного FPV-видеопотока в процессе взаимодействия оператора с беспилотной системой в гибридных орбитально-наземных сетях связи, имеющая важное значение для развития современных инфокоммуникационных технологий, а также специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций. Полученные автором результаты отличаются научной новизной и практической значимостью. Рекомендации и наработки апробированы на значимых международных и всероссийских научных конференциях. Основные достижения диссертанта достаточно полно опубликованы в ведущих российских и зарубежных изданиях. Название работы полностью отражает ее изложение, содержание диссертации соответствует пунктам 1, 2, 3, 4, 5, 11, 18 и 19 паспорта специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций. Автореферат адекватно и достоверно представляет диссертационную работу и ее основные результаты. Диссертационное исследование Березкина Александра Александровича «Разработка и исследование комплекса моделей и методов по уменьшению задержки информационных потоков при взаимодействии с беспилотными системами в

гибридных орбитально-наземных сетях связи» соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций, а ее автор, Березкин Александр Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук.

Соискатель имеет 124 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации – 84, из них в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России – 38 статей, в том числе 38 в изданиях, соответствующих искомой специальности, а также: 7 работ в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования, 1 монография, 5 результатов интеллектуальной деятельности, 3 отчета о научно-исследовательских работах и 30 публикаций в других научных изданиях и материалах конференций. Из них 5 работ опубликованы соискателем без соавторства. Общий объем авторского вклада в работы (без результатов интеллектуальной деятельности) составляет 32,122 печ.л. из общего количества 63,558 печ.л. Диссертация не содержит недостоверных сведений об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Наиболее значительные научные работы по теме диссертации:

1. Березкин А.А. Требования к качеству видеопотока при управлении беспилотными системами от первого лица // Труды учебных заведений связи. – 2026. – Т. 12. – № 1. – С. 7-16.

2. Березкин А.А. Перспективные технологии сжатия кадров видеопотока при управлении БАС от первого лица // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2026. – Т. 18. – № 1. – С. 4-20.

3. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В. Сжатие и агрегация команд управления беспилотными воздушными судами в каналах связи с ограниченной пропускной способностью // Инфокоммуникационные технологии. – 2025. – Т. 23. – № 3(91). – С. 50-71.

4. Березкин А.А. Система информационного обмена для управления БАС от первого лица в гибридной сети связи. Часть I: общие положения и архитектура // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2025. – Т. 17. – № 4. – С. 4-14.

5. Березкин А.А. Система информационного обмена для управления БАС от первого лица в гибридной сети связи. Часть II: модель КИО и методика тестирования // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2025. – Т. 17. – № 5. – С. 4-12.

6. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В. Сокращение задержки FPV-управления БВС через спутниковые каналы связи методом предсказания // Электросвязь. – 2025. – № 4. – С. 13-24.

7. Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Киричек Р.В. Многокритериальная оценка эффективности управления беспилотными системами в гибридных сетях связи // Труды учебных заведений связи. – 2024. – Т. 10. – № 1. – С. 25-33.

8. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Нестеров Е.А. Экспериментальное исследование программно-аппаратного комплекса FPV-управления БАС в гибридных сетях связи // Электросвязь. – 2025. – № 11. – С. 2–15.

9. Березкин А.А., Вивчарь Р.М., Ченский А.А., Киричек Р.В. Исследование задержки кадров видеопотока в канале информационного обмена космического сегмента гибридной сети связи при FPV-управлении БВС // Труды учебных заведений связи. – 2025. – Т. 11. – № 5. – С. 60-73.

10. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть I. Методика // Электросвязь. – 2024. – № 9. – С. 28-37.

11. Березкин А.А., Ченский А.А., Киричек Р.В., Захаров А.А. Исследование конфигураций нейросетевых кодеков для адаптивной системы сжатия кадров FPV-видеопотока при управлении беспилотными системами. Часть II. Эксперимент // Электросвязь. – 2024. – № 10. – С. 59-69.

Результаты интеллектуальной деятельности:

12. Патент РФ № 2855032 С2. Система информационного обмена для управления беспилотными комплексами в орбитально-наземных гибридных сетях связи / А.А. Березкин, А.А. Паршин, Д.С. Кукунин, Р.В. Киричек; заявитель СПбГУТ. Оpubл. 23.01.2026, Бюл. № 3.

13. Патент РФ № 2849970 С1. Система интеллектуального кодирования кадров видеопотока при управлении беспилотными системами от первого лица / А.А. Березкин, А.А. Ченский, А.А. Паршин, Д.Д. Парфенов, Р.В. Киричек; заявитель СПбГУТ. Оpubл. 01.11.2025, Бюл. № 31.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы: официальных оппонентов: Канаева А.К., д.т.н., проф., профессора кафедры электрической связи Петербургского государственного университета путей сообщений Императора Александра I; Колбанёва М.О., д.т.н., проф., профессора кафедры информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного экономического университета; Карташевского И.В., д.т.н., доц., заведующего лабораторией «Инновационные проекты» Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики; ведущей организации ИПУ РАН; Попова Г.А., д.т.н., проф., профессора кафедры информационной безопасности Астраханского государственного технического университета; Пшеничникова А.В., д.т.н., проф., начальника 11 кафедры (радиосвязи), Бородулина Р.Ю., д.т.н., доц., профессора 11 кафедры (радиосвязи), Погорелова А.А., к.т.н., доц., профессора 11 кафедры (радиосвязи) Военной академии связи имени С.М. Буденного; Новикова Е.А., д.т.н., доц., начальника кафедры сетей и систем связи космических комплексов Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского; Кузнецова В.С., д.т.н., с.н.с., профессора кафедры телекоммуникационных систем Московского института электронной техники; Кузичкина А.В., д.т.н., проф., з.д.н., главного научного сотрудника Научно-исследовательского института телевидения; Мыровой Л.О., д.т.н., проф., научного сотрудника НТЦ систем спутниковых телекоммуникаций Национального исследовательского центра телекоммуникаций имени М.И. Кривошеева; Мелентьева О.Г., д.т.н., проф., заведующего кафедрой инфокоммуникационных систем и сетей Сибирского государственного

университета телекоммуникаций и информатики; Востокина С.В., д.т.н., доц., профессора кафедры программных систем Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева; Заболоцкого А.М., д.т.н., проф., директора института радиоэлектронной техники, Рогожникова Е.В., к.т.н., доц., заведующего кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники; Логинова И.В., д.т.н., Титова О.Н., к.т.н., сотрудников Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации; Надеева А.Ф., д.ф.-м.н., проф., директора Института радиоэлектроники, фотоники и цифровых технологий КНИТУ-КАИ; Султанова А.Х., д.т.н., проф., профессора кафедры телекоммуникационных систем Уфимского университета науки и технологий; Хворенкова В.В., д.т.н., профессора кафедры радиотехники, Бояршинова М.А., к.т.н., доц., заведующего кафедрой сетей связи и телекоммуникационных систем ИжГТУ им. М.Т. Калашникова; Степанова С.Н., д.т.н., проф., заведующего кафедрой интеллектуальных сетевых и облачных технологий Московского технического университета связи и информатики; Крука Е.А., д.т.н., заслуженного профессора, научного руководителя Научно-исследовательского института технологий НИУ ВШЭ.

Все отзывы положительные, но имеются следующие замечания. В разделе 2.2.3.2 для восстановления плотности вероятности сетевых задержек применяется метод Парзена-Розенблатта. Автор выбирает в качестве ядерной функции (формула 2.18, стр. 169) Гауссово ядро. Автору следовало бы использовать асимметричные ядра (например, гамма-ядро) либо математически обосновать применение методов отражения границ. Во введении (стр. 11) требует отдельного разьяснения переход к более сложным моделям для решения проблемы роста вычислительной сложности. На стр. 180 утверждается, что задержка подчиняется усеченному двухпараметрическому бета-распределению и приводится стандартная формула плотности (2.42), однако областью определения стандартного бета-распределения (с параметрами α и β) является интервал $[0, 1]$. В тексте полностью не представлен математический переход (нормализация) случайной величины $t_{\text{кю}}$ к интервалу $[0, 1]$

через параметры сдвига и масштаба. Использование классических формул (2.42) и (2.44) напрямую для величин порядка 10^2 математически некорректно. В пункте 7 «Выводов по главе 2» (стр. 235) автор делает категоричный обобщающий вывод: «Установлено, что задержка КИО подчиняется усеченному двухпараметрическому бета-распределению», что напрямую противоречит результатам, полученным самим же автором ранее в этой главе. Так, на стр. 188 и на стр. 190 автор доказывает, что при полезной нагрузке от 3000 до 15000 байт задержка распределена по бимодальному закону (формулы 2.49 и 2.52), который представляет собой смесь двух нормальных распределений. Итоговый вывод должен был отражать эту важнейшую выявленную специфику для низкоорбитальных спутниковых сетей при росте полезной нагрузки, а не сводить всё к одному распределению. В тексте присутствует некоторая избыточность, в которой нет необходимости с точки зрения содержания работы, посвященной уменьшению задержек информационных потоков в каналах связи (на стр. 49-52 – подробный статистический обзор рынков коммерческих дронов в Индии и Китае). Понятие технологии «DMCI» (Deep Multi-Context Intra) является одним из перспективных решений в диссертации, однако впервые этот термин упоминается лишь на стр. 270 (раздел 3.1.2). В разделе 2.3.2.2 (стр. 220) не определены понятия «аварийное событие C_1 с критическим временным интервалом TC_1 » с использованием числовых значений скоростей сближения, принятых в нормативных авиационных документах. Это требуется для точного определения критериев активации предложенного метода интерполяции. На рисунках 2.33, 2.34 (стр. 223-224) использованы англоязычные термины, не определенные по тексту работы. Требуется более полное обоснование выбора для исследования в разделе 3.1.2 (стр. 257-259) именно моделей вариационных автокодировщиков семейства Stable Diffusion, которые изначально создавались для генерации статических изображений, а не специализированных нейросетевых видеокодеков, спроектированных для видеопотоков. Суть метода предсказания будущих кадров не вполне соответствует строго заявленной цели работы, так как происходит терминологическая подмена «уменьшения задержки в канале» на «компенсацию рассинхронизации на экране оператора». Перекося в количестве

страниц диссертации в сторону обзора снижает удельный вес описания собственных прикладных результатов автора. В структуре второй главы наблюдается смысловое наложение подразделов. Это создает избыточность и затрудняет понимание этапов формализации научной проблемы. Без указания числа степеней свободы и способа разбиения на интервалы при использовании критерия Пирсона значение 3,94 (стр. 181) не несет научного смысла и не позволяет однозначно подтвердить гипотезу о подчинении закону усеченного двухпараметрического бета-распределения (формула 2.42) распределения задержки прикладного уровня. Включение обширного перечня метрик оценки качества и их математического описания в основной текст главы не целесообразно, так как в дальнейшем синтезе моделей (автор использует в основном DISTs и SSIM) они не применяются. При доказательстве Теоремы 4.1 (стр. 318–319) допущение о том, что время доставки реального и предсказанного кадров будет строго одинаковым (детерминированным), является сильным идеализационным упрощением. В диссертации недостаточно полно раскрыто, как именно пороги метрики DISTs (стр. 157-159) соотносятся с физиологическими ограничениями зрительного аппарата оператора при выполнении маневров на критически малых высотах, где «замыливание» текстур (отмеченное на стр. 9-10) может быть критичным даже при высоких значениях DISTs. Автором не в полной мере проанализирована устойчивость предложенных моделей предсказания кадров (отмеченных в главе 4) к резким изменениям угловой скорости БПЛА (эффект «рывка»), которые могут приводить к деградации точности экстраполяции в латентном пространстве. В списке сокращений и условных обозначений (стр. 430) отсутствуют расшифровки некоторых узкоспециализированных терминов, активно используемых в тексте. В разделе 3.1.1 (стр. 237) при описании процесса прямой диффузии автор использует сложный математический аппарат без пояснения выбора конкретных значений параметров шума β_t для различных типов подстилающей поверхности (лес, город, водная гладь). Обоснованность выбора гауссова ядра (стр. 169) при восстановлении плотности вероятности сетевых задержек методом Парзена-Розенблатта в разделе 2.2.3.2 требует дополнительного

пояснения, поскольку сетевая задержка принимает только положительные значения. В работе недостаточно исследована возможность применения адаптивной длины буфера истории (например, от 3 до 5 кадров) при использовании нейросетевой предсказательной модели (стр. 321) для компенсации сложной нелинейной кинематики БПЛА. В Главе 4 описывается метод предсказания (экстраполяции) будущих кадров для компенсации задержки. Однако из текста автореферата неясно, как ведет себя нейросетевая предсказательная модель в случае резких, непредсказуемых эволюций беспилотника, инициатором которых выступает внешняя среда (например, резкий порыв ветра), происходящих именно в экстраполируемый период. На стр. 27 следовало бы привести более развернутое обоснование выбора модели машинного обучения «случайного леса» (Random Forest) для реализации блока профилирования видеопотока. Учитывая стохастический характер параметров КИО и необходимость работы в реальном времени, целесообразно было бы сопоставить эффективность данного алгоритма с другими методами регрессии или легкими нейросетевыми архитектурами. В автореферате указывается, что для восстановления плотности вероятности показателей эффективности используется метод ядерной оценки Парзена-Розенблатта. В приведенной формуле (5) присутствует параметр сглаживания (коэффициент размытости) h . Однако в тексте (стр. 17-18) не раскрыт алгоритм или критерий выбора этого параметра. В автореферате недостаточно освещен вопрос о том, как ведет себя предсказательная модель в условиях нелинейных и высокодинамичных маневров БПЛА (например, при срыве потока или резком крене), когда данное допущение гарантированно нарушается и точность предсказания должна критически падать (стр. 32). В автореферате отсутствуют сведения о характеристиках наборов данных (датасетов), на которых производилось обучение этих нейронных сетей. Неясно, обучались ли модели на специализированных выборках реальных полетов FPV-дронов с учетом оптических искажений и разных погодных условий, что крайне важно для оценки их генерализующей способности. Полученные автором результаты содержат противоречие между сжатием и целостностью КВО. Так, предложенный метод

адаптивного сжатия команд взаимодействия оператора демонстрирует критическую зависимость между эффективностью сжатия и уровнем потерь, что ставит под сомнение возможность использования метода в реальных контурах управления. Область практического применения предложенного научного метода ограничена рядом действующих протоколов для связи с беспилотными аппаратами. Алгоритмическое предсказание будущего кадра на стороне приема не устраняет физическую задержку прохождения сигнала, а лишь пытается визуально компенсировать её для оператора. При этом ошибка предсказания в условиях высокой динамики полета может привести к рассогласованию между отображаемой и реальной позицией БПЛА. Предложенная модификация видеокodeка с маскированием данных в латентном пространстве (раздел 3.1.3) хотя и экономит пропускную способность, ведет к «значительному снижению перцептивного качества восстановленного видеопотока». Баланс между экономией ресурса сети и информативностью картинки для оператора в работе не формализован до конца. Автор недостаточно полно раскрывает вопрос вычислительной сложности предложенных моделей для реализации на борту малоразмерных БПЛА с ограниченными ресурсами. В методике оценки эффективности (глава 6) используется вероятность достижения комплекса целей, однако выбор пороговых значений для метрик DISTS и SSIM носит частично эмпирический характер и может варьироваться в зависимости от специфики конкретной полетной задачи. Изложение материала в главах 3 и 5 избыточно насыщено деталями технических реализаций различных конфигураций нейросетей. В таблице 6 автор указывает, что при сжатии протокола CRSF коэффициент сжатия 18,75% достигается ценой ошибок восстановления (потерь) до 31,23%. Для канала C2 (Command&Control) это недопустимо. Метод «псевдоуменьшения» задержки за счёт экстраполяции будущих кадров на 40...120 мс работает только при плавном движении. Падение метрики SSIM до 0,40...0,43 при прогнозе на 120...200 мс (таблица 4) делает такое видео непригодным для пилотирования, подменяя реальность артефактами модели. В тексте автореферата не приведены итоговые значения коэффициентов корреляции между метриками при обосновании метода Парзена-Розенблатта (раздел 2.2) в

проведённых экспериментах. В автореферате недостаточно четко разграничены измеряемая сквозная задержка и величина ее алгоритмической компенсации, а также не приведен механизм выявления недостоверного прогноза при резком изменении траектории или появлении нового препятствия. Для использования метода в контуре управления требуется оценка влияния ошибки прогноза на вероятность ошибочного управляющего воздействия. В автореферате не обоснована переносимость зависимостей и пороговых значений перцептивного качества восстановленного видеопотока на беспилотные авиационные системы, отличающиеся скоростью, динамикой маневра, характером наблюдаемой сцены и последствиями ошибки оператора. Следовало бы определить границы применимости полученных требований либо подтвердить их отдельными летными испытаниями. В автореферате не приведены оценка граничного смещения и анализ чувствительности итоговой вероятности к виду ядра и ширине сглаживания для многомерной ядерной оценки плотности вероятности показателей эффективности. Целесообразно было бы сопоставить полученную оценку с результатами применения граничной коррекции или ядер, согласованных с областями определения показателей. В формуле (5) на стр. 17 допущены неточности в обозначениях. Эти ошибки не изменяют существа предложенного подхода, но затрудняют однозначное прочтение. В четвертой главе диссертации (стр. 30) автор вводит метод «псевдоуменьшения» задержки за счет предсказания будущих кадров с помощью нейросетевой модели DMVFN. На стр. 33 утверждается, что этот метод позволяет сократить задержку на 40-120 мс. В автореферате отсутствует оценка влияния рассинхронизации видеопотока и КВО на возникновение ошибок FPV-управления при отправке новой КВО в это окно времени (40-120 мс). Текст автореферата излишне перенасыщен нестандартными и сложносоставными аббревиатурами. В ряде случаев это приводит к нагромождению сокращений в одном предложении, что искусственно усложняет чтение и восприятие научного материала. На стр. 38 автореферата автор ссылается на рисунки 26 и 27, но рисунка 26 не существует. Качество рисунков 3, 4 и 20 не позволяет прочитать отдельные надписи. Из текста автореферата не совсем понятно, каковы условия имитационного

моделирования и натурного эксперимента, при которых получены зависимости и гистограммы на рисунках 22 и 24. Требуется уточнения, в каких именно целевых сценариях применения БАС целесообразно использовать режим маскирования данных в латентном пространстве вместо простой адаптивной балансировки частоты кадров. Требуемые значения показателей перцептивного качества FPV-видеопотока DISTs и SSIM обоснованы автором на основе серии натурных экспериментов с беспилотным наземным транспортным средством. Представляло бы интерес более подробно рассмотреть вопрос о переносимости полученных пороговых значений на другие классы беспилотных систем, а также на сценарии с иной динамикой движения, составом наблюдаемой сцены и квалификации оператора. В автореферате недостаточно подробно представлены требования нейросетевых методов к вычислительным ресурсам и особенности их практического размещения в узлах гибридной орбитально-наземной сети связи. В автореферате показан соответствующий компромисс между степенью сжатия и величиной потерь команд взаимодействия оператора для протокола CRSF, однако с учетом критичности команд управления для функционирования беспилотных систем целесообразно было бы более явно сформулировать допустимые области применения метода и предельные значения вероятности ошибочного восстановления команд. В тексте главы 5 отсутствует краткое описание протоколов Mavlink и CRSF и обоснование того, почему для исследования были выбраны именно они. Исходя из текста автореферата неясно, почему в модели эффективности функционирования FPV-видеопотока (формула (1) стр. 14) отсутствуют показатели, характеризующие динамические свойства потокового видео. В материалах автореферата недостаточно полно раскрыты характеристики баз данных, а также извлекаемых признаков, используемых при обучении диффузионной модели латентной стабильной диффузии и разработки нейросетевых решений в области кодировщика и декодировщика FPV-видеопотока и не показаны проблемы, связанные с длительностью обучения, а также переобучением. Неясно, насколько полученные результаты по нейросетевым архитектурным решениям и методам предсказания кадров могут быть адаптированы к реальным условиям

функционирования, особенно при энергетических и аппаратных ограничениях бортового оборудования малогабаритных беспилотных и роботизированных комплексов. В материалах автореферата диссертации недостаточно полно раскрыта и оценена проблема внесения дополнительных потерь (ошибок восстановления) при нейросетевом сжатии команд. Использование метода ядерной оценки Парзена-Розенблатта для восстановления многомерной плотности вероятности показателей эффективности и алгоритмы стохастического численного интегрирования Монте-Карло, могут быть труднореализуемы при полноценном внедрении. Неясно, насколько их использование будет оправдано в инженерной (особенно отечественной) практике при проектировании типовых решений. Разработанный метод адаптивного сжатия команд взаимодействия оператора демонстрирует критически высокий уровень потерь до 31,23% при достижении максимального коэффициента сжатия (стр. 35). Это ставит под сомнение практическую применимость метода в реальных контурах управления. Практическое применение предложенного метода маскирования данных в латентном пространстве сопряжено со значительным снижением качества восстановленного видеопотока, что признается самим автором (стр. 26). Субъективность пороговых значений: установление требований к метрикам качества ($SSIM \geq 0,75$ и $DISTS \leq 0,232$) (стр. 41) основывается на специфическом сценарии с использованием конкретного беспилотного транспортного средства, что может не соответствовать требованиям для других типов БАС или условий эксплуатации. В автореферате следовало яснее разграничить сетевую задержку и величину ее алгоритмической компенсации, а также указать порядок контроля достоверности прогноза при резком изменении сцены или траектории движения беспилотной системы. В формуле (5), описывающей многомерную оценку плотности вероятности по методу Парзена-Розенблатта, не все индексы и параметры сглаживания определены непосредственно после выражения. Недостаточно корректно сформулирован п. 1 «Научной новизны»: речь идет о методе или архитектуре? В чем их отличие от известных? Некоторые формулы оформлены недостаточно строго, не все индексы и параметры расшифрованы непосредственно после выражения, что затрудняет однозначную

интерпретацию модели. Выбор показателей DISTS и SSIM для оценки перцептивного качества восстановленного видеопотока обоснован недостаточно полно. Дополнительное сопоставление с VMAF и результатами субъективной оценки по шкале MOS усилило бы подтверждение установленных порогов качества и их связи с результативностью действий оператора. В таблице 7 (стр. 41) приведены результаты шести серий экспериментов с разным процентом потерь пакетов, однако не указано, каким образом выбиралось количество заездов (100) в каждой серии и обеспечивается ли при этом требуемая доверительная вероятность оценки P , соответствующее пояснение в тексте автореферата отсутствует. В автореферате отсутствуют сведения о вычислительной сложности разработанных в диссертации расчетных алгоритмов, и ее зависимости от величин входных параметров. В формулировке Теоремы 1 не приводится выражение или ссылка на него для оценки эффективности уменьшения сетевой задержки за счет предсказания будущих кадров. Сильно математизированное изложение при описании плотностей вероятностей и многокритериальных оценок (в автореферате приведено около 29 математических выражений) требует от читателя глубокой подготовки.

В поступивших отзывах отмечено, что сформулированные замечания не снижают общей научной и практической ценности диссертации и не изменяют положительного вывода о соответствии работы установленным требованиям.

Выбор официального оппонента Канаева Андрея Константиновича обоснован его многолетней научной и научно-педагогической деятельностью по специальности «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», а также наличием профильных публикаций по архитектуре и управлению телекоммуникационными сетями, моделированию информационного обмена, построению баз данных систем управления сетями Carrier Ethernet, сетевой синхронизации, оцениванию надежности и защищенности сетевой инфраструктуры. Содержание выполненных А.К. Канаевым исследований непосредственно связано с системным проектированием сетей связи, управлением их ресурсами и анализом процессов передачи данных, что обеспечивает возможность квалифицированно оценить

предложенные в диссертации архитектуру системы информационного обмена, модели наземных и спутниковых каналов, характеристики задержки и алгоритмы адаптивного управления интенсивностью информационных потоков.

Выбор официального оппонента Колбанёва Михаила Олеговича обоснован его признанной компетентностью в области инфокоммуникационных систем и сетей, технологий Интернета вещей и архитектуры цифровой экономики. В его публикациях исследованы вероятностные и временные характеристики сетевого взаимодействия, регулируемый множественный доступ, методы сбора данных в беспроводных сенсорных сетях, выбор маршрутов передачи сообщений, энергетическая эффективность пакетной передачи и помехоустойчивого кодирования. Это создает научную основу для экспертной оценки предложенных соискателем методов сжатия и помехоустойчивой защиты передаваемых данных, адаптивного распределения ограниченного ресурса канала связи, а также вероятностного многокритериального показателя эффективности информационного обмена с беспилотными системами.

Выбор официального оппонента Карташевского Игоря Вячеславовича обоснован его научными результатами в области теории телетрафика и анализа качества обслуживания коррелированного трафика в телекоммуникационных сетях. В работах И.В. Карташевского развиты статистические и вероятностные методы описания видео- и M2M-трафика, модели систем массового обслуживания с коррелированными потоками, методы оценивания средней задержки, вариации задержки и потерь, а также методы декорреляции межпакетных интервалов и анализа влияния автокорреляции видеотрафика на качество обслуживания. Указанная специализация непосредственно соответствует задачам диссертации по установлению статистических закономерностей FPV-видеопотока, моделированию задержек и потерь на уровне приложения и оцениванию эффективности управления интенсивностью потоков в гибридной орбитально-наземной сети связи.

Выбор федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук» в качестве ведущей организации обоснован широкой известностью научных школ

ИПУ РАН в области теории управления, математического моделирования, распределенных информационно-управляющих систем, теории массового обслуживания и телекоммуникационных сетей. В структуре Института действует лаборатория телекоммуникационных систем; ее публикации охватывают модели поллинга и адаптивного обслуживания в широкополосных беспроводных сетях, проектирование гибридных систем связи, оценивание производительности и надежности сетевых решений, а также привязные высотные беспилотные телекоммуникационные платформы. В ИПУ РАН одновременно выполняются исследования по управлению подвижными объектами и автономными робототехническими комплексами. Совокупность указанных направлений позволяет организации всесторонне оценить теоретическую обоснованность моделей, научную новизну методов уменьшения задержки и практическую значимость программно-аппаратной реализации системы информационного обмена с беспилотными системами в гибридной орбитально-наземной сети связи.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

решена научная проблема разработки научно-методического аппарата обоснования облика системы информационного обмена и оценки её эффективности, с целью уменьшения задержки информационных потоков при соблюдении требований к перцептивному качеству восстановленного FPV-видеопотока в процессе взаимодействия оператора с беспилотной системой в гибридных орбитально-наземных сетях связи и имеющего важное значение для развития телекоммуникационных систем и средств управления беспилотными системами;

разработаны:

— новый метод организации процессов FPV-взаимодействия оператора с беспилотными системами, отличающийся использованием спутниковых группировок космических аппаратов на геостационарной и низкой околоземной орбитах, что позволило создать новую архитектуру системы информационного обмена для снижения задержек передачи информационных потоков до достижимых значений. В рамках предложенной архитектуры реализован замкнутый контур

статистического мониторинга показателей функционирования системы информационного обмена;

– модели каналов информационного обмена наземного и космического сегментов гибридной орбитально-наземной сети связи, которые в отличие от известных учитывают влияние нейросетевых алгоритмов на задержку передачи цифрового FPV-видеопотока и потери видеок кадров, что позволяет установить законы распределения параметров задержки уровня приложения для различных каналов информационного обмена фрагмента гибридной сети связи и построить математические модели каналов передачи FPV-видеопотока и команд взаимодействия оператора;

– комплекс методов уменьшения задержки передачи цифрового FPV-видеопотока на основе перехода в скрытое (латентное) пространство признаков нейронной сети, который в отличие от известных обеспечивает сжатие основных многомерных признаков, описывающих видеосцену, что позволяет обеспечить передачу FPV-видеопотока в каналах информационного обмена, скорость которых выходит за границы работы стандартных алгоритмов при сохранении перцептивного качества восстановленного видеопотока;

– метод уменьшения воспринимаемой задержки кадров FPV-видеопотока беспилотных систем, отличающийся от известных использованием механизмов нейросетевого предсказания будущих видеок кадров на приеме, что позволило уменьшить интенсивность и задержку передачи видеок кадров от беспилотной системы до оператора при сохранении устойчивости FPV-взаимодействия;

– метод сжатия и восстановления команд FPV-взаимодействия оператора с беспилотными системами, отличающийся от известных применением помехоустойчивых кодов Рида-Соломона к сжатым тензорам непосредственно в латентном пространстве нейросетевых автокодировщиков, что позволило защитить данные от потерь при максимальном сжатии, а также передать команды ручного управления в каналах с ограниченной пропускной способностью;

– комплексная методика оценки эффективности информационного обмена при FPV-взаимодействии оператора с беспилотными системами на фрагменте гибридной

орбитально-наземной сети связи, которая отличается использованием вероятности достижения цели функционирования беспилотной системы в качестве критерия качества FPV вместо традиционно применяемых аддитивных сверток с экспертными весами, что позволяет отказаться от субъективных оценок при экспертных свертках частных критериев. В рамках комплексной методики разработан оригинальный подход количественного обоснования требований к объективным показателям перцептивного качества восстановленного FPV-видеопотока. В отличие от традиционных экспертных методов, данный подход базируется на анализе рисков и статистической обработке экспериментальных данных. Он позволяет установить прямую связь между численными значениями метрик перцептивного качества и вероятностью успешного достижения цели функционирования беспилотной системы, а также включает механизм проверки и коррекции требований на избыточность.

В диссертации предложены:

- новый подход к сжатию FPV-видеопотока, заключающийся в глубоком сжатии контекста видеосцены во внутреннее латентное пространство признаков нейронной сети с дальнейшей его обработкой;
- новый подход к построению архитектуры системы информационного обмена для снижения задержек передачи информационных потоков при FPV-взаимодействии в гибридных орбитально-наземных сетях связи, заключающийся в объединении наземных и спутниковых каналов связи, управлении информационными потоками, адаптивное управление режимами нейросетевых кодеков и статистический контроль параметров информационных потоков;
- новый вероятностный подход к многокритериальной оценке эффективности системы информационного обмена, основанный на использовании в качестве обобщенного показателя эффективности системы информационного обмена вероятности попадания значений задержек FPV-видеопотока на уровне приложения, команд взаимодействия и показателей перцептивного качества восстановленного FPV-видеопотока в область заданных требований.

доказаны:

- перспективность применения нейросетевого сжатия с целью уменьшения задержки FPV-видеопотока на уровне приложения и требуемой пропускной способности наземных и спутниковых каналов при сохранении заданного перцептивного качества восстановленных видеокадров;
- целесообразность применения краткосрочного предсказания будущих видеокадров с целью алгоритмической компенсации влияния задержки распространения и сокращения рассинхронизации FPV-видеопотока и команд взаимодействия в спутниковых каналах связи;
- применимость контрольных карт Шухарта с целью статистического контроля высокодинамичного стохастического процесса изменения интенсивности кадров FPV-видеопотока и адаптивного управления режимами его передачи.

введены:

- новый обобщенный показатель эффективности системы информационного обмена при FPV-взаимодействии оператора с беспилотной системой – вероятность достижения комплекса целей функционирования беспилотной системы, определяемая по совместному распределению частных показателей эффективности и позволяющая оценивать выполнение совокупности требований без экспертного назначения весовых коэффициентов;
- новое понятие «гибридной орбитально-наземной сети связи для беспилотных систем», характеризующее гибридную орбитально-наземную сеть связи, в которую включен наземный сегмент в составе мобильной сети связи, а также спутниковый сегмент, включающий в себя группировки космических аппаратов на низкой околоземной и геостационарной орбитах.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: доказаны теоремы и положения, расширяющие границы применимости научно-методического аппарата построения и оценки каналов информационного обмена для FPV-взаимодействия в гибридных орбитально-наземных сетях связи, а именно:

- условия применения метода предсказания будущих кадров FPV-видеопотока, которые определяют возможность алгоритмической компенсации влияния задержки

распространения цифрового FPV-видеопотока, упреждающего FPV-взаимодействия, временной согласованности видеокадров и обработки видеопотока в режиме реального времени. Перцептивное качество восстановленного видеопотока зависит от горизонта предсказания и динамики видеопотока. При увеличении горизонта оно снижается и приближается к предельному уровню, что ограничивает область эффективного применения метода. Время предсказания линейно зависит от разрешения входного видеопотока;

– зависимости задержки FPV-видеопотока на уровне приложения от технологии передачи, расстояния и размера полезной нагрузки, согласно которым в наземных мобильных сетях связи задержка слабо зависит от расстояния и размера видеокадра (полезной нагрузки), но существенно зависит от технологии передачи. В геостационарных спутниковых каналах зависимость задержки от размера полезной нагрузки имеет линейный или логарифмический возрастающий характер. В низкоорбитальном спутниковом сегменте (на примере сети Starlink) увеличение нагрузки может изменять вид распределения задержки от усеченного двухпараметрического бета-распределения к бимодальной смеси нормальных распределений;

– связь между перцептивным качеством восстановленного FPV-видеопотока и вероятностью достижения цели функционирования беспилотной системы. Ухудшение перцептивного качества восстановленного FPV-видеопотока сопровождается квазилинейным уменьшением данной вероятности. Вероятность достижения комплекса целей определяется совместным распределением задержек FPV-видеопотока и команд взаимодействия, вероятности потери кадров и показателей перцептивного качества восстановленного видеопотока. Это обеспечивает многокритериальную оценку одновременного выполнения заданных требований без экспертного назначения весовых коэффициентов;

– зависимость оценки времени предсказания кадров FPV-видеопотока в зависимости от разрешения исходных кадров видеопотока. Регрессионная зависимость носит линейный характер.

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) использованы: методы теории телетрафика, теории вероятностей, математической статистики, имитационного моделирования, помехоустойчивого кодирования, цифровой обработки изображений, машинного обучения и нейронных сетей;

изложены:

- доказательства применимости нейросетевого подхода к уменьшению задержки информационных потоков на уровне приложения, предусматривающего преобразование кадров FPV-видеопотока и команд взаимодействия во внутреннее латентное пространство признаков, их сжатие, помехоустойчивое кодирование и краткосрочное предсказание;

- теоретические положения метода предсказания будущих кадров FPV-видеопотока, формализованные в четырёх сформулированных и доказанных теоремах, которые устанавливают условия эффективности алгоритмической компенсации влияния задержки распространения и возникновения упреждающего FPV-взаимодействия, определяют правила индексации кадров и согласования горизонта предсказания с межкадровым интервалом, а также задают ограничения по продолжительности кодирования, декодирования и предсказания, соблюдение которых обеспечивает применимость метода для обработки видеопотока в реальном времени.

раскрыты:

- несоответствие известных методов снижения задержки FPV-видеопотока условиям гибридных орбитально-наземных сетей связи, обусловленное буферизацией и вычислительной сложностью стандартных видеокодеков, и невозможностью устранения задержки распространения цифрового FPV-видеопотока только за счет протокольной оптимизации;

- ограниченность известных методов многокритериальной оценки эффективности систем информационного обмена, использующих частные критерии или их аддитивные свертки с экспертно задаваемыми весами и не устанавливающих прямой связи между параметрами канала связи, перцептивным качеством

видеопотока и вероятностью достижения комплекса целей функционирования беспилотной системы;

изучены:

- связь между архитектурой и параметрами нейросетевого видеокодека, алгоритмами квантования и сжатия, перцептивным качеством восстановленного FPV-видеопотока и степенью его сжатия, при этом наибольшая чувствительность качества выявлена к уменьшению размерности латентного признакового пространства и параметрам сжатия с потерями. При этом вероятность выполнения требований изменяется по логистическому закону, степень сжатия – по степенному закону, а значения латентного представления имеют распределение, близкое к нормальному;

- связь между динамикой видеоряда, временным и пространственным сдвигами и корреляционными характеристиками видеокадров и их латентных признаковых представлений, причем корреляция наиболее интенсивно снижается при малых временных и пространственных сдвигах, латентные представления чувствительнее к увеличению временного лага, а косинусное сходство преимущественно характеризует динамичность видеоряда, а не содержание сцены;

- зависимость между параметрами маскирования, подавления артефактов, интерполяции кадров и качеством восстановленного FPV-видеопотока, при этом увеличение доли маскированных данных и числа интерполируемых кадров снижает качество, нейросетевые модели обеспечивают более устойчивое восстановление по сравнению с регрессионными, а чрезмерное подавление артефактов может вызывать цветовые искажения;

- связь между разрешением и динамикой видеоряда, способом кодирования, задержкой обработки и требуемой пропускной способностью канала связи, причем определяющее влияние оказывает способ кодирования; нейросетевые видеокодеки менее чувствительны к изменению динамики и разрешения, а усложнение модели прогнозирования времени кодирования и декодирования не обеспечивает существенного повышения точности;

– зависимость между параметрами нейросетевого сжатия команд взаимодействия и помехоустойчивого кодирования латентного признакового пространства, степенью сжатия и долей невосстановленных команд FPV-взаимодействия, причем увеличение размерности нейросетевой модели повышает степень сжатия, но усиливает ее колебания, тогда как рост кодовой избыточности монотонно уменьшает степень сжатия и долю невосстановленных команд, оказывая наибольшее влияние при малом числе проверочных символов;

проведена модернизация существующих методов сжатия FPV-видеопотока путем их дополнения преобразованием видеосцены в латентное пространство признаков нейронной сети, что обеспечивает уменьшение объема передаваемых данных и возможность работы в каналах с ограниченной пропускной способностью и большой задержкой передачи цифрового видеопотока.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены:

– метод обоснования архитектуры системы информационного обмена для FPV-взаимодействия оператора с беспилотной системой и протокол прикладного уровня FPV-CTVP, обеспечивающие совместную передачу FPV-видеопотока, телеметрии и команд взаимодействия, а также адаптивное управление информационными потоками при переключении между наземными и спутниковыми каналами связи:

во ФГУП «Космическая связь» при проектировании гибридных сетей с наземным и космическим сегментами для удалённого визуального мониторинга и управления устройствами Интернета вещей (акт от 10.04.2026);

в АО «РЕШЕТНЁВ» при выполнении в 2023-2025 годах инициативной работы по теме 599 для уточнения требований к архитектуре проектируемой гибридной сети связи и её интеллектуальным узлам (акт от 29.04.2026);

в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» в учебном процессе (акт № 48/54-99 от 30.03.2026);

– модели каналов информационного обмена наземного и космического сегментов гибридной орбитально-наземной сети связи и методика их экспериментального исследования, позволяющие установить зависимости показателей эффективности от параметров каналов и определить законы распределения задержек и потерь на прикладном уровне:

в ООО «Конструкторское бюро «Интеллектуальные приборы» при разработке интегрированных спутниковых радиолиний, системы подвижной спутниковой связи класса «Тень» для БАС и видеосистемы устойчивого телеуправления удалёнными и подвижными объектами (акт № 27-03/2026 от 27.03.2026);

в ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный ордена Красной Звезды институт имени маршала войск связи А. И. Белова» Министерства обороны Российской Федерации при выполнении НИР «Рассвет-СВК» и подготовке проекта технических требований к перспективной комплексной интеллектуальной системе видеоконтроля объектов Вооружённых Сил Российской Федерации (акт № 31/91 от 03.04.2026);

в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» в учебном процессе по дисциплинам, связанным с моделированием киберфизических систем (акт № 48/54-99 от 30.03.2026);

– комплекс методов уменьшения задержки передачи кадров FPV-видеопотока на основе нейросетевого сжатия, включающий нейросетевой видеокодек и программные средства маскирования, передачи и восстановления видеопотока и обеспечивающий по сравнению со стандартными видеокодеками уменьшение задержки передачи FPV-видеопотока HD разрешения в геостационарном спутниковом сегменте в среднем на 78% при сокращении требуемой пропускной способности на 40%, в сети 4G/LTE – на 20% при сокращении требуемой пропускной способности на 53%, а также дополнительное уменьшение объёма передаваемых данных за счёт маскирования на 25% и передачу видеопотока по низкоскоростным спутниковым каналам и цифровым каналам КВ- и УКВ-диапазонов:

во ФГУП «Космическая связь» при проектировании гибридных сетей для удалённого визуального мониторинга и управления устройствами Интернета вещей (акт от 10.04.2026);

в АО «РЕШЕТНЁВ» при выполнении инициативной работы по теме 599 для уточнения требований к интеллектуальным узлам гибридной сети и обоснования минимальных требований к параметрам спутниковых каналов управления беспилотными аппаратами (акт от 29.04.2026);

в ООО «Конструкторское бюро «Интеллектуальные приборы» при разработке интегрированных спутниковых радиолиний, системы подвижной спутниковой связи класса «Тень» для БАС и видеосистемы устойчивого телеуправления, а также при обосновании требований к видеокодекам и системам дистанционного пилотирования БАС (акт № 27-03/2026 от 27.03.2026);

в ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный ордена Красной Звезды институт имени маршала войск связи А. И. Белова» Министерства обороны Российской Федерации при выполнении НИР «Рассвет-СВК» в части разработки и унификации протоколов средств видеонаблюдения (акт № 31/91 от 03.04.2026);

в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» в учебном процессе по дисциплинам, связанным с искусственным интеллектом и нейронными сетями (акт № 48/54-99 от 30.03.2026);

– метод предсказания будущих кадров, обеспечивший алгоритмическую компенсацию задержки на 40-120 мс в зависимости от динамики FPV-видеопотока и сокращение воспринимаемой задержки на 18-40% в низкоорбитальном и на 5-30 % в геостационарном спутниковом сегменте при контролируемом влиянии на перцептивное качество восстановленного видеопотока:

во ФГУП «Космическая связь» при проектировании гибридных сетей для удалённого визуального мониторинга и управления устройствами Интернета вещей (акт от 10.04.2026);

в ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный ордена Красной Звезды институт имени маршала войск связи А. И. Белова» Министерства обороны Российской Федерации при выполнении НИР «Рассвет-СВК» и подготовке проекта технических требований к перспективной комплексной интеллектуальной системе видеоконтроля объектов Вооружённых Сил Российской Федерации (акт № 31/91 от 03.04.2026);

в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» в учебном процессе по дисциплине «Предиктивная аналитика в сетях и системах связи» (акт № 48/54-99 от 30.03.2026);

– метод адаптивного сжатия и помехоустойчивого кодирования команд взаимодействия оператора с беспилотной системой на основе нейросетевых автокодировщиков и помехоустойчивых кодов, обеспечивающий положительное сжатие коротких команд протокола CRSF и уменьшение требуемой скорости передачи при выполнении требований к времени их кодирования и декодирования;

в АО «РЕШЕТНЁВ» при выполнении инициативной работы по теме 599 для уточнения требований к интеллектуальным узлам и обоснования минимальных требований к параметрам спутниковых каналов управления беспилотными аппаратами (акт от 29.04.2026);

в ООО «Конструкторское бюро «Интеллектуальные приборы» при разработке интегрированных спутниковых радиолиний, системы подвижной спутниковой связи класса «Тень» для БАС и средств дистанционного пилотирования (акт № 27-03/2026 от 27.03.2026);

в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» в учебном процессе по дисциплинам, связанным с искусственным интеллектом и моделированием киберфизических систем (акт № 48/54-99 от 30.03.2026);

– комплексная методика оценки эффективности функционирования системы информационного обмена при FPV-взаимодействии, позволяющая оценить вероятность одновременного выполнения требований к задержке, потерям и

перцептивному качеству восстановленного видеопотока, обосновать параметры системы и определить требования к качеству FPV-видеопотока, при которых вероятность достижения цели функционирования беспилотной системы будет не ниже заданной:

во ФГУП «Космическая связь» при проектировании гибридных сетей с наземным и космическим сегментами для удалённого визуального мониторинга и управления устройствами Интернета вещей (акт от 10.04.2026);

в ФГБУ «16 Центральный научно-исследовательский испытательный ордена Красной Звезды институт имени маршала войск связи А. И. Белова» Министерства обороны Российской Федерации при выполнении ОКР «Штурм» в части разработки методики оценки помехозащищённости и разведзащищённости каналов управления (акт № 31/91 от 03.04.2026);

в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» в учебном процессе по дисциплинам, связанным с моделированием и оцениванием рисков функционирования киберфизических систем (акт № 48/54-99 от 30.03.2026).

определены возможности и перспективы практического использования полученных результатов диссертационного исследования, а именно:

– метода обоснования архитектуры системы информационного обмена и протокола FPV-STVP – в АО «ГЛОНАСС» при развитии цифровых сервисов идентификации и сопровождения беспилотных воздушных судов; в АО «Азимут» и ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» при сопряжении систем FPV-взаимодействия со средствами планирования использования воздушного пространства, полётно-информационного обслуживания и управления воздушным движением; в АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей» при создании интегрированных систем наблюдения, идентификации и информационного сопровождения беспилотных воздушных судов; в Ассоциации «АЭРОНЕКСТ» при подготовке предложений по унификации архитектур, протоколов и интерфейсов информационного взаимодействия участников отрасли беспилотной авиации;

– моделей каналов информационного обмена наземного и космического сегментов и методики их экспериментального исследования – в ФГАУ «НИЦ Телеком» при исследовании сетей связи новых поколений и спутниковых систем связи; в ПАО «ГИПРОСВЯЗЬ» при расчёте пропускной способности, зон обслуживания и показателей качества проектируемых сетей связи для использования БПЛА; во ФГУП «ВНИИФТРИ» при метрологическом обеспечении измерений задержки, вариации задержки, потерь и пропускной способности каналов связи; в ПАО «Ростелеком», ПАО «МТС», ПАО «МегаФон» и ПАО «ВымпелКом» при экспериментальной оценке каналов публичных и частных сетей 4G/LTE, 5G/IMT-2020; в АО «РЕШЕТНЁВ», ФГУП «Космическая связь» и АО «Газпром космические системы» и ООО «Спутникс» при обосновании параметров космических аппаратов, полезной нагрузки, наземной инфраструктуры и абонентских средств гибридных сетей связи;

– комплекса методов уменьшения задержки передачи FPV-видеопотока на основе нейросетевого сжатия – в ГК «Геоскан», ГК «Беспилотные системы», АО «НПП «Радар ммс», ООО «Транспорт будущего», ГК «ZALA AERO», ООО «Альбатрос» и ГК «Аэромакс» при разработке бортовых средств формирования и передачи видеопотока, станций внешнего пилота и систем оперативного видеомониторинга, работающих в условиях ограниченной пропускной способности и потерь данных, а также при создании беспилотных комплексов для мониторинга инфраструктуры, поисково-спасательных работ, логистики и обследования удалённых территорий;

– метода уменьшения задержки FPV-взаимодействия на основе предсказания будущих кадров видеопотока – во ФГУП «Космическая связь», АО «Газпром космические системы» и АО «РТКомм.РУ» при разработке прикладных сервисов дистанционного пилотирования и видеомониторинга через геостационарные спутниковые каналы связи, предусматривающих алгоритмическую компенсацию задержки распространения на стороне абонентского терминала, а также в ООО

«Бюро 1440» при исследовании и создании соответствующих сервисов на базе низкоорбитальной системы широкополосной спутниковой связи;

– метода адаптивного сжатия и агрегации команд взаимодействия оператора с беспилотной системой – в АО «НПП «Радиосвязь» и АО «НПФ «Микран» при разработке наземных, спутниковых, тропосферных и радиорелейных средств связи; в АО «НИИМА «Прогресс» при создании бортовых навигационно-связных модулей и телематического оборудования; в ГК «ПРОТЕЙ» при разработке ядер частных сетей 4G/LTE, 5G/IMT-2020 и систем передачи критически важной информации, предусматривающих агрегацию, приоритизацию и помехоустойчивую передачу коротких команд по каналам с ограниченной пропускной способностью и изменяющимися характеристиками;

– комплексной методики оценки эффективности функционирования системы информационного обмена при FPV-взаимодействии – в Минцифры России при формировании требований и программ исследований в области гибридных сетей связи; в Росавиации и ФГУП ГосНИИ ГА при разработке программ испытаний, оценке безопасности и обосновании условий эксплуатации беспилотных авиационных систем; в Росстандарте при подготовке предложений по стандартизации методов оценки каналов управления и передачи видеопотока; в ИПУ РАН при исследовании вероятностных моделей функционирования телекоммуникационных и киберфизических систем; в СПбГУТ, МТУСИ, ПГУТИ, СибГУТИ, ТУСУР, Университете ИТМО, МФТИ, МАИ и МГТУ ГА при выполнении научно-исследовательских работ и подготовке специалистов в области телекоммуникаций, искусственного интеллекта и беспилотных авиационных систем.

создан специализированный программно-аппаратный комплекс управления беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи, включающий терминалы оператора и беспилотной системы, модули нейросетевого кодирования и декодирования и средства подключения наземных и спутниковых каналов связи, что обеспечивает воспроизводимое исследование задержки, потерь и требуемой пропускной способности при смене сегмента сети без изменения логики

обработки информационных потоков; получены патенты РФ №2855032 и Евразийского патентного ведомства №052761 на изобретение «Система информационного обмена для управления беспилотными комплексами в орбитально-наземных гибридных сетях связи».

представлены:

– практические рекомендации по выбору архитектуры и настройке параметров нейросетевых видеокодеков с учетом ограничений по задержке, пропускной способности и перцептивному качеству, включая ограничение объема данных одного кадра в геостационарном спутниковом канале для снижения флуктуаций задержки передачи цифрового FPV-видеопотока;

– рекомендации по выбору горизонта предсказания и режима обработки кадров с учетом динамики видеоряда, производительности вычислительных средств и требований к временной согласованности FPV-видеопотока и команд взаимодействия;

– предложения по развитию положений 3GPP TS 22.125 и 3GPP TR 22.829 в части введения сценария FPV-управления беспилотными воздушными судами в гибридных сетях связи и установления взаимосвязанных требований к задержке, пропускной способности, потерям информационных потоков, перцептивному качеству видеопотока и согласованности передачи видео и команд оператора;

– предложения по развитию требований ГОСТ Р 59519-2021, ГОСТ Р 59520-2021 и методического обеспечения ГОСТ Р 71996-2025 с применением ГОСТ Р ИСО 11231-2024 в части контроля характеристик каналов передачи FPV-видеопотока и команд ручного управления, согласования информационных потоков, переключения между сегментами гибридной сети, предупреждения внешнего пилота о нарушениях условий информационного обмена и количественной оценки риска недостижения цели функционирования беспилотной системы.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ: результаты получены в натурных и стендовых экспериментах на действующих сетях 4G/LTE, геостационарных спутниковых системах «Ямал-601» (абонентский спутниковый терминал «РС-30М») и

«Благовест» (спутниковый терминал «Р-444-ПТН»), низкоорбитальной сети Starlink (спутниковый терминал «Starlink Flat High Performance») и радиоканалах КВ- (комплекс «Радиян-КВ») и УКВ- (цифровая УКВ-радиостанция пятого поколения Р-187-П1 «Азарт») диапазонов с использованием серийного телекоммуникационного и вычислительного оборудования, при этом условия измерений и параметры обработки фиксировались для обеспечения воспроизводимости результатов; показана высокая воспроизводимость результатов измерений для регионов г.Санкт-Петербург и г.Москва и различных внешних условий.

теория уменьшения задержек построена на использовании хорошо известных и апробированных методов, теоретические положения диссертационного исследования основываются на результатах анализа отечественных и зарубежных работ, характеризующих современное состояние исследуемой предметной области. Результаты теоретических исследований подтверждаются экспериментальными данными, полученными в рамках проведенных диссертационных исследований и исследований других авторов. Выводы диссертационного исследования прошли широкую апробацию и согласуются с результатами, опубликованными другими авторами по данной проблематике;

идея уменьшения задержек базируется на обобщении и развитии известных подходов к построению и оценке систем информационного обмена с беспилотными системами применительно к гибридным орбитально-наземным сетям связи, использовании нейросетевого сжатия и предсказания видеокадров для уменьшения задержки FPV-видеопотока, а также впервые установленных зависимостей между параметрами каналов информационного обмена, перцептивным качеством восстановленного видеопотока и вероятностью достижения цели функционирования беспилотной системы;

использование результатов исследований других авторов по моделированию сетей связи, нейросетевому сжатию, предсказанию видеопоследовательностей и оценке перцептивного качества восстановленного видеопотока проведено корректно, с указанием источников заимствования и сопоставлением авторских результатов с известными решениями;

установлены непротиворечивость теоретических положений, согласованность результатов имитационного моделирования с экспериментальными данными, качественное и количественное соответствие полученных зависимостей результатам независимых исследований в тех случаях, когда такое сравнение обосновано;

использованы современные методики сбора и статистической обработки данных, регрессионного и корреляционного анализа, ядерного оценивания плотности вероятности, проверки статистических гипотез по критериям Пирсона и Колмогорова–Смирнова, имитационного моделирования и сравнительных испытаний стандартных и нейросетевых видеокодеков.

Личный вклад соискателя состоит в том, что основные результаты диссертации получены автором самостоятельно, математические модели, методы анализа и вычислительные алгоритмы, экспериментальные исследования проведены и разработаны при его преобладающем участии или под его научным руководством. Направления исследований диссертационной работы, формулировки проблем и постановки задач обсуждались с научным консультантом проф. Р.В. Киричком, что отражено в совместных публикациях, в которых основные результаты и их доказательства принадлежат автору.

В ходе защиты диссертации было высказано критическое замечание о том, что требуют уточнения выводы об устойчивости разработанного метода по уменьшению задержки передачи кадров FPV-видеопотока беспилотных систем на основе нейросетевого сжатия к деградации канала при потерях пакетов 10% и о снижении задержки FPV-видеопотока в геостационарном сегменте до уровня, соизмеримого с наземным.

Соискатель Березкин А.А. в ходе заседания ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, согласился с замечаниями и привел собственную аргументацию.

Диссертационный совет установил, что диссертация Березкина Александра Александровича «Разработка и исследование комплекса моделей и методов по уменьшению задержки информационных потоков при взаимодействии с беспилотными системами в гибридных орбитально-наземных сетях связи» является завершенной научно-квалификационной работой и соответствует п.9 Положения о

присуждении ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям, а также пунктам 1, 2, 3, 4, 5, 11, 18 и 19 паспорта научной специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

На заседании 14 октября 2026 года диссертационный совет принял решение присудить Березкину Александру Александровичу ученую степень доктора технических наук за решение научной проблемы совершенствования научно-методического аппарата обоснования облика системы информационного обмена и оценки её эффективности, обеспечивающего уменьшение задержки информационных потоков при соблюдении требований к перцептивному качеству восстановленного FPV-видеопотока в процессе взаимодействия оператора с беспилотной системой в гибридных орбитально-наземных сетях связи, имеющий важное хозяйственное значение для развития страны.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 15, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Заместитель председателя диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Кучерявый Андрей Евгеньевич

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Владыко Андрей Геннадьевич

16 октября 2026 года

