

Обеспечение непрерывной высокоскоростной беспроводной связи на основе программно-аппаратного комплекса с интеллектуальным управлением гибридными каналами

А.Е.Алишева, Н.С. Мальцева, А.В. Осовский

Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия

Аннотация – В беспроводных системах передачи данных атмосферно-оптические линии связи (АОЛС) обеспечивают пропускную способность до 40 Гбит/с при отсутствии лицензионных ограничений и высокой криптостойкости, однако подвержены резкому затуханию сигнала из-за погодных факторов. Гибридные архитектуры АОЛС + радиоканалы (E-band, V-band) позволяют повысить доступность, но традиционные реактивные механизмы переключения приводят к потере пакетов и разрывам сессий. Предлагаемый программно-аппаратный комплекс реализует предиктивное управление на основе моделей машинного обучения, выполняемых на микроконтроллере архитектуры RISC-V с технологией TinyML. В программно-аппаратном комплексе непрерывно анализируются телеметрические данные и прогнозируется деградация канала заранее, что позволяет обеспечивать доступность канала без разрыва сессии, даже при туманности, осадках и турбулентности. Используемая архитектура разделяет плоскость управления (TinyML на RISC-V) и плоскость данных (коммутационные схемы ASIC), что приводит к вендор-нейтральности посредством интерфейсов SFP+ и Ethernet.

Ключевые слова – АОЛС, гибридная линия связи, TinyML, машинное обучение, предиктивное переключение, RISC-V

ВВЕДЕНИЕ

Свободно-пространственная оптическая связь (англ. Free Space Optical communication, FSO), или атмосферно-оптические линии связи (АОЛС) представляют собой одну из наиболее перспективных технологий беспроводной передачи данных на сегодняшний день. Используя оптическое излучение в диапазоне длин волн 850–1550 нм в качестве носителя информации, такие системы обеспечивают пропускную способность, сопоставимую с волоконно-оптическими линиями, при этом сохраняют преимущества беспроводного развертывания: отсутствие необходимости в прокладке кабеля, быструю установку и относительно низкую стоимость инфраструктуры на коротких и средних дистанциях [1].

АОЛС обеспечивают гигабитные и терабитные скорости на дистанциях 0,3–5 км (до 10–11 км в идеальных условиях), не требуют лицензий и обладают высокой направленностью луча, что минимизирует возможности перехвата сообщений. Ключевым ограничением по-прежнему остаётся зависимость от состояния атмосферы. Туман, дождь и снег ослабляют сигнал за счёт поглощения и рассеяния, а турбулентность приводит к нестабильности луча. В результате наблюдаются мерцание, смещение траектории и заметные колебания интенсивности.

На массовом рынке до сих пор нет полноценных решений, которые в автоматическом режиме объединяли бы разные каналы связи и заранее подстраивали их работу под меняющиеся условия.

Программно-аппаратный комплекс выступает как единый «координатор». Он собирает телеметрию из разных источников, отслеживает тревожные изменения и ещё до ухудшения связи перераспределяет нагрузку между каналами. За счёт этого передача данных не обрывается даже в моменты резкого ухудшения условий распространения сигнала.

I. ОБЗОР FSO/RF-СИСТЕМ С ПРЕДИКТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

АОЛС – вид связи, позволяющий передавать данные между объектами в атмосфере, имея оптическое соединение без использования оптоволокна или радиоэфира [2].

Развитие технологий атмосферной оптической связи представляет собой перспективное направление в области телекоммуникаций, обеспечивая высокоскоростную передачу данных без необходимости развертывания физической инфраструктуры. В то же время российские и зарубежные исследования последовательно подтверждают их главную уязвимость – резкое падение качества при ухудшении видимости, турбулентности или осадках.

Ранние работы по гибридным системам, сочетающим оптическую связь (FSO) и радиочастоты (RF), появились ещё в 2000-х – 2010-х годах. В частности, Вишневецкий В.М. и соавторы в 2007–2013 годах разработали математические модели высокоскоростных гибридных каналов на базе лазерной и радио технологий, показав, что комбинация позволяет существенно повысить общую надёжность по сравнению с одиночными каналами [3]. При ухудшении оптического сигнала система переходила на радиоканал, а после восстановления условий возвращалась обратно, минимизируя простои. Тем не менее эти модели в основном опирались на реактивную логику переключения, что приводило к неизбежным потерям пакетов в момент переключения от одного канала к другому.

Зарубежные исследования развивают эту идею ещё более детально. Уже в 2020 году Halaška R. [4] применил регрессионные алгоритмы машинного обучения (случайный лес, адаптивный и градиентный бустинг) для прогноза уровня принятого оптического сигнала RSSI, (Received Signal Strength Indicator) по реальным метеопараметрам — температуре, влажности, видимости и концентрации частиц. Модели, предложенные Kiran K.V [5] показали коэффициент детерминации R^2 до 0,89, что позволяло инициировать переключения ещё до обрыва связи. Модель вышла за рамки простой фиксации состояния среды и начала решать более прикладную задачу, предсказывать, какой уровень сигнала потребуется при текущих погодных условиях. Это особенно важно для систем связи, где дождь, туман или резкие изменения влажности сразу влияют на устойчивость канала. Значимость такого подхода состоит не только в повышении точности прогноза. Сеть получает возможность действовать на опережение, а не реагировать уже после ухудшения связи.

Схожую логику демонстрирует исследование М. Açıkgöz и М. Yücel [6]. Автор рассматривает концепцию жёсткого переключения для гибридной среды связи, где объединяются радиочастотный канал, атмосферно-оптическая линия в свободном пространстве и видимая световая связь RF/FSO/VLC. В основе архитектуры лежит не один алгоритм, а сразу несколько инструментов машинного обучения, включая искусственные нейронные сети, методы опорных векторов, деревья решений и случайные леса. Такой набор выглядит оправданным, поскольку разные модели по-разному справляются с шумом, нелинейностью и быстрыми колебаниями параметров канала. За счёт этого система может непрерывно отслеживать состояние среды и почти без задержки выбирать более подходящий способ передачи данных. Качество обслуживания (Quality of Service, QoS) удерживается не формально, а за счёт реального сокращения времени на переключение между каналами.

Ещё один важный шаг в сторону интеллектуального управления предложил Bithas P.S. [7]. Его работа сосредоточена уже не просто на выборе доступного канала, а на выборе канала с минимальными сигнальными накладными расходами в космическо-воздушно-наземных сетях. Во многих работах акцент делается только на надёжности или пропускной способности, тогда как избыточные служебные сигналы сами по себе начинают перегружать систему. Подход показывает более зрелое понимание архитектуры сети, где важен не только факт переключения, но и его цена для всей инфраструктуры.

Такой подход заметно снижает вероятность простоя канала за счёт уменьшения объёма служебного трафика и более эффективного принятия решений.

В России главной задачей стоит прикладная реализация атмосферно-оптической линии связи ввиду региональных особенностей.

В трудах [8] Сапожниковым М.В., Казанцевым С.Ю. и их соавторами предложена методика оценки доступности АОЛС для промышленных и энергетических объектов. Они создали карты применимости, которые учитывают климатические зоны, уровень атмосферной турбулентности, частоту туманов и загрязнение воздуха. Благодаря этому можно заранее понять, насколько эффективно будет работать АОЛС – от северных регионов с экстремально низкими температурами до промышленных зон с высоким содержанием аэрозолей.

Переход к предиктивным подходам особенно заметен в работе Лебедева И.В. [9]. Автор обосновал использование машинного обучения для прогнозирования доступности каналов связи на основе многолетних метеорологических данных. Модели случайного леса, градиентного бустинга и нейронных сетей позволяют предсказывать ухудшение сигнала с горизонтом от десятков секунд до нескольких минут. Это даёт возможность заранее перераспределять трафик и предотвращать потери пакетов.

Сапожниковым М.В. и Мироновым Ю.Б. в [10] была предложена математическая модель оценки атмосферных потерь в квантовом канале связи.

Для моделирования влияния тумана до сих пор чаще всего применяют хорошо известную эмпирическую модель Крузе и Кима [11, 12]:

$$\alpha_{\text{тумана}} = \frac{3,91}{V} \times \left(\frac{\lambda}{550}\right)^{-q}, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{тумана}}$ – коэффициент затухания в тумане, V – видимость в км, λ – длина волны излучения в нм, q – определяется типом тумана.

Для осадков применяется степенная зависимость:

$$\gamma_{\text{дождя}} = k \cdot (R)^\alpha, \quad (2)$$

где $\gamma_{\text{дождя}}$ – удельное затухание при дожде, R – интенсивность осадков в мм/ч, k и α определяются экспериментально.

Эти модели подтверждены многолетними измерениями и активно используются при генерации синтетических датасетов для обучения алгоритмов машинного обучения. Использование синтетических датасетов (искусственно созданных наборов данных), позволяет проводить эксперименты генерируя разные сценарии, задавая начальные данные, такие как погодные условия, расстояния, мощность и уровень турбулентности. В совокупности это формирует основу для перехода от реактивных методов компенсации к предиктивным системам управления каналами в гибридных АОЛС, что является ключевым направлением современных исследований и разработок.

Для реализации предиктивных алгоритмов на компактных устройствах всё чаще привлекают технологию запуска алгоритмов искусственного интеллекта непосредственно на локальных устройствах (Edge AI), а также направление машинного обучения, ориентированное на запуск моделей на микроконтроллерах и IoT с ограниченными ресурсами (TinyML). Отечественные разработки микроконтроллеров на архитектуре RISC-V (НИИЭТ, Микрон, Байкал Электроникс) создают базу для суверенных решений с низким энергопотреблением и задержкой принятия решений менее 1 мс [13]. Общие публикации по RISC-V в телекоммуникациях подтверждают возможность размещения компактных моделей прогнозирования прямо на устройстве без обращения к облаку.

Накопленный массив публикаций ясно показывает: движение от реактивного переключения к предиктивному управлению на компактных моделях машинного обучения и открытых архитектурах RISC-V открывает реальный путь к доступности канала и бесшовной передаче данных даже в самых неблагоприятных погодных условиях.

II. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

На рынке высокоскоростных беспроводных систем передачи данных в настоящее время отсутствуют автономные программно-аппаратные устройства, способные осуществлять предиктивное управление разнородными внешними модемами атмосферно-оптических систем и радиоканалов на основе алгоритмов машинного обучения. Тем не менее ряд решений смежного класса может рассматриваться заказчиками как возможная альтернатива, хотя каждое из них обладает существенными ограничениями по сравнению с предлагаемым подходом.

Одну из наиболее распространённых групп составляют интегрированные гибридные терминалы, объединяющие в одном корпусе оптический (FSO) и радиоканал. Среди них можно выделить продукцию компаний LightPointe (США) [14], Wireless Excellence

(Великобритания) [15] и отечественного производителя Mostcom [16]. Такие устройства используют простейшую реактивную логику переключения: радиоканал активируется только после полной потери оптического сигнала. Архитектура остаётся закрытой, привязанной к собственным модемам вендора, а механизмы предиктивного анализа на базе машинного обучения полностью отсутствуют. Стоимость комплекта варьируется от 25 до 60 тысяч долларов в зависимости от заявленной дальности и пропускной способности [14–16].

Отдельную группу решений формируют SD-WAN-контроллеры и граничные устройства, к которым относятся Cisco Viptela [17], Fortinet [18] и VMware Velocloud [19]. Их сильная сторона связана с логикой сетевого уровня. Такие платформы достаточно уверенно распределяют трафик между MPLS, публичным интернетом и мобильными каналами LTE или 5G, выбирая маршрут по текущей загрузке и политике приоритизации. Для корпоративной WAN-инфраструктуры это удобно, особенно там, где критична отказоустойчивость филиальной сети и нужно быстро переводить приложения с одного транспорта на другой без ручного вмешательства. Но в контексте гибридных FSO/RF-систем этого уже недостаточно. Здесь проходит граница между классическим SD-WAN и действительно интеллектуальным управлением физической средой передачи. Устройства этого класса работают на уровне L3 и выше, поэтому не видят сам механизм деградации беспроводного оптического канала. Они не анализируют туман, осадки, аэрозольные помехи, не связывают падение качества канала с погодным сценарием и не умеют заранее предсказывать ухудшение FSO-линии. Фактически система начинает реагировать уже после появления проблемы, а не до неё. При стоимости одного устройства примерно от 25 до 60 тысяч долларов и дополнительной ежегодной подписке на программное обеспечение, это ограничение выглядит весьма существенным.

Иной класс представляют системы мониторинга и сетевой оркестрации, которые предлагают Huawei, Nokia, SolarWinds и другие вендоры [20–22]. Их задача заключается в сборе телеметрии, централизуют контроль и поддерживают частичную автоматизацию, но, как правило, такие платформы базируются на серверной архитектуре. В этом проявляется недостаток традиционных NMS-подходов.

Стоимость внедрения таких решений начинается от 50 тысяч долларов за лицензию и услуги интеграции.

Отдельно стоит отметить чисто оптические терминалы атмосферной связи в свободном пространстве. Среди них:

- Mynaric HAWK (Германия) — полнодуплексный терминал со скоростью 1–9 Гбит/с, ориентированный на наземные и воздушные приложения, ориентировочная цена около 50 тыс. долларов [23];

- LightPointe AIRE X-STREAM (США) — лазерный мост с ультранизкой задержкой, 1,25 Гбит/с, дальность до 2,8 км в условиях слабого затухания, цена 25–45 тыс. долларов [14];

- fSONA SONAbeam серии 1250E и 2500E (Канада) – скорости 1,25 и 2,5 Гбит/с, дальность до 2,7 км в чистом воздухе, цена 20–35 тыс. [24];

- Mostcom (Россия) — терминалы до 10 Гбит/с и дальностью до 5 км (модель M1-GE-SL), цена 15–30 тыс. долларов, с опциональным радиоканалом интеллектуального управления [16].

Радиорелейные системы миллиметрового диапазона также предлагают высокие скорости. Пример – CableFree MMW Hybrid от Wireless Excellence (Великобритания) [15] до 10 Гбит/с в E-band, дальность до 3 км, цена 35–55 тыс. долларов. Однако и здесь отсутствует предиктивная логика на базе искусственного интеллекта.

Практически все существующие продукты обладают общими ограничениями:

- реактивный принцип переключения (переход на другой канал связи только после фактической потери сигнала);

- отсутствие предиктивной аналитики на основе машинного обучения;

- жёсткая привязка к оборудованию одного производителя или отсутствие поддержки разнородных модемов;

- игнорирование метеорологических факторов при принятии решений;

- недостаточная интеграция с системами автоматизированного управления сетевыми ресурсами на физическом уровне.

III. ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ГИБРИДНЫМИ КАНАЛАМИ СВЯЗИ

Разрабатываемый программно-аппаратный комплекс (ПАК) обладает рядом характеристик, которые существенно отличают его от существующих на рынке подходов к организации гибридных атмосферно-оптических и радиоканалов.

Ключевое различие разрабатываемого подхода проявляется в изменении логики принятия решений в системе управления каналами связи за счет машинного обучения.

В традиционных архитектурах переключение между каналами реализуется по реактивному принципу.

Система фиксирует ухудшение параметров уже в момент достижения пороговых значений, после чего инициирует переход.

В предлагаемом ПАК логика управления строится не на запоздалой реакции на уже возникший сбой, а на предварительной оценке того, как меняются параметры среды и к чему эти изменения приведут в ближайший момент. Именно это является ключевым отличием от

существующих решений. Вопрос уже не в том, чтобы просто зафиксировать ухудшение канала, а в том, чтобы распознать его приближение и обеспечить временной запас для управленческого действия.

Практическая ценность такого подхода заметна в момент принятия решения. Если система видит динамику к деградации канала заранее, примерно за 30–120 секунд до критического состояния, она получает возможность переключить соединение не в аварийном режиме, а в контролируемом. Формально этот интервал невелик. Но в реальной эксплуатации даже такой запас времени может оказаться решающим. Этого достаточно, чтобы снизить потери пакетов, уменьшить скачки задержки и сделать сам переход почти незаметным для пользовательских сервисов. Итоговая эффективность определяется не только качеством прогноза. Не менее важна скорость, с которой прогноз превращается в конкретное действие [25].

ПАК не требует глобальной модернизации существующей сети, а встраивается с минимальными изменениями. Использование стандартных интерфейсов Ethernet и SFP+, а также типовых протоколов управления создаёт вендор-независимую среду. На практике это означает более простое подключение к уже существующим узлам сети, меньше жёсткой привязки к одному поставщику и более реалистичный сценарий масштабирования.

Предлагаемый ПАК отличается тем, что центр управления переносится на физический уровень канала. В системах класса SD-WAN решение обычно принимается по косвенным сетевым признакам, например по задержке, потере пакетов или доступности маршрута. В ПАК первичными становятся не последствия деградации, а её ранние физические симптомы. К ним относятся уровень принятой оптической мощности, коэффициент битовых ошибок BER (Bit Error Rate), атмосферные воздействия, турбулентность и даже механические колебания, влияющие на юстировку оптической линии. Сетевые метрики почти всегда запаздывают, потому что отражают уже накопившийся эффект, тогда как физические параметры позволяют увидеть начало проблемы раньше и отделить деградацию канала от перегрузки сети или ошибок маршрутизации.

Отсюда вытекает выбор алгоритма переключения. Он реализуется на уровне пакетов и дополняется буферизацией и синхронизацией потоков, чтобы переход между FSO и RF не разрушал активные соединения. Практически это означает не просто смену трассы передачи, а плавный хэндовер без резкого роста задержек и без заметного для пользователя разрыва сессии.

Аппаратную часть ПАК предполагается реализовать на базе микроконтроллера K1921BG015 с архитектурой RISC-V. Такой выбор обусловлен гибкостью настройки вычислительных процессов.

В отличие от более распространённых решений с закрытой архитектурой, RISC-V предоставляет разработчику доступ к модификации набора инструкций, что позволяет оптимизировать обработку телеметрических данных и специализированных метрик канала [13].

Практическая ориентация комплекса видна не в общих декларациях, а в выборе интерфейсов. Поддержка Ethernet и модулей SFP+ делает систему совместимой не только с абстрактной сетевой инфраструктурой, а вполне с конкретным классом высокоскоростных транспортных решений, которые уже используются на рынке. У fSONA [24] линейки SONAbeam работают с Gigabit Ethernet и в ряде моделей поддерживают native Ethernet и SFP, а у BridgeWave в серии Flex4G-10000 заявлены 10G, 2.5G и 1G SFP+ интерфейсы вместе с Ethernet-портами. Это важная деталь. Она означает, что внедрение не упирается в специфическую аппаратную конфигурацию и не требует строить отдельный контур только ради одного нового узла. Не менее показательны и то, что в комплексе сохранены RS-232 и RS-485. Старые программируемые логические контроллеры (ПЛК), приводы, измерительные приборы и сервисные консоли до сих пор нередко завязаны именно на последовательные соединения, и потому отказ от них для современной архитектуры часто оказывается не прогрессом, а лишним барьером внедрения.

Поддержка SNMP (англ. Simple Network Management Protocol) и NETCONF (англ. NETwork CONfiguration) усиливает ту же логику. Протокол SNMP по-прежнему остаётся базовым механизмом наблюдения и обмена управленческой информацией, а протокол NETCONF был разработан именно как стандартный протокол установки, изменения и удаления конфигурации сетевых устройств. В связке это снижает порог интеграции с уже работающими системами мониторинга и администрирования. ПАК может выступать частью существующей операционной среды без болезненной замены привычных инструментов.

Предложенный подход реализует сдвиг от реактивного управления к предиктивному.

Обзоры по гибридным FSO/RF-сетям прямо указывают, что такие системы развиваются в сторону более сложных механизмов переключения, практических сценариев и применения машинного обучения, а реальные эксперименты всё чаще строятся вокруг атмосферных воздействий и интеллектуального выбора канала.

Архитектура программно-аппаратного комплекса (ПАК) разделена на плоскость управления и плоскость данных (см. Рис.1).

В предложенной архитектуре управление системой предполагается реализовывать на высокопроизводительном микроконтроллере с архитектурой RISC-V [13]. Эта плоскость отвечает за выполнение моделей искусственного интеллекта,

оптимизированных под TinyML, и выполняет несколько ключевых функций.

Она агрегирует телеметрические данные о состоянии каналов – уровень сигнала, коэффициент битовых ошибок, задержку от подключённых модемов, а также внешние метеоусловия. На основе этих данных выполняется анализ качества сигнала в реальном времени и формируются прогнозы, позволяющие инициировать предиктивные переключения между каналами.

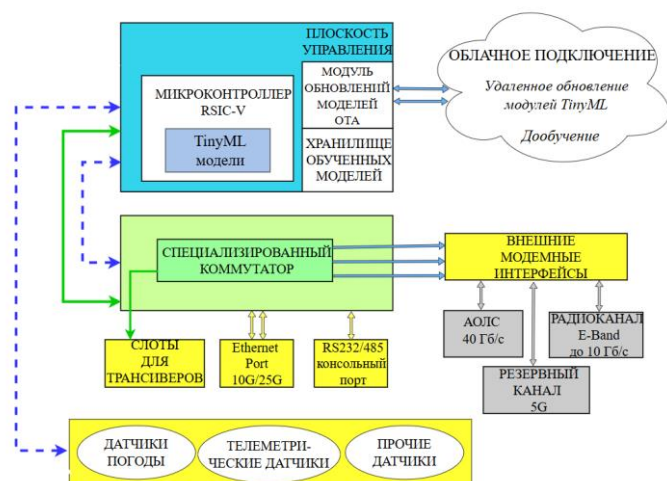


Рис.1 Функциональная схема программно-аппаратного комплекса с интеллектуальным управлением гибридными каналами

Плоскость данных, в отличие от управляющей, реализуется на базе ASIC, что обеспечивает существенно более высокий уровень производительности [25-28]. Передача трафика со скоростью до 40 Гбит/с осуществляется без участия управляющего ядра, исключая узкие места и снижая вероятность деградации потоков данных. Подобная архитектура напоминает подход, применяемый в современных дата-центровых коммутаторах, где управление и передача данных строго разделены.

Для атмосферных оптических линий связи нельзя рассматривать все вычислительные задачи как равнозначные. Здесь критичны высокая пропускная способность, минимальная задержка и отсутствие провалов в момент переключения. Контур мониторинга и прогноза устроен иначе. Ему важны не скорость передачи, а стабильный цикл измерений, предсказуемое время реакции и высокая точность телеметрии.

Анализ состояния канала логично вынести на микроконтроллерную платформу, где ниже энергопотребление и проще обеспечить детерминированное выполнение операций. В системах реального времени важна не максимальная скорость, а возможность заранее понимать, сколько займёт обработка каждого цикла. Это особенно ценно при работе с телеметрией, которая приходит непрерывно и

должна быстро превращаться в решение о переключении.

Ключевую роль в этой логике играет TinyML. В обзорах Ray P. P [29] и Heydari S., Mahmoud Q. H. [30] подчёркивается, что для такого класса устройств типичны конфигурации с памятью порядка менее 1 МБ, а значит, модель должна быть компактной и заранее адаптированной под жёсткие аппаратные ограничения. Такой подход заставляет проектировать интеллект не как внешнюю надстройку, а как часть самого оборудования.

Практика становится заметна на уровне самих прогнозов. Если устройство локально собирает данные об уровне сигнала, погодных параметрах и статистике ошибок, оно может не просто фиксировать сбой, а замечать его приближение. Для гибридных FSO/RF-систем такая постановка уже подтверждается работами Larčák M., Ovseník Ľ [31] и более поздними исследованиями группы Lionis A., Peppas K., Nistazakis H. E., Tsigopoulos A., Cohn K. [32], где прогноз RSSI и погодных параметров используется как основа для адаптивного хэндовера.

Локализация вычислений даёт комплексу ещё одно важное свойство – автономность. Даже если внешний канал управления временно недоступен, устройство сохраняет возможность анализировать состояние среды и заранее инициировать переключение. Для АОЛС это особенно важно, потому что деградация канала часто развивается быстрее, чем удалённая система успевает собрать данные, передать их в облако и вернуть команду обратно. Устойчивость создаётся не только за счёт точности модели, но и за счёт близости вычисления к самому каналу.

Долгосрочную эффективность такой системы определяет не стартовая точность модели, а её способность подстраиваться под конкретную территорию. Например, для Астрахани характерен заметно более сухой режим, около 256 мм осадков в год, средняя температура порядка плюс 11,8–12,6 °С и средняя влажность около 61%. В Москве картина уже другая, средняя годовая температура около плюс 6,5 °С, влажность около 71,5%, а в холодный сезон относительная влажность по месяцам держится примерно в диапазоне 80–85%. В Норильске средняя годовая температура около минус 9,1 °С, влажность около 80,4%, а годовое количество осадков составляет примерно 562–752 мм [33].

Механизм OTA-обновлений в такой архитектуре нужен не как сервисное дополнение, а как основной способ переноса накопленного опыта в поле. Работа L. Forgmánek [34] показывает, что современные OTA-схемы для Edge-устройств уже поддерживают централизованное управление версиями, проверку совместимости и доставку обновлений через неоднородные каналы связи.

IV. ПРЕИМУЩЕСТВА ВЫБРАННОГО АРХИТЕКТУРНОГО РЕШЕНИЯ

Сочетание RISC-V и TinyML задаёт для таких систем не просто новую аппаратную базу, а другую инженерную логику. Центр тяжести смещается с универсального процессора на платформу, которая заранее подстроена под одну группу задач, анализ телеметрии, оценку состояния канала и быстрое локальное решение без обращения к внешним вычислениям. Канал здесь меняется не по расписанию, а под действием тумана, влаги, турбулентности и вибраций, поэтому ценность платформы определяется не абстрактной производительностью, а тем, насколько ровно и предсказуемо она отрабатывает каждый цикл анализа. RISC-V при этом важен не сам по себе, а как открытый стандарт ISA с публично доступными спецификациями, а TinyML, по выводам обзоров, как раз лучше всего работает там, где нужны быстрый отклик, локальная обработка и независимость от облака.

Практический смысл решения усиливается ещё и технологической независимостью. У RISC-V открыта сама архитектурная основа, а не только отдельные инструменты вокруг неё, поэтому разработчик получает доступ к более глубокой оптимизации программного и аппаратного уровня.

Отсюда следует и следующий шаг – возможность адаптировать набор инструкций и вычислительные блоки под конкретные операции телеметрического анализа.

Для АОЛС это особенно важно, потому что погода и механика линии меняют состояние канала быстро, а ошибка в несколько лишних шагов обработки уже переходит в потерянное время.

Решающим фактором в данной архитектуре выступает не сам микроконтроллер, а разнесение функциональных контуров по разным вычислительным плоскостям [35, 36]. В системах смешанной критичности проблема обычно возникает не на уровне пиковой производительности, а в точках совместного доступа к памяти, межсоединению и шинам, где некритичные задачи начинают вносить джиттер в работу тех модулей, для которых важна гарантированная реакция.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ПАК с интеллектуальным управлением формирует уровень управления беспроводными каналами связи. Использование предиктивных алгоритмов позволяет не просто компенсировать последствия атмосферных помех, а снижать их влияние до момента критического ухудшения канала.

Архитектурное преимущество комплекса определяется сочетанием трёх факторов. Первый фактор связан с применением открытой архитектуры

RISC-V, которая снижает зависимость от закрытых платформ и расширяет возможности аппаратно-программной настройки. Вторым фактором является использование TinyML, что позволяет выполнять прогноз локально, без обращения к внешнему вычислительному контуру, и тем самым уменьшать задержку принятия решения. Третьим фактором является разделение плоскости управления и плоскости данных. Такое решение уменьшает конкуренцию за общие вычислительные ресурсы и повышает предсказуемость реакции системы при высокой нагрузке линии.

Существенным результатом предложенного подхода следует считать не только повышение отказоустойчивости гибридной линии, но и рост её эксплуатационной адаптивности. Возможность локального накопления статистики, OTA-обновления и последующего дообучения модели делает систему чувствительной к региональным особенностям среды. Для АОЛС это особенно значимо, поскольку профиль затухания, турбулентности и метеорологических воздействий заметно различается между регионами, а значит, единая статическая модель со временем теряет точность. В этом смысле перспективность комплекса определяется не стартовой конфигурацией, а способностью к длительной адаптации в реальных условиях эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Andrews L.C. Laser Beam Propagation through Random Media : монография / L.C. Andrews, R.L. Phillips. – 2nd ed. – Bellingham, WA : SPIE Press, 2005. – 782 p.
- [2] Сербин Е.М. Всепогодная атмосферная оптическая линия связи [Электронный ресурс] // НиКа. – 2013. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vsepogodnaya-atmosfernaya-opticheskaya-liniya-svyazi> (дата обращения: 28.03.2026).
- [3] Вишневецкий В.М. Моделирование и анализ гибридного канала связи на базе лазерной и радио технологий [Электронный ресурс] / В.М. Вишневецкий, О.В. Семенова, С.Ю. Шаров // УБС. – 2011. – № 35. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-analiz-gibridnogo-kanala-svyazi-na-baze-lazernoy-i-radio-tehnologii> (дата обращения: 13.01.2026).
- [4] Prediction of Received Optical Power for Switching Hybrid FSO/RF System / R. Haluška, P. Šufaj, E. Ovsenič, S. Marchevský, J. Papaj, L. Doboš // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – No. 8. – Art. 1261. – DOI: 10.3390/electronics9081261.
- [5] Machine learning aided switching scheme for hybrid FSO/RF transmission / K.V. Kiran, S. Perinbaraj, J. Pradhan, P.K. Mallick, A.K. Turuk, S.K. Das // Intelligent Decision Technologies. – 2020. – Vol. 14. – No. 4. – P. 529–536. – DOI: 10.3233/IDT-190161.
- [6] Açıkgöz M. Machine Learning-Assisted Hard Switching Scheme for Next Generation Optical Wireless Hybrid Communication Systems / M. Açıkgöz, M. Yücel // International Journal of Communication Systems. – 2026. – Vol. 39. – No. 1. – Art. e70324. – DOI: 10.1002/dac.70324.
- [7] Bithas P.S. Hybrid FSO/RF Communications in Space-Air-Ground Integrated Networks: A Reduced Overhead Link Selection Policy / P.S. Bithas, H.E. Nistazakis, A. Katsis, L. Yang // Electronics. – 2024. – Vol. 13. – No. 4. – Art. 806. – DOI: 10.3390/electronics13040806.
- [8] Разработка карты применимости атмосферной оптической связи на объектах атомной энергетики Российской Федерации / С.Ю. Казанцев, М.В. Сапожников, Д.Н. Терехин // Ядерная физика и инжиниринг. – 2025. – Т. 16. – № 1. – С. 5–12. – DOI: 10.56304/S2079562924060162.
- [9] Лебедев И.В. Методы машинного обучения в прогнозировании времени доступности атмосферных оптических линий связи на основе многолетних данных о состоянии атмосферы [Электронный ресурс] // Вестник науки. – 2025. – № 3(84). – URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/metody-mashinnogo-obucheniya-v-prognozirovanii-vremeni-dostupnosti-atmosfernyh-opticheskikh-linij-svyazi-na-osnove-mnogoletnih](https://cyberleninka.ru/article/n/metody-mashinnogo-obucheniya-v-prognozirovanii-vremeni-dostupnosti-atmosfernyh-opticheskikh-linij-svyazi-na-osnove-mnogoletnih-dannyyh) (дата обращения: 28.03.2026).
- [10] Сапожников М.В. Методика оценки потерь, обусловленных атмосферной турбулентностью в квантовом канале связи с КРК / М.В. Сапожников, Ю.Б. Миронов, С.Ю. Казанцев // Электросвязь. – 2025. – № 8. – С. 60–69. – DOI: 10.34832/ELSV.2025.70.8.007.
- [11] Kruse P.W. Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection / P.W. Kruse, L.D. McLaughlin, R.B. McQuistan. – New York : Wiley, 1962. – 448 p.
- [12] Kim I.I. Comparison of Laser Beam Propagation at 785 nm and 1550 nm in Fog and Haze for Optical Wireless Communications / I.I. Kim, B. McArthur, E.J. Korevaar // Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4214. – P. 26–37. – DOI: 10.1117/12.417512.
- [13] RISC-V Architecture Overview [Электронный ресурс] // RISC-V International. – URL: <https://riscv.org> (дата обращения: 22.01.2026).
- [14] LightPointe [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.lightpointe.com/> (дата обращения: 04.03.2026).
- [15] CableFree [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cablefree.net/> (дата обращения: 13.02.2026).
- [16] MOSTCOM [Электронный ресурс]. – URL: <https://mocom.ru/> (дата обращения: 15.01.2026).
- [17] Cisco (Viptela) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cisco.com> (дата обращения: 15.01.2026).
- [18] Fortinet. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fortinet.com/> (дата обращения: 15.01.2026).
- [19] VMware (Velocloud). [Электронный ресурс]. URL: <https://www.vmware.com/> (дата обращения: 15.01.2026).
- [20] iMaster NCE [Электронный ресурс] // Huawei. – URL: <https://e.huawei.com/en/products/network-analysis> (дата обращения: 19.01.2026).
- [21] Network Services Platform (NSP) [Электронный ресурс] // Nokia. – URL: <https://www.nokia.com/ip-networks/network-services-platform/> (дата обращения: 24.01.2026).
- [22] Network Monitoring Solutions [Электронный ресурс] // SolarWinds. – URL: <https://www.solarwinds.com/solutions/network-solutions> (дата обращения: 18.02.2026).
- [23] HAWK – Optical Communication Terminal for Airborne and Ground Operations [Электронный ресурс] // Mynaric. – URL: <https://mynaric.com/products/hawk/> (дата обращения: 13.02.2026).
- [24] Products [Электронный ресурс] // fSONA. – URL: <https://www.fsona.com/product.php?sec=2500e> (дата обращения: 22.02.2026).
- [25] Kutuzov D. Crossbar Switch Arbitration with Traffic Control for NoC / D. Kutuzov, A. Osovsky, D. Starov, O. Stukach, N. Maltseva, D. Surkov // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Tomsk, Russian Federation, 2022. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002976.
- [26] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661380 Российской Федерации. Элемент коммутации для коммуникационных структур высоконагруженных маршрутизаторов / Д.В. Кутузов, А.В. Осовский, О.В. Стукач [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». – № 2019660257; заявл. 19.08.2019; опубл. 28.08.2019.
- [27] Кутузов Д.В., Осовский А. В., Стукач О. В. Модель генерации и обработки трафика IoT параллельными коммутационными системами // Вестник СибГУТИ. 2019. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-generatsii-i-obrabotki-trafika-iot-parallelnymi-kommutatsionnymi-sistemami> (дата обращения: 21.02.2026).
- [28] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026614395 Российская Федерация. Система моделирования процесса передачи трафика в условиях

непрерывного обрыва и восстановления каналов связи / А.А. Сорокин, А.В. Осовский, Д.В. Кутузов [и др.] ; заявитель ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». – Заявл. 11.02.2026. – Опубл. 16.02.2026.

- [29] Ray P.P. A Review on TinyML: State-of-the-Art and Prospects // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 34. – No. 4. – P. 1595–1623. – DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.11.019.
- [30] Heydari S. Tiny Machine Learning and On-Device Inference: A Survey of Applications, Challenges, and Future Directions // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – No. 10. – Art. 3191. – DOI: 10.3390/s25103191.
- [31] Lapčák M. Investigation of Machine Learning Methods for Prediction of Measured Values of Atmospheric Channel for Hybrid FSO/RF System / M. Lapčák, L. Ovseník, J. Oravec, N. Zdravecký // Photonics. – 2022. – Vol. 9. – No. 8. – Art. 524. – DOI: 10.3390/photonics9080524.
- [32] Lionis, A., Peppas, K., Nistazakis, H. E., Tsigopoulos, A. D., & Cohn, K. Experimental Performance Analysis of an Optical Communication Channel over Maritime Environment. // Electronics – 2020. - Vol. 9. – No. 7. – Art. 1109. – DOI: 10.3390/electronics9071109
- [33] Погода и климат [Электронный ресурс] // Climate-Data.org. – URL: <https://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=ru> (дата обращения: 27.02.2026).
- [34] Formanek L. Advanced System for Remote Updates on ESP32-Based Devices Using Over-the-Air Update Technology / L. Formanek, M. Kubascik, O. Karpis, P. Kolok // Computers. – 2025. – Vol. 14. – No. 12. – Art. 531. – DOI: 10.3390/computers14120531.
- [35] Развитие средств параллельной коммутации в системах связи 5G / Д.В. Кутузов, А.В. Осовский, Д.В. Старов, Е.А. Моторина // Радиотехника. – 2019. – № 3. – С. 70–78.
- [36] Осовский, А.В. Анализ и расчёт трафика в телекоммуникационных системах: учебное пособие / А.В. Осовский, Н.С. Мальцева, Д.В. Кутузов; ФГБОУ ВО «Астраханский государственный технический университет». – Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2022. – 164 с. – ISBN 978-5-89154-739-1.

Информация об авторах

Алишева Альбина Ерсайиновна, аспирант Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, alisheva94@mail.ru, ORCID: 0009-0004-7359-9453

Мальцева Наталия Сергеевна, к.т.н., доц., доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, maltsevans@mail.ru, ORCID: 0000-0001-9731-4281

Осовский Алексей Викторович, к.т.н., доц., доцент кафедры «Связь» Астраханского государственного технического университета, г. Астрахань, Россия, a_osovskiy@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3174-9765

Ensuring Continuous High-Speed Wireless Communication of a Hybrid Architecture Based on a Hardware-Software Complex with Intelligent Control

Alisheva A.E., Maltseva N.S., Osovsky A.V.

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia

Abstract – In wireless data transmission systems, atmospheric optical communication links (AOLCs) provide throughput of

up to 40 Gbit/s without licensing restrictions and high cryptographic strength; however, they are subject to severe signal attenuation due to weather conditions. Hybrid AOLC + radio channel architectures (E-band, V-band) can improve availability, but traditional reactive switching mechanisms lead to packet loss and session interruptions. The proposed hardware-software complex implements predictive control based on machine learning models executed on a RISC-V architecture microcontroller using TinyML technology. The hardware-software complex continuously analyzes telemetry data and predicts channel degradation in advance, ensuring channel availability without session interruption even under fog, precipitation, and turbulence. The adopted architecture separates the control plane (TinyML on RISC-V) from the data plane (ASIC switching fabrics), resulting in vendor neutrality through SFP+ and Ethernet interfaces.

Keywords – AOLC, hybrid communication link, TinyML, machine learning, predictive switching, RISC-V

REFERENCES

- [1] Andrews L.C. Laser Beam Propagation through Random Media : монография / L.C. Andrews, R.L. Phillips. – 2nd ed. – Bellingham, WA : SPIE Press, 2005. – 782 p.
- [2] Serbin E.M. Vsepogodnaya atmosfernaya opticheskaya liniya svyazi [Elektronnyj resurs] // NiKa. – 2013. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vsepogodnaya-atmosfernaya-opticheskaya-liniya-svyazi> (date of access: 28.03.2026).
- [3] Vishnevskij V.M. Modelirovanie i analiz gibridnogo kanala svyazi na baze lazernoj i radio tekhnologij [Elektronnyj resurs] / V.M. Vishnevskij, O.V. Semenova, S.YU. SHarov // UBS. – 2011. – № 35. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-i-analiz-gibridnogo-kanala-svyazi-na-baze-lazernoj-i-radio-tehnologiy> (date of access: 13.01.2026).
- [4] Prediction of Received Optical Power for Switching Hybrid FSO/RF System / R. Haluška, P. Suřaj, L. Ovseník, S. Marchevský, J. Papaj, L. Doboř // Electronics. – 2020. – Vol. 9. – No. 8. – Art. 1261. – DOI: 10.3390/electronics9081261.
- [5] Machine learning aided switching scheme for hybrid FSO/RF transmission / K.V. Kiran, S. Perinbaraj, J. Pradhan, P.K. Mallick, A.K. Turuk, S.K. Das // Intelligent Decision Technologies. – 2020. – Vol. 14. – No. 4. – P. 529–536. – DOI: 10.3233/IDT-190161.
- [6] Açıkgöz M. Machine Learning-Assisted Hard Switching Scheme for Next Generation Optical Wireless Hybrid Communication Systems / M. Açıkgöz, M. Yücel // International Journal of Communication Systems. – 2026. – Vol. 39. – No. 1. – Art. e70324. – DOI: 10.1002/dac.70324.
- [7] Bithas P.S. Hybrid FSO/RF Communications in Space-Air-Ground Integrated Networks: A Reduced Overhead Link Selection Policy / P.S. Bithas, H.E. Nistazakis, A. Katsis, L. Yang // Electronics. – 2024. – Vol. 13. – No. 4. – Art. 806. – DOI: 10.3390/electronics13040806.
- [8] Razrabotka karty primenimosti atmosfernoj opticheskoj svyazi na ob'ektah atomnoj energetiki Rossijskoj Federacii / S.YU. Kazancev, M.V. Sapozhnikov, D.N. Terekhin // YAdernaya fizika i inzhiniring. – 2025. – T. 16. – № 1. – S. 5–12. – DOI: 10.56304/S2079562924060162.
- [9] Lebedev I.V. Metody mashinnogo obucheniya v prognozirovanii vremeni dostupnosti atmosferyh opticheskijh linij svyazi na osnove mnogoletnih dannyh o sostoyanii atmosfery [Elektronnyj resurs] // Vestnik nauki. – 2025. – № 3(84). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-mashinnogo-obucheniya-v-prognozirovanii-vremeni-dostupnosti-atmosferyh-opticheskijh-linij-svyazi-na-osnove-mnogoletnih> (date of access:28.03.2026).
- [10] Sapozhnikov M.V. Metodika ocenki poter', obuslovlennyyh atmosfernoj turbulentnost'yu v kvantovom kanale svyazi s KRK / M.V. Sapozhnikov, YU.B. Mironov, S.YU. Kazancev //

- Elektrosvyaz'. – 2025. – № 8. – S. 60–69. – DOI: 10.34832/ELSV.2025.70.8.007.
- [11] Kruse P.W. Elements of Infrared Technology: Generation, Transmission and Detection / P.W. Kruse, L.D. McGlauchlin, R.B. McQuistan. – New York : Wiley, 1962. – 448 p.
- [12] Kim I.I. Comparison of Laser Beam Propagation at 785 nm and 1550 nm in Fog and Haze for Optical Wireless Communications / I.I. Kim, B. McArthur, E.J. Korevaar // Proceedings of SPIE. – 2001. – Vol. 4214. – P. 26–37. – DOI: 10.1117/12.417512.
- [13] RISC-V Architecture Overview [Elektronnyj resurs] // RISC-V International. – URL: <https://riscv.org> (date of access: 22.01.2026).
- [14] LightPointe [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://www.lightpointe.com/> (date of access: 04.03.2026).
- [15] CableFree [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://www.cablefree.net/> (date of access: 13.02.2026).
- [16] MOSTCOM [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://mocom.ru/> (date of access: 15.01.2026).
- [17] Cisco (Viptela) [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://www.cisco.com> (date of access: 15.01.2026).
- [18] Fortinet. [Elektronnyj resurs]. – URL: <https://www.fortinet.com/> (date of access: 15.01.2026).
- [19] VMware (Velocloud). [Elektronnyj resurs] – URL: <https://www.vmware.com/> (date of access: 15.01.2026).
- [20] iMaster NCE [Elektronnyj resurs] // Huawei. – URL: <https://e.huawei.com/en/products/network-analysis> (date of access: 19.01.2026).
- [21] Network Services Platform (NSP) [Elektronnyj resurs] // Nokia. – URL: <https://www.nokia.com/ip-networks/network-services-platform/> (date of access: 24.01.2026).
- [22] Network Monitoring Solutions [Elektronnyj resurs] // SolarWinds. – URL: <https://www.solarwinds.com/solutions/network-solutions> (date of access: 18.02.2026).
- [23] HAWK – Optical Communication Terminal for Airborne and Ground Operations [Elektronnyj resurs] // Mynaric. – URL: <https://mynaric.com/products/hawk/> (дата обращения: 13.02.2026).
- [24] Products [Электронный ресурс] // fSONA. – URL: <https://www.fsona.com/product.php?sec=2500e> (date of access: 22.02.2026).
- [25] Kutuzov D. Crossbar Switch Arbitration with Traffic Control for NoC / D. Kutuzov, A. Osovsky, D. Starov, O. Stukach, N. Maltseva, D. Surkov // 2022 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Tomsk, Russian Federation, 2022. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/SIBCON56144.2022.10002976.
- [26] Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2019661380 Rossijskaya Federaciya. Element kommutacii dlya kommunikacionnyh struktur vysokonagruzhenykh marshrutizatorov / D.V. Kutuzov, A.V. Osovskij, O.V. Stukach [i dr.] ; zayavitel' FGBOU VO «Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». – № 2019660257 ; zayavl. 19.08.2019 ; opubl. 28.08.2019.
- [27] Kutuzov D. V., Osovskij A. V., Stukach O. V. Model' generacii i obrabotki trafika IoT paralelnymi kommutacionnymi sistemami // Vestnik SibGUTI. 2019. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/model-generatsii-i-obrabotki-trafika-iot-paralelnymi-kommutatsionnymi-sistemami> (date of access: 21.02.2026).
- [28] Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2026614395 Rossijskaya Federaciya. Sistema modelirovaniya processa peredachi trafika v usloviyah nepreryvnogo obryva i vosstanovleniya kanalov svyazi / A.A. Sorokin, A.V. Osovskij, D.V. Kutuzov [i dr.] ; zayavitel' FGBOU VO «Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». – Zayavl. 11.02.2026. – Opubl. 16.02.2026.
- [29] Ray P.P. A Review on TinyML: State-of-the-Art and Prospects // Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences. – 2022. – Vol. 34. – No. 4. – P. 1595–1623. – DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.11.019.
- [30] Heydari S. Tiny Machine Learning and On-Device Inference: A Survey of Applications, Challenges, and Future Directions // Sensors. – 2025. – Vol. 25. – No. 10. – Art. 3191. – DOI: 10.3390/s25103191.
- [31] Lapčák M. Investigation of Machine Learning Methods for Prediction of Measured Values of Atmospheric Channel for Hybrid FSO/RF System / M. Lapčák, E. Ovseník, J. Oravec, N. Zdravecký // Photonics. – 2022. – Vol. 9. – No. 8. – Art. 524. – DOI: 10.3390/photonics9080524.
- [32] Lionis, A., Peppas, K., Nistazakis, H. E., Tsigopoulos, A. D., & Cohn, K. Experimental Performance Analysis of an Optical Communication Channel over Maritime Environment. // Electronics – 2020. – Vol. 9. – No. 7. – Art. 1109. – DOI: 10.3390/electronics9071109
- [33] Pogoda i klimat [Elektronnyj resurs] // Climate-Data.org. – URL: <https://www.pogodaiklimat.ru/history.php?id=ru> (date of access: 27.02.2026).
- [34] Formanek L. Advanced System for Remote Updates on ESP32-Based Devices Using Over-the-Air Update Technology / L. Formanek, M. Kubascik, O. Karpis, P. Kolok // Computers. – 2025. – Vol. 14. – No. 12. – Art. 531. – DOI: 10.3390/computers14120531.
- [35] Razvitie sredstv paralel'noj kommutacii v sistemah svyazi 5G / D.V. Kutuzov, A.V. Osovskij, D.V. Starov, E.A. Motorina // Radiotekhnika. – 2019. – № 3. – S. 70–78.
- [36] Osovskij, A. V. Analiz i raschyot trafika v telekommunikacionnyh sistemah : uchebnoe posobie / A. V. Osovskij, N. S. Mal'ceva, D. V. Kutuzov ; FGBOU VO «Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». – Astrahan' : Astrahanskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet, 2022. – 164 s. – ISBN 978-5-89154-739-1.

Information about the authors

Alisheva Albina Ersainovna, postgraduate student at Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, alisheva94@mail.ru ORCID: 0009-0004-7359-9453

Maltseva Natalia Sergeevna, Cand. of Techn. Sci., Associate Professor, Department of Communications, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, e-mail: maltsevans@mail.ru ORCID: 0000-0001-9731-4281

Osovsky Alexey Viktorovich, Cand. of Techn. Sci., Associate Professor in the Communications Department at Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russia, a_osovskiy@mail.ru, ORCID: 0000-0002-3174-9765