

СТАНДАРТЫ 5G-ADVANCED И ПОДГОТОВКА К 6G: ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ЭТАП ЭВОЛЮЦИИ

Горохов А. В.¹, Николаева П. А.²

DOI:10.21681/3034-4050-2026-4-75-83

Ключевые слова: Release 18, Release 19, IMT-2030, радиодоступ, сетевое расслоение, интеллектуальное управление, энергоэффективность, интегрированное зондирование, негеостационарная инфраструктура.

Аннотация

Целью работы является разработка научно обоснованной модели оценки стандартов 5G-Advanced как промежуточного этапа эволюции мобильных сетей от пятого поколения к шестому поколению связи. Особое внимание уделено определению тех функциональных направлений, которые одновременно решают прикладные задачи развития 5G и формируют технологический задел для будущих систем 6G.

Метод исследования: применение системно-технического анализа публикаций по эволюции 5G-Advanced, развитию 3GPP Release 18, Release 19 и ранних направлений Release 20, а также по перспективным технологиям 6G. Использован сравнительный метод, позволяющий сопоставить функциональные блоки 5G-Advanced по критериям радиointерфейса, сетевой архитектуры, интеллектуализации, поддержки вертикальных сервисов, энергоэффективности и готовности к интеграции с будущими сценариями IMT-2030. Для исключения описательного характера исследования предложена формализованная качественная модель переходного слоя, в которой каждая группа стандартных функций рассматривается по трем признакам: текущий эксплуатационный эффект, вклад в развитие сетевой архитектуры и потенциал переноса в 6G.

Результаты исследования: результаты показывают, что 5G-Advanced не следует рассматривать только как очередное улучшение существующей сети 5G. Более корректно определять его как переходный технологический слой, в котором одновременно выполняются три взаимосвязанные функции: повышение зрелости уже развернутых сетей, расширение набора промышленных и массовых сценариев применения, а также проверка решений, потенциально необходимых для 6G. Установлено, что наибольшую переходную значимость имеют направления, связанные с внедрением искусственного интеллекта в радиодоступ и управление сетью, развитием massive MIMO и многоточечной передачи, повышением точности позиционирования, поддержкой негеостационарных и воздушных сегментов, энергоэффективностью, расширенной работой с устройствами пониженной сложности, интегрированным зондированием и коммуникациями, а также устойчивым сетевым расслоением. Предложенная модель позволяет отделить функции, обеспечивающие краткосрочный коммерческий эффект, от функций, создающих архитектурную основу для 6G.

Научная новизна заключается в представлении 5G-Advanced как формализованного промежуточного слоя эволюции, а не как простой совокупности улучшений 5G. Предложена структурная модель оценки стандартных направлений 5G-Advanced по их вкладу в текущую эксплуатационную эффективность, архитектурную преемственность и подготовку к IMT-2030.

Введение

Развитие мобильных сетей после завершения базовой фазы 5G сопровождается изменением самой логики стандартизации. Если первые релизы 5G были направлены преимущественно на создание единой платформы для широкополосного доступа, низкой задержки, массовых машинных подключений и начальной поддержки вертикальных отраслей, то 5G-Advanced ориентирован на более сложную задачу: повысить практическую отдачу от уже созданной инфраструктуры и одновременно подготовить технологические элементы, которые будут востребованы в будущих сетях 6G. Поэтому 5G-Advanced нельзя ограниченно трактовать как «улучшенный 5G». В инженерном смысле это промежуточный этап стандартизации,

на котором проверяются архитектурные, радиотехнические и алгоритмические решения для следующего поколения сетей связи.

Актуальность темы определяется несколькими обстоятельствами. Во первых, коммерческое внедрение 5G во многих странах показало, что заявленные преимущества пятого поколения не реализуются автоматически после установки нового радиодоступа. Для достижения устойчивого эффекта необходимы зрелая автономная архитектура 5G Core, развитые механизмы управления качеством обслуживания, поддержка сетевого расслоения, эффективное использование спектра, снижение энергопотребления и адаптация сети к неоднородным классам устройств. Во-вторых, запрос на новые сервисы становится более сложным: расширенная

¹ Горохов Александр Владимирович, научный сотрудник, Военная академия связи. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sanya.gorokhov.97@mail.ru

² Николаева Полина Арсеновна, младший научный сотрудник, Военная академия связи. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: panicolaeva@mail.ru

реальность, промышленный интернет вещей, беспилотные платформы, интеллектуальный транспорт, спутниково наземная связность, высокоточное позиционирование и распределенные вычисления требуют не только увеличения скорости передачи, но и повышения предсказуемости, надежности и управляемости сети. В-третьих, к 6G предъявляются ожидания, которые невозможно удовлетворить одномоментным переходом от 5G к новой радиосистеме. Для этого необходим длительный переходный этап, где часть решений проходит апробацию в рамках 5G-Advanced.

В научно-технической литературе 5G-Advanced часто рассматривается как начало второй фазы 5G и как мост к 6G [1, 2]. При этом основная проблема состоит в том, что отдельные направления стандартизации анализируются разрозненно: отдельно рассматриваются искусственный интеллект в радиодоступе, отдельно massive MIMO, отдельно негеостационарные сети, отдельно интегрированное зондирование и отдельно энергосбережение. Такой подход полезен для изучения отдельных технологий, но недостаточен для ответа на вопрос, какие именно функции 5G-Advanced имеют переходное значение для 6G и по каким признакам это значение может быть оценено.

Постановка задачи. Сформировать целостную модель оценки 5G-Advanced как промежуточного этапа эволюции. Для этого необходимо определить основные технологические направления 5G-Advanced, установить их связь с будущими требованиями 6G, выделить признаки переходности и показать, какие элементы стандартизации имеют преимущественно краткосрочный эксплуатационный эффект, а какие формируют архитектурную и методическую базу для сетей IMT 2030.

Обзор связанных работ

Первые публикации, посвященные 5G-Advanced, фиксируют его связь с 3GPP Release 18 и подчеркивают, что данный релиз является не точечной модернизацией, а началом новой фазы развития 5G [1]. В этих работах отмечается расширение функциональных возможностей радиодоступа, развитие вертикальных сценариев, внедрение методов искусственного интеллекта и машинного обучения, а также повышение гибкости сетевого управления. Значимость Release 18 состоит в том, что он переводит многие исследовательские направления в область стандартизируемых функций, пригодных для промышленного внедрения.

Комплексный анализ эволюции 5G-Advanced в направлении 6G представлен в работах, где

рассматриваются прошлые, текущие и перспективные этапы развития мобильных сетей [2]. В них подчеркивается, что 5G-Advanced строится на базе Release 15, Release 16 и Release 17, но вводит более широкий набор функций, связанных с MIMO, позиционированием, расширенной реальностью, sidelink, негеостационарными сетями, беспилотными системами, искусственным интеллектом и энергоэффективностью. Такая постановка позволяет рассматривать 5G-Advanced не только как развитие радиоинтерфейса, но и как переход к более интеллектуальной и сервисно-ориентированной сети.

Отдельное направление исследований связано с искусственным интеллектом и машинным обучением в 5G-Advanced [3]. В отличие от ранних подходов, где AI/ML рассматривались как внешние инструменты оптимизации сети, в 5G-Advanced они начинают входить в контур стандартизации. Это имеет принципиальное значение для 6G, поскольку сети шестого поколения обычно описываются как интеллектуальные, адаптивные и самонастраивающиеся. Следовательно, 5G-Advanced выполняет роль практической среды для проверки того, какие AI/ML-функции могут быть стандартизированы без потери воспроизводимости, совместимости и управляемости.

Существенное место в развитии 5G-Advanced занимает massive MIMO и дальнейшая эволюция многоточечной передачи [4]. Для 5G эти технологии являются средством увеличения спектральной эффективности и улучшения покрытия, но в переходе к 6G они приобретают дополнительное значение. Будущие сети предполагают более плотное использование распределенных антенных систем, гибридных схем формирования луча, адаптивного управления пространственными ресурсами и тесной интеграции радиодоступа с вычислительными механизмами. Поэтому развитие MIMO в Release 18 и последующих релизах может рассматриваться как важнейший элемент радиотехнической преемственности.

Параллельно эволюционирует концепция 6G как всеобъемлющей интеллектуальной сети, в которой связь трансформируется из услуги передачи данных в базовую инфраструктуру для цифровых, физических и киберфизических объектов [5]. Данный подход подразумевает, что промежуточные стандарты должны обеспечивать не только высокую пропускную способность, но и взаимодействие с сенсорными системами, распределенными вычислениями, автономными устройствами и пространственно распределенными сервисами. В этом контексте 5G-Advanced представляет собой этап накопления эксплуатационного опыта, необходимого для последующего перехода к IMT 2030.

Исследования, касающиеся видения ITU для 6G, указывают на необходимость поддержки будущими системами расширенных сценариев, включая интегрированное зондирование и связь (ISAC), сверхнадежные сервисы с низкой задержкой, повсеместную связность, интеллектуальные приложения и устойчивую энергетическую модель [6]. Эти направления коррелируют с функциями, разрабатываемыми в рамках 5G-Advanced. Важность 5G-Advanced заключается в возможности верификации реализуемости отдельных требований IMT-2030 до полного перехода к новой системе радиодоступа.

Интегрированное зондирование и коммуникации играют ключевую роль [7]. В 5G эта область еще не является широко распространенной эксплуатационной функцией, однако для 6G она рассматривается как один из определяющих сценариев. Если сеть должна не только передавать данные, но и воспринимать окружающую среду, то требования к радиосигналам, канальным моделям, синхронизации, обработке отражений, безопасности и конфиденциальности существенно усложняются. Таким образом, исследование ISAC в контексте 5G-Advanced имеет значение как подготовка к принципиально новому классу сетевых возможностей.

Перспективные интеллектуальные радиосреды, включая реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (RIS), также рассматриваются как одно из направлений развития 6G [8]. Однако их массовое внедрение требует совместимости с существующей радиоинфраструктурой, адекватных моделей управления и апробированных сценариев применения. 5G-Advanced в данном случае выступает не столько как конечная среда для внедрения RIS, сколько как этап подготовки сетевой архитектуры к более гибкому управлению распространением радиосигнала.

В работах по 6G IoT отмечается, что будущие сети должны поддерживать не только массовое количество устройств, но и интеллектуальную обработку данных, взаимодействие с беспилотными системами, промышленными объектами, спутниковыми сегментами и критически важными сервисами [9]. Для 5G-Advanced это означает необходимость развития RedCap, энергоэффективных профилей устройств, механизмов низкого энергопотребления, расширенного позиционирования и устойчивой поддержки вертикальных сценариев. Связь между 5G-Advanced и 6G проявляется именно в том, что устройства и сервисы будущего не возникают в момент утверждения нового поколения, а постепенно формируются в переходной архитектуре.

Наконец, вопросы безопасности и конфиденциальности для 6G требуют особого внимания [10]. Чем выше степень интеллектуализации сети, тем больше зависимость от данных, моделей машинного обучения, распределенных вычислений и программно определяемых функций. Это создает новые угрозы: атаки на обучающие выборки, подмена контекста, манипуляция сетевыми политиками, нарушение изоляции сетевых срезов, компрометация пользовательской телеметрии и уязвимости в цепочке управления радиоресурсами. Поэтому 5G-Advanced должен рассматриваться как этап, на котором необходимо заранее проверять не только функциональные возможности, но и защитные механизмы будущей сети.

Методика и формализованное решение задачи

Для оценки стандартов 5G-Advanced как промежуточного этапа эволюции от 5G к 6G в работе предлагается воспроизводимый текстовый метод качественной оценки. Метод не использует численные расчеты и формулы, однако задает последовательные правила анализа, позволяющие одинаково применять его к различным направлениям Release 18, Release 19 и ранних направлений Release 20.

Объектом оценки выступают ключевые технологические направления 5G-Advanced, отражающие развитие радиодоступа, сетевой архитектуры, интеллектуального управления, энергоэффективности, поддержки вертикальных сервисов и подготовки к IMT-2030. Каждое направление оценивается по трем критериям: эксплуатационная зрелость, архитектурная преемственность и инновационная переходность.

Критерий «эксплуатационная зрелость» отражает степень готовности направления к практическому использованию в существующих или ближайших сетях 5G-Advanced. Низкая оценка присваивается в том случае, если направление находится преимущественно на уровне исследований, требует значительной перестройки инфраструктуры и не имеет устойчивых сценариев внедрения. Средняя оценка присваивается, если направление уже включено в повестку стандартизации, имеет ограниченные сценарии применения, но требует дальнейшей апробации в сетях операторского класса. Высокая оценка присваивается, если направление опирается на уже применяемые механизмы 5G, может быть внедрено эволюционно и дает понятный эксплуатационный эффект: повышение покрытия, устойчивости соединения, энергоэффективности, качества обслуживания или управляемости сети.

Критерий «архитектурная преемственность» характеризует способность направления сохранять совместимость с существующей 5G-архитектурой и одновременно быть перенесенным в будущую 6G-среду. Низкая оценка присваивается, если реализация направления требует принципиально новой сетевой архитектуры и слабо связана с текущими механизмами 5G. Средняя оценка присваивается, если направление может быть частично реализовано в рамках 5G-Advanced, но для полноценного раскрытия потенциала требует новых интерфейсов, моделей управления или более глубокой интеграции с вычислительной инфраструктурой. Высокая оценка присваивается, если направление естественно продолжает функции 5G, может развиваться в рамках Release 18–20 и формирует основу для последующего переноса в 6G без полного разрыва архитектурной логики.

Критерий «инновационная переходность» показывает, насколько направление способствует подготовке к качественно новым возможностям 6G. Низкая оценка означает, что направление преимущественно улучшает уже известные функции 5G и не меняет принципов построения сети. Средняя оценка означает, что направление расширяет функциональность 5G-Advanced и может быть использовано в отдельных сценариях 6G, но не является системообразующим. Высокая оценка означает, что направление формирует принципиально важный задел для 6G: интеллектуальное управление, интеграцию связи и зондирования, пространственно распределенную инфраструктуру, энергоосознанную архитектуру, новые классы устройств или сетевую автоматизацию.

Последовательность применения метода включает четыре этапа. На первом этапе выделяется технологическое направление 5G-Advanced и определяется его связь с Release 18, Release 19 или ранними направлениями Release 20. На втором этапе направление оценивается по критерию эксплуатационной зрелости с учетом возможности внедрения в существующих сетях. На третьем этапе определяется архитектурная преемственность, то есть способность направления быть частью перехода от 5G-Advanced к 6G. На четвертом этапе устанавливается инновационная переходность, то есть вклад направления в формирование будущих возможностей IMT-2030. Итоговая интерпретация строится не как численная сумма, а как качественный профиль направления. Если направление имеет высокую эксплуатационную зрелость, но низкую инновационную переходность, оно рассматривается как инструмент

текущего улучшения 5G. Если направление имеет среднюю эксплуатационную зрелость, но высокую архитектурную преемственность и высокую инновационную переходность, оно рассматривается как ключевой элемент подготовки к 6G.

Применение метода к ключевым направлениям 5G-Advanced показывает следующие результаты:

Первое направление: развитие massive MIMO, многоточечной передачи и усовершенствованного управления лучами. Эксплуатационная зрелость данного направления оценивается как высокая, поскольку MIMO является одним из базовых механизмов 5G NR, а его развитие в Release 18 связано с повышением спектральной эффективности, улучшением покрытия и устойчивости соединения. Архитектурная преемственность также оценивается как высокая, так как пространственная обработка сигнала сохранит значение в будущих сетях 6G. Инновационная переходность оценивается как средняя или высокая: само направление не является новым для 6G, но его развитие создает основу для распределенных антенных систем, более точного управления радиоресурсами и интеллектуального формирования радиосреды.

Второе направление: AI/ML в радиодоступе и управлении RAN. Эксплуатационная зрелость оценивается как средняя, поскольку AI/ML уже включается в повестку 5G-Advanced, но требует проверки устойчивости моделей, качества обучающих данных, совместимости оборудования и доверенности принимаемых решений. Архитектурная преемственность оценивается как высокая, так как будущая 6G-архитектура предполагает более глубокую автоматизацию и самонастройку сети. Инновационная переходность оценивается как высокая, поскольку AI/ML переводит сеть от статического управления к адаптивному, контекстно-зависимому и предиктивному управлению ресурсами.

Третье направление: поддержка негеостационарных сетей, воздушных сегментов и спутниково-наземной связности. Эксплуатационная зрелость оценивается как средняя, поскольку соответствующие механизмы уже развиваются в 5G-Advanced, но их массовое внедрение зависит от доступности спутниковых группировок, терминалов, частотного регулирования и устойчивых моделей роуминга. Архитектурная преемственность оценивается как высокая, поскольку 6G предполагает переход к пространственно распределенной инфраструктуре, объединяющей наземные, воздушные и космические сегменты. Инновационная переходность также

оценивается как высокая, так как данное направление изменяет представление о сети как о преимущественно наземной сотовой системе.

Четвертое направление: интегрированное зондирование и коммуникации. Эксплуатационная зрелость оценивается как низкая или средняя, поскольку ISAC еще не является массовой функцией операторских сетей и требует решения задач синхронизации, обработки отраженных сигналов, электромагнитной совместимости и защиты данных. Архитектурная преемственность оценивается как средняя, так как отдельные элементы могут быть апробированы в 5G-Advanced, но полноценное раскрытие ISAC ожидается уже в 6G. Инновационная переходность оценивается как высокая, поскольку ISAC принципиально расширяет назначение сети: она становится не только средством передачи данных, но и инструментом восприятия физической среды.

Пятое направление: сетевое расслоение, поддержка вертикальных сервисов и гарантированного качества обслуживания. Эксплуатационная зрелость оценивается как высокая, поскольку Network slicing уже является важной частью 5G-архитектуры и получает дальнейшее развитие в 5G-Advanced. Архитектурная преемственность оценивается как высокая, так как будущие 6G-сервисы будут еще более неоднородными и потребуют изолированных логических сетей с различными требованиями к задержке, надежности, безопасности и пропускной способности. Инновационная переходность оценивается как средняя или высокая: само сетевое расслоение уже известно, но его развитие в сторону автоматизированного, интеллектуального и междоменного управления будет иметь ключевое значение для 6G.

Шестое направление: энергоэффективность и энергоосознанное управление сетью. Эксплуатационная зрелость оценивается как средняя или высокая, поскольку энергосберегающие механизмы могут внедряться в существующую инфраструктуру, но их эффективность зависит от режима нагрузки, плотности сети, возможностей оборудования и качества алгоритмов управления. Архитектурная преемственность оценивается как высокая, поскольку энергопотребление становится одним из определяющих ограничений будущих сетей. Инновационная переходность также оценивается как высокая, так как 6G потребует перехода от локального энергосбережения отдельных базовых станций к целостной энергоосознанной архитектуре, охватывающей радиодоступ, транспорт, ядро сети, граничные вычисления и пользовательские устройства.

Седьмое направление: устройства пониженной сложности, RedCap, Ambient IoT и массовые киберфизические подключения. Эксплуатационная зрелость оценивается как средняя, поскольку часть функций уже развивается в рамках 5G-Advanced, однако их массовое применение зависит от стоимости устройств, энергопотребления, сценариев промышленного внедрения и устойчивости радиопокрытия. Архитектурная преемственность оценивается как высокая, так как 6G будет ориентирован на массовое подключение объектов, сенсоров, исполнительных устройств и автономных платформ. Инновационная переходность оценивается как высокая, поскольку данное направление формирует основу для будущей сети, обслуживающей не только абонентов, но и распределенную среду киберфизических объектов.

Проведенное применение метода показывает, что направления 5G-Advanced имеют различный профиль переходности. Massive MIMO, сетевое расслоение и повышение энергоэффективности обладают высокой эксплуатационной зрелостью и могут рассматриваться как ближайшие инструменты развития сетей. AI/ML, ISAC, NTN и Ambient IoT обладают более выраженной инновационной переходностью, поскольку именно они формируют качественные признаки будущей 6G-архитектуры. Следовательно, 5G-Advanced выполняет двойную функцию: обеспечивает прикладное улучшение текущих сетей и одновременно служит управляемой средой проверки технологий, которые в дальнейшем могут стать базовыми для IMT-2030.

Решение задачи

На основе предложенной модели 5G-Advanced следует определить переходный технологический слой, выполняющий четыре функции:

Первая функция – стабилизационная. Она заключается в доведении 5G до более зрелого эксплуатационного состояния. Это включает улучшение покрытия, повышение устойчивости при мобильности, снижение энергопотребления, поддержку более широкого набора устройств и повышение качества обслуживания. Без этой функции переход к 6G был бы преждевременным, поскольку значительная часть возможностей 5G не получила бы достаточной практической проверки.

Вторая функция – расширяющая. Она выражается в подключении новых сценариев, которые не были полностью раскрыты в ранних вариантах 5G. К ним относятся расширенная реальность, промышленная автоматизация, беспилотные системы, критические сервисы, спутниково-наземная связность, высокоточное

позиционирование и интеллектуальное управление ресурсами. Эти сценарии важны не только сами по себе, но и как прообраз будущих требований 6G.

Третья функция – экспериментально-архитектурная. 5G-Advanced позволяет вводить в стандартизацию элементы, которые в 6G могут стать базовыми. Это относится к AI/ML в радиодоступе, интегрированному зондированию, развитию негеостационарных сетей, управлению распределенными антенными системами, энергетически осознанной архитектуре и более глубокой автоматизации сетевого управления.

Четвертая функция – фильтрующая. Она обусловлена тем, что не все перспективные технологии, обсуждаемые в контексте 6G, обязательно будут интегрированы в будущий стандарт. 5G-Advanced предоставляет возможность дифференцировать инженерно зрелые решения от концептуальных гипотез. В случае, если технология не демонстрирует обеспечения совместимости, управляемости, воспроизводимости и безопасности в рамках переходной архитектуры, ее интеграция в 6G требует тщательной оценки. Эта функция фильтрации имеет особую значимость для таких направлений, как AI-native networking, RIS, ISAC и интеграция наземных и негеостационарных сегментов.

Практическая ценность данного подхода заключается в возможности оценки стандартов 5G-Advanced не на основе простого перечня новых функций, а с учетом их стратегической роли в эволюции сетевой инфраструктуры. Например, развитие технологий MIMO демонстрирует очевидный эксплуатационный эффект. Однако его переходная значимость определяется не исключительно приростом пропускной способности, но и формированием условий для более гибкой пространственной обработки сигнала. Применение AI/ML в RAN имеет значение не только как средство оптимизации текущих процессов, но и как этап подготовки к автономному управлению сетями следующего поколения. Негеостационарные спутниковые сети ценны не только с точки зрения расширения зоны покрытия, но и как фундамент для создания будущей пространственно распределенной инфраструктуры. Повышение энергоэффективности рассматривается не только как фактор снижения операционных затрат, но и как необходимое условие для масштабирования сетей нового поколения.

Результаты и выводы

Исследование предлагает структурную интерпретацию 5G-Advanced как промежуточный этап между сформировавшимся 5G и перспективным 6G. В отличие от упрощенного представления

5G-Advanced как совокупности улучшений Release 18 и Release 19, предложенная модель дифференцирует эти усовершенствования по их эволюционному предназначению. Выявлено, что отдельные функции направлены на текущую эксплуатацию, другие – на расширение диапазона предоставляемых услуг, третьи – на подготовку к новой архитектуре, а четвертые – на апробацию технологий, не готовых к полномасштабному внедрению в коммерческие сети.

Наиболее разработанными и практически востребованными направлениями являются развитие massive MIMO, повышение мобильности, улучшение эффективности радиодоступа, расширение поддержки абонентских устройств и реализация сетевого сегментирования. Эти аспекты непосредственно связаны с текущими потребностями операторов и могут быть внедрены на существующей инфраструктурной базе. Для 6G их значимость определяется тем, что они формируют преемственный фундамент для создания более плотных, адаптивных и программно управляемых сетей.

Функции искусственного интеллекта и машинного обучения (AI/ML), интегрированное зондирование и коммуникации, негеостационарные сети, энергоэффективное управление и интеллектуальные радиосреды обладают высоким переходным потенциалом. Несмотря на то, что их текущая операционная зрелость может уступать традиционным усовершенствованиям радиодоступа, именно эти направления определяют качественное отличие будущих 6G-систем. Следовательно, оценка 5G-Advanced должна основываться не только на готовности технологии к немедленному внедрению, но и на способности трансформировать архитектурные принципы построения сети.

Выявлено, что 5G-Advanced функционирует как технологический буфер. С одной стороны, он предоставляет операторам и производителям оборудования возможность внедрять новые функции, не дожидаясь полного завершения стандартизации 6G. С другой стороны, он минимизирует риск преждевременного перехода к не апробированным решениям, поскольку перспективные функции вводятся в контролируемой среде. Эта буферная функция имеет критическое значение для отраслей, где надежность, совместимость и долговечность оборудования имеют преимущество над демонстрационными пиковыми характеристиками.

Полученные данные также свидетельствуют о том, что развитие 5G-Advanced требует оценки не только на физическом уровне. Хотя радиointерфейс сохраняет свою ключевую роль, переход к 6G определяется интеграцией различных

уровней: радиодоступа, ядра сети, транспортной инфраструктуры, управления услугами, безопасности, энергопотребления, граничных вычислений и данных для интеллектуального управления. Следовательно, академический анализ 5G-Advanced должен носить межуровневый характер.

Предложенная модель позволяет преодолеть распространенное упрощенное представление, согласно которому 5G-Advanced описывается исключительно через увеличение скорости, снижение задержки или расширение полосы пропускания. Хотя эти показатели имеют значение, они не отражают фундаментальную сущность перехода к 6G. Более важным представляется вопрос о трансформации сети в интеллектуальную, контекстно-зависимую, энергоэффективную, распределенную систему, способную обслуживать гетерогенные классы сервисов.

Транзитный характер 5G-Advanced проявляется в его способности сохранять совместимость с существующей 5G-инфраструктурой, одновременно включает в себя элементы будущей архитектуры. Это принципиальное отличие от ранних фаз 5G, основной целью которых было формирование новой радиосистемы и реализация базовых сценариев. В контексте 5G-Advanced сеть начинает эволюционировать как управляемая цифровая платформа. В ее рамках значительно возрастает роль данных, моделей, политик управления, сетевых срезов, автоматизации и межуровневой координации.

Особое внимание следует уделить потенциальным рискам. Интеллектуализация сети способствует повышению эффективности, однако формирует зависимость от качества исходных данных и устойчивости используемых моделей. Негеостационарные сегменты расширяют зону покрытия, но усложняют задачи маршрутизации, синхронизации и обеспечения безопасности. Интегрированное зондирование открывает новые возможности для сервисов, но требует проработки вопросов конфиденциальности и обеспечения электромагнитной совместимости. Реконфигурируемые интеллектуальные поверхности (RIS) и интеллектуальные радиосреды обещают управляемое распространение сигнала, но требуют разработки зрелых моделей управления, измерения и сертификации. Таким образом, 5G-Advanced следует рассматривать не только как катализатор перехода к 6G, но и как механизм выявления сопутствующих ограничений.

В практическом отношении предложенная модель применима при планировании модернизации сетевой инфраструктуры. Операторы связи могут оценивать каждое направление

развития не только по текущему коммерческому эффекту, но и по вкладу в формирование будущей архитектуры. Производители оборудования могут использовать эту модель для приоритизации научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Академические учреждения могут применять ее для выбора исследовательских тем, обладающих не только теоретической новизной, но и потенциалом для стандартизации.

Для российских научно-технических исследований данная тема имеет особое значение. Развитие сетей связи связано не только с импортом готового оборудования, но и с подготовкой инженерных кадров, исследованием радиодоступа, моделированием сетевых сценариев, разработкой средств защиты, созданием испытательных стендов и формированием компетенций в области программно определяемых и интеллектуальных сетей. 5G-Advanced в этом отношении является удобной предметной областью: он достаточно близок к существующей практике, но уже содержит направления, которые будут определять будущую 6G-повестку.

Заключение

В работе выполнен системно-технический анализ стандартов 5G-Advanced как промежуточного этапа эволюции мобильных сетей от 5G к 6G. Показано, что 5G-Advanced не является только набором улучшений пятого поколения, а представляет собой переходный технологический слой, объединяющий эксплуатационное развитие существующей инфраструктуры, расширение вертикальных сервисов и проверку решений, значимых для IMT-2030.

Достигнутый научный эффект заключается в формализации признаков переходности 5G-Advanced. Предложено оценивать стандартные направления по трем критериям: эксплуатационная зрелость, архитектурная преемственность и инновационная переходность. Такой подход позволяет отделять функции краткосрочного улучшения сети от функций, создающих основу для будущей 6G-архитектуры.

Наиболее значимыми направлениями перехода определены AI/ML в радиодоступе и управлении сетью, эволюция massive MIMO, многоточечная передача, расширенное позиционирование, поддержка негеостационарных и воздушных сегментов, энергоэффективность, сетевое расслоение, интегрированное зондирование и коммуникации, а также подготовка к интеллектуальным радиосредам. Эти направления образуют связный технологический контур, в котором 5G-Advanced выполняет роль инженерного моста к 6G.

Практическая достоверность предложенных решений подтверждается сопоставлением модели с актуальными научными публикациями, посвященными Release 18, Release 19, Release 20, AI/ML, MIMO, ISAC, RIS, IoT, безопасности и энергетической эффективности будущих сетей.

Практическое значение работы состоит в возможности использовать предложенную модель при планировании исследований, модернизации сетей связи, разработке учебных материалов и обосновании приоритетов перехода от 5G к 6G.

Литература

1. Lin X. An Overview of 5G Advanced Evolution in 3GPP Release 18 // IEEE Communications Standards Magazine, 2022. – Vol. 6, – No 3. – Pp. 58–65. – URL: <https://arxiv.org/abs/2201.01358> (дата обращения: 14.06.2026).
2. Chen W., Lin X., Lee J., Toskala A., Sun S., Chiasserini C. F., Liu L. 5G-Advanced Towards 6G: Past, Present and Future // arXiv, 2023. – arXiv:2303.07456. – URL: <https://arxiv.org/abs/2303.07456> (дата обращения: 14.06.2026).
3. Lin X. Artificial Intelligence in 3GPP 5G-Advanced: A Survey // arXiv, 2023. – arXiv:2305.05092. – URL: <https://arxiv.org/abs/2305.05092> (дата обращения: 14.06.2026).
4. Jin H., Liu K., Lee G., Farag E. J., Zhang M., Zhu D., Zhang L., Onggosanusi E., Shafi M., Tataria H. Massive MIMO Evolution Towards 3GPP Release 18 // arXiv, 2022. – arXiv:2210.08218. – URL: <https://arxiv.org/abs/2210.08218> (дата обращения: 14.06.2026).
5. Pennanen H., Hänninen T., Tervo O., Tölli A., Latva-aho M. 6G: The Intelligent Network of Everything // arXiv, 2024. – arXiv:2407.09398. – URL: <https://arxiv.org/abs/2407.09398> (дата обращения: 14.06.2026).
6. Liu R., Zhang L., Li R. Y.-N., Di Renzo M. The ITU Vision and Framework for 6G: Scenarios, Capabilities and Enablers // arXiv, 2023. – arXiv:2305.13887. – URL: <https://arxiv.org/abs/2305.13887> (дата обращения: 14.06.2026).
7. Kaushik A., Singh R., Dayarathna S., Senanayake R., Di Renzo M., Dajer M., Ji H., Kim Y., Sciancalepore V., Zappone A., Shin W. Towards Integrated Sensing and Communications for 6G: A Standardization Perspective // arXiv, 2023. – arXiv:2308.01227. – URL: <https://arxiv.org/abs/2308.01227> (дата обращения: 14.06.2026).
8. Basar E., Alexandropoulos G. C., Liu Y., Wu Q., Jin S., Yuen C., Dobre O. A., Schober R. Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G: Emerging Hardware Architectures, Applications, and Open Challenges // arXiv, 2023. – arXiv:2312.16874. – URL: <https://arxiv.org/abs/2312.16874> (дата обращения: 14.06.2026).
9. Nguyen D. C., Ding M., Pathirana P. N., Seneviratne A., Li J., Niyato D., Dobre O. A., Poor H. V. 6G Internet of Things: A Comprehensive Survey // IEEE Internet of Things Journal, 2022. – Vol. 9, – No 1. – P. 359–383. – DOI: 10.1109/JIOT.2021.3103320.
10. Nguyen V.-L., Lin P.-C., Cheng B.-C., Hwang R.-H., Lin Y.-D. Security and Privacy for 6G: A Survey on Prospective Technologies and Challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022. – Vol. 24, – No 4. – Pp. 2384–2428. – DOI: 10.1109/COMST.2021.3108618.

5G-ADVANCED STANDARDS AND PREPARATION FOR 6G: AN INTERMEDIATE STAGE OF EVOLUTION

Gorokhov A. V.³, Nikolaeva P. A.⁴

Keywords: Release 18, Release 19, IMT-2030, radio access, Network slicing, intelligent control, energy efficiency, integrated sensing, non-geostationary infrastructure.

Abstract

The purpose of the work is to develop a scientifically grounded model for evaluating 5G Advanced standards as an intermediate stage in the evolution of mobile networks from the fifth generation to the sixth generation of communication. Particular attention is paid to identifying those functional areas that simultaneously address the practical challenges of 5G development and lay the technological groundwork for future 6G systems.

Research method: application of a systematic and technical analysis of publications on the evolution of 5G-Advanced, the development of 3GPP Release 18, Release 19, and early aspects of Release 20, as well as on promising 6G technologies. A comparative method was used to compare the functional blocks of 5G Advanced based on criteria such as radio interface, network architecture, intelligence, support for vertical services, energy efficiency, and readiness for integration with future IMT-2030 scenarios. To move beyond a purely descriptive approach, this study proposes a formalized qualitative model of the transition layer, in which each group of standard functions is evaluated based on three criteria: current operational impact, contribution to the development of network architecture, and potential for migration to 6G.

Research results: the results show that 5G Advanced should not be viewed merely as another upgrade to the existing 5G network. It is more accurate to define it as a transitional technology layer that simultaneously performs

³ Alexander V. Gorokhov, Researcher, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: sanya.gorokhov.97@mail.ru

⁴ Polina A. Nikolaeva, Junior Researcher, Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: panicolaeva@mail.ru

three interrelated functions: enhancing the maturity of already deployed networks, expanding the range of industrial and mass-market use cases, and testing solutions that may be necessary for 6G. It has been established that the areas of greatest transitional significance are those related to the implementation of artificial intelligence in radio access and network management, the development of massive MIMO and multipoint transmission, improved positioning accuracy, support for non-geostationary and airborne segments, energy efficiency, enhanced support for low-complexity devices, integrated sensing and communications, and sustainable Network slicing. The proposed model makes it possible to distinguish between functions that deliver short-term commercial benefits and those that lay the architectural foundation for 6G.

Scientific novelty: consists of presenting 5G Advanced as a formalized intermediate stage of evolution, rather than simply a collection of 5G enhancements. A structural model is proposed for evaluating standard 5G-Advanced initiatives based on their contribution to current operational efficiency, architectural continuity, and readiness for IMT-2030.

References

1. Lin X. An Overview of 5G Advanced Evolution in 3GPP Release 18 // IEEE Communications Standards Magazine, 2022. – Vol. 6. – No 3. – Pp. 58–65. – URL: <https://arxiv.org/abs/2201.01358> (дата обращения: 14.06.2026).
2. Chen W., Lin X., Lee J., Toskala A., Sun S., Chiasserini C. F., Liu L. 5G-Advanced Towards 6G: Past, Present and Future // arXiv, 2023. – arXiv:2303.07456. – URL: <https://arxiv.org/abs/2303.07456> (дата обращения: 14.06.2026).
3. Lin X. Artificial Intelligence in 3GPP 5G-Advanced: A Survey // arXiv, 2023. – arXiv:2305.05092. – URL: <https://arxiv.org/abs/2305.05092> (дата обращения: 14.06.2026).
4. Jin H., Liu K., Lee G., Farag E. J., Zhang M., Zhu D., Zhang L., Onggosanusi E., Shafi M., Tataria H. Massive MIMO Evolution Towards 3GPP Release 18 // arXiv, 2022. – arXiv:2210.08218. – URL: <https://arxiv.org/abs/2210.08218> (дата обращения: 14.06.2026).
5. Pennanen H., Hänninen T., Tervo O., Tölli A., Latva-aho M. 6G: The Intelligent Network of Everything // arXiv, 2024. – arXiv:2407.09398. – URL: <https://arxiv.org/abs/2407.09398> (дата обращения: 14.06.2026).
6. Liu R., Zhang L., Li R. Y.-N., Di Renzo M. The ITU Vision and Framework for 6G: Scenarios, Capabilities and Enablers // arXiv, 2023. – arXiv:2305.13887. – URL: <https://arxiv.org/abs/2305.13887> (дата обращения: 14.06.2026).
7. Kaushik A., Singh R., Dayarathna S., Senanayake R., Di Renzo M., Dajer M., Ji H., Kim Y., Sciancalepore V., Zappone A., Shin W. Towards Integrated Sensing and Communications for 6G: A Standardization Perspective // arXiv, 2023. – arXiv:2308.01227. – URL: <https://arxiv.org/abs/2308.01227> (дата обращения: 14.06.2026).
8. Basar E., Alexandropoulos G. C., Liu Y., Wu Q., Jin S., Yuen C., Dobre O. A., Schober R. Reconfigurable Intelligent Surfaces for 6G: Emerging Hardware Architectures, Applications, and Open Challenges // arXiv, 2023. – arXiv:2312.16874. – URL: <https://arxiv.org/abs/2312.16874> (дата обращения: 14.06.2026).
9. Nguyen D. C., Ding M., Pathirana P. N., Seneviratne A., Li J., Niyato D., Dobre O. A., Poor H. V. 6G Internet of Things: A Comprehensive Survey // IEEE Internet of Things Journal, 2022. – Vol. 9, No 1. Pp. 359–383. – DOI: 10.1109/JIOT.2021.3103320.
10. Nguyen V.-L., Lin P.-C., Cheng B.-C., Hwang R.-H., Lin Y.-D. Security and Privacy for 6G: A Survey on Prospective Technologies and Challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022. – Vol. 24, – No 4. – Pp. 2384–2428. – DOI: 10.1109/COMST.2021.3108618.

