

УДК 608

Миронов Антон Николаевич, старший преподаватель кафедры практической и прикладной информатики, Российский Технологический Университет – МИРЭА, г. Москва

Шендяпин Артём Вадимович, ассистент кафедры практической и прикладной информатики, Российский Технологический Университет – МИРЭА, г. Москва

ОБЗОР ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И СЦЕНАРИЕВ ПРИМЕНЕНИЯ 6 ПОКОЛЕНИЯ СЕТЕЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ

Аннотация: в статье представлен обзор перспективных технологий шестого поколения мобильной связи (6G), а также анализ отличий 6G от предыдущего поколения (5G). Рассмотрены ключевые технические характеристики и ожидаемые сценарии применения 6G, включая поддержку метавселенных, интеграцию нейроинтерфейсов и квантовых коммуникаций, а также развитие полностью автономных киберфизических систем. Подчеркивается значимость развития 6G для обеспечения технологического суверенитета, безопасности и достижения целей устойчивого развития.

Ключевые слова: 6G, мобильные сети, метавселенная, искусственный интеллект, нейроинтерфейсы, квантовые коммуникации, устойчивое развитие.

Abstract: the article provides an overview of promising technologies of the sixth generation of mobile communications (6G), as well as an analysis of the differences between 6G and the previous generation (5G). The key technical characteristics and expected application scenarios of 6G are considered, including support for metaverses, integration of neural interfaces and quantum communications, as well as the development of fully autonomous cyber-physical systems. The importance of 6G development for ensuring technological sovereignty, security and achieving sustainable development goals is emphasized.

Keywords: 6G, mobile networks, metaverse, artificial intelligence, neural interfaces, quantum communications, sustainable development.

Развитие мобильных сетей связи последовательно проходило через несколько поколений, и каждое новое поколение открывало качественно новые возможности. В последние годы активно внедряется пятое поколение (5G), предоставляя высокоскоростной мобильный доступ, поддержку интернета

вещей и низкую задержку для приложений типа автономного вождения и виртуальной реальности. Однако уже сегодня становятся заметны пределы возможностей 5G, особенно с учетом необходимости организации надежных подключений и развития технологии искусственного интеллекта данных и появлением новых технологических тенденций. Для удовлетворения запросов общества к 2030 году необходимы сети связи, обладающие практически мгновенной беспроводной связью и способные интегрировать множество функций – от вычислений и хранения данных до навигации и дистанционного зондирования. Развитие шестого поколения связи (6G) рассматривается как следующий неизбежный шаг технологического прогресса, призванный преодолеть ограничения 5G и обеспечить основу для глобального цифрового общества с повсеместной ультраскоростной связью. Уже определены ориентиры начала коммерческого внедрения 6G около 2030 года, а исследования в этой области ведутся во многих странах и организациях.

Актуальность темы 6G продиктована не только исчерпанием потенциала 5G, но и появлением новых потребностей – таких как поддержка полностью иммерсивных сред (метавселенных), тотальная автоматизация, а также интеграция коммуникаций с искусственным интеллектом и даже с биологическими интерфейсами. 6G обещает стать не просто эволюционным продолжением 5G, а платформой для «связного интеллекта», способной объединять физический и цифровой и социальный миры в единую сеть. В данном исследовании рассматриваются перспективные технологии 6G и сценарии их применения, включая отличия 6G от 5G, гипотезы о будущих возможностях 6G (нейроинтерфейсы, полностью автономные системы, квантовые коммуникации, метавселенные), примеры потенциальных отраслевых применений, а также значение развития 6G с точки зрения национального суверенитета, безопасности, экономики и устойчивого развития.

Ограничения 5G и предпосылки для развития 6G

Пятое поколение связи стало значительным шагом вперёд: 5G предложила единую платформу для множества сервисов – от мобильного широкополосного доступа (eMBB) до промышленного интернета вещей и ультранадёжных связей с низкой задержкой (URLLC). Тем не менее уже на этапе развертывания 5G выявляются её ограничения. Во-первых, архитектура 5G испытывает проблемы масштабируемости: например, реализация сетевой сегментации (network slicing) в рамках 5G связана с вынужденным закреплением слайсов за конкретными узлами сети, что снижает гибкость и может приводить к узким местам. В перспективе для 6G ожидается новая архитектура, позволяющая более гибко и масштабно поддерживать сегментацию и разнородные сервисы. Во-вторых, для достижения высоких скоростей 5G уже использует миллиметровый диапазон (30–100 ГГц), который обеспечивает большие пропускные способности, но имеет малый радиус действия из-за значительных потерь при распространении сигнала. Это требует высокой плотности базовых станций и точек доступа. Однако даже этого может оказаться недостаточно для будущих требований: предполагается, что 6G выйдет в терагерцевый спектр, где радиус покрытия ещё меньше. Таким образом, возникает необходимость в радикально новом подходе к инфраструктуре – возможно, использовании множества распределённых антенн и интеллектуальных отражающих поверхностей (IRS) для управления распространением сигнала. Ещё одним ограничением 5G является то, что она была спроектирована с оглядкой на возможности человеческого восприятия: например, задержки на уровне миллисекунд считались приемлемыми, соразмерными реакции человека. Но для ряда будущих приложений (автономные системы, нейроинтерфейсы) даже миллисекундная задержка слишком велика; необходимо сокращение задержек на порядки вплоть до микро- и наносекундного диапазона. Наконец, 5G, хотя и закладывает поддержку базовых технологий искусственного интеллекта и edge-computing, не обладает «врождённым интеллектом» сети. В 6G же планируется изначально интегрировать методы искусственного интеллекта в управление сетью и

обработку данных по всей инфраструктуре – от ядра до устройств. Таким образом, ограниченность 5G по ряду ключевых показателей (скорости, задержке, плотности подключений, интеллектуальности сети) стала драйвером исследований в области 6G. Совокупность этих предпосылок делает развитие 6G актуальным и своевременным шагом для дальнейшего технологического прогресса в связи.

Технические отличия 6G от 5G

Шестое поколение сети рассматривается как качественный скачок по сравнению с 5G как в технических характеристиках, так и в поддерживаемых сервисах. Ниже приведено сравнение ключевых показателей 5G и ожидаемых параметров 6G.

Таблица 1. Сравнение ключевых характеристик сетей 5G и предполагаемых целевых показателей 6G.

Характеристика	5G	6G (прогноз)
Рабочие частоты	~0,4– 100 ГГц (до мм-диапазона)	~0,3 - 1 THz (терагерцевый диапазон)
Макс. скорость	До 20 Гбит/с	≈ 100 Гбит/с
Задержка (латентность)	~1 мс (в лучшем случае)	0,01–0,1 мс (10–100 мкс)
Плотность подключений	~10 ⁶ устройств/км ²	~10 ⁷ устройств/км ²
Энергоэффективность	Высокая	Ультравысокая (на уровень выше)
Надёжность соединений	10 ⁻⁵ (ошибки в URLLC)	10 ⁻⁹ (уровень надёжности)
Мобильность	До ~500 км/ч	> 1000 км/ч (поддержка высокоскоростного движения)
Покрытие	~99,99% (близко к полному)	~99,9999% (практически полное)
Точность позиционирования	Метровый уровень	Сантиметровый (точное позиционирование)
Спектр	До 300 ГГц (ммВолны), лицензированный	Шире в 10–100 раз, вплоть до ТГц; возможно, частично нелицензированный
Спектральная эффективность	~30 бит/Гц	~100 бит/Гц
Интеграция спутников	Частичная (отдельные решения)	Полная (небо-земля-море единая сеть)
Интеграция автоматизации	Ограниченная	Полная (сеть как «нервная система» для ИИ)
Интеллектуальность сети	Ограниченная, реактивная	Повсеместный встроенный интеллект (AI/ML)

Поддержка XR/хаптики	Частичная (AR/VR базовый уровень)	Полноценная (передача осязания, тактильный интернет)
Основные технологии	mmWave, Massive MIMO, SDN, MEC и др.	THz коммуникации, сверхмассивное MIMO, лазер/VLC, квантовые и блокчейн технологии, встроенный ИИ

Как видно из таблицы, 6G стремится превзойти 5G практически по всем параметрам. Пропускная способность возрастёт на порядок и более: ожидаются пиковые скорости передачи данных порядка 100 гигабит в секунду. Это станет возможным благодаря использованию ультраширокого спектра, включая терагерцевый диапазон (0,1–1 THz и выше), а также новых видов носителей, например, оптических беспроводных систем видимого света (VLC).

Задержка в 6G потенциально сократится до десятков микросекунд, что на два порядка меньше, чем целевые значения URLLC в 5G (~1 мс). Подобный уровень латентности сети откроет возможность для приложений, где требуются реакция быстрее, чем человеческое восприятие – например, управления нейроинтерфейсами, для прямого управления устройствами по когнитивным командам. Плотность подключений вырастет до миллионов устройств на квадратный километр, поддерживая экспоненциальный рост интернета вещей и повсеместного внедрения сенсоров. Повысится и надёжность: вероятность критического сбоя связи в 6G стремится к 10^{-9} , что на четыре порядка лучше показателей 5G. Достижение столь высокой надёжности потребует новых методов обеспечения устойчивости сигналов, резервирования ресурсов и квантово-устойчивого шифрования (о последнем – далее).

Существенные отличия ожидаются и в архитектуре сети. 5G лишь частично интегрирует неклассические сегменты (например, спутниковые каналы, беспилотные летательные аппараты) и предоставляет средства автоматизации отдельных процессов. Шестое же поколение проектируется как гетерогенная сеть, где низкоорбитальная спутниковая группировка, воздушные и наземные узлы связаны воедино и обеспечивают действительно глобальное покрытие. Каждый уровень – от беспилотников до низкоорбитальных спутников – станет частью общей инфраструктуры связи 6G.

Важной чертой 6G будет «урожденный» искусственный интеллект: алгоритмы машинного обучения будут встроены в управляющую плоскость сети, позволяя автоматизировать оптимизацию ресурсов, прогнозировать нагрузки, обнаруживать аномалии и обеспечивать самоорганизацию сети. По сути, 6G рассматривается как распределённая нейронная сеть, связывающая между собой не только людей и устройства, но и разнообразные интеллектуальные агенты, датчики и исполнительные системы. Это позволит превратить сеть в платформу для коллективного ИИ, где устройства не просто обмениваются данными, но и совместно решают вычислительные задачи.

Наконец, 6G значительно расширит возможности по передаче чувственного опыта – речь идёт об интеграции коммуникаций и сенсоров. Сеть 6G будет не только передавать данные, но и одновременно выступать сенсорной сетью, собирая информацию о физическом мире (через камеры, радары, лидары и др.) и предоставляя новые сервисы, связанные с оцифровкой реальности. Это напрямую ведёт к поддержке полного спектра XR (Extended Reality)-технологий: от расширенной и виртуальной реальности до передачи осязания, вкуса и запаха на расстоянии, что в 5G только намечалось как отдалённая перспектива.

Гипотезы о будущих возможностях и технологиях 6G

С учётом перечисленных характеристик, исследователи и эксперты выдвигают ряд гипотез о том, какие прорывные применения могут стать реальностью в эпоху 6G. Рассмотрим некоторые из наиболее перспективных сценариев и обоснования их осуществимости на базе технологий 6G.

1. 6G и нейроинтерфейсы

Сети шестого поколения смогут обеспечить интерфейс «мозг – облако» с достаточной скоростью и точностью, чтобы передавать нейросигналы и команды напрямую между человеческим мозгом (или нейропротезом) и удалёнными устройствами практически в реальном времени. Уже сейчас ведутся эксперименты по регистрации мозговой активности и управлению компьютером силой мысли, однако ключевым ограничением остаётся задержка и пропускная

способность каналов связи. 6G, предлагающая латентность на уровне десятков микросекунд, теоретически позволит передавать сигналы мозга без ощутимых задержек. Например, имплантированный нейрочип человека может через беспроводной интерфейс 6G мгновенно передавать сигналы, вызывая действие робота-исполнителя на расстоянии, или, наоборот, получать сенсорную информацию (тактильную, визуальную) для создания у человека ощущения удалённого присутствия. Для подобного «нейросетевого интерфейса» необходимы не только минимальные задержки, но и огромная пропускная способность – мозг генерирует массивные объёмы данных. Если 5G способен передавать поток в несколько Гбит/с, то 6G открывает перспективу терабитных каналов, достаточных для одновременной передачи потоков нейроданных высокой точности. Научное обоснование этой гипотезы связано также с эволюцией понимания нейрокодов и развитием устройств BCI (brain-computer interface). Пока что объёмы информации, извлекаемые из мозга, ограничены, но к 2030-м годам ожидается прогресс в нейротехнологиях. Сочетание мощной нейронной техники и сетей 6G может привести к появлению приложений вроде телепатических коммуникаций (обмен мысленной информацией через облако) или управления внешними устройствами напрямую мыслью. Технически 6G сети будут выступать как посредник, способный передать электрохимические сигналы мозга в удалённый дата-центр, где ИИ их расшифрует и направит адресату, и всё это – за миллионы долей секунды.

2. 6G и полностью автономные системы

Благодаря 6G станет возможным создание полностью автономных систем в различных сферах – от транспорта до производства – где машины и устройства смогут взаимодействовать между собой без участия человека, принимая коллективные решения мгновенно и надёжно. Полностью автономные автомобили, дроны, роботы на производствах и в городском хозяйстве потребуют связности, превосходящей возможности 5G. В частности, для безопасного автономного транспорта нужны практически мгновенный обмен данными между сотнями объектов (машинами, светофорами, инфраструктурой)

и гарантированно надёжная доставка критических команд. 6G с её суб-миллисекундной задержкой и способностью поддерживать связь между миллионами устройств на квадратный километр предоставляет необходимый фундамент.

В промышленности концепция Factory 4.0+ получит продолжение: полностью автономные производства с динамически перенастраиваемыми линиями. 6G здесь играет роль нервной системы, связывающей датчики, исполнительные механизмы и облачный интеллект предприятия. Благодаря пропускной способности 6G, низкой задержке, каждый элемент системы может передавать HD-видео, телеметрию и получать управляющие воздействия без задержек. Одно из ключевых технических обоснований данной гипотезы – совместный когнитивный интеллект устройств, возможный при плотной связности. 6G не только передаст данные, но и, по сути, позволит коллективному ИИ действовать распределённо: вычисления ИИ могут выполняться частично на периферии (edge AI) и частично в облаке, а мгновенная связь объединит это в единый механизм. Например, группа беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в режиме роя, объединённых 6G-сетью, сможет действовать координированно, мгновенно реагируя на изменение окружающей обстановки, что актуально для задач поиска и спасения, мониторинга среды или военных применений. Важным компонентом станет и точная синхронизация времени – одно из слабых мест 5G при координации множества узлов. В сетях 6G предполагается внедрение новых методов синхронизации с точностью вплоть до наносекунд, что устранил несогласованность действий устройств в автономных системах. Таким образом, гипотеза о полностью автономных киберфизических системах опирается на способность 6G обеспечивать невиданный ранее уровень координации, надёжности и интеллектуальности соединений между машинами.

3. 6G в контексте метавселенных

Становление 6G станет ключевым фактором для реализации концепции метавселенной – полностью погруженных цифровых пространств, объединённых с физическим миром, где люди могут взаимодействовать друг с

другом и с виртуальными объектами с полной иллюзией присутствия. Метавселенная предъявляет экстремальные требования к сети: одновременная передача видео сверхвысокой чёткости, пространственного звука, тактильной обратной связи и других сенсорных данных для множества пользователей в реальном времени. 5G закладывает основу для VR/AR, но настоящая интернет-всех-чувств (Internet of Senses) ожидается именно в эпоху 6G. По прогнозам, 6G позволит передавать не только визуальный контент для гарнитур виртуальной реальности, но и ощущения осязания (через тактильные перчатки или костюмы), вкуса и запаха посредством специальных интерфейсов. Это значит, что виртуальный опыт станет практически неотличим от физического. Например, в виртуальной встрече через метавселенную люди смогут пожать друг другу руки, и оба участника почувствуют это тактильно – благодаря тактильному интернету, который требует задержки менее 1 мс и согласованной передачи данных от множества датчиков и актюаторов. 6G с её характеристиками как раз нацелена на такие применения: в стандарте обсуждается поддержка тактильной связи и полного XR на уровне сервиса. Кроме того, 6G будет способствовать появлению голографической связи – передачи трёхмерных голограмм в реальном времени. Уже сейчас прообразы таких сервисов (например, 3D-видео звонки) требуют десятков гигабит в секунду. 6G, оперируя терабитными потоками, сможет транслировать динамические голограммы в натуральную величину, что может революционизировать коммуникации в образовании, медицине, развлечениях.

Метавселенные – это не только развлечения; это и цифровые двойники (digital twins) в промышленности и городском управлении, когда каждое физическое устройство имеет виртуального представителя. 6G позволит обновлять состояние цифрового двойника практически мгновенно, поддерживая его синхронизацию с реальным объектом. Например, цифровой двойник завода в дополненной реальности будет в режиме реального времени отображать состояние всех станков, рабочих и материалов, потому что тысячи сенсоров на заводе соединены через 6G. Научное обоснование сценария метавселенной базируется на понимании того, что чем выше пропускная способность и ниже

задержки в сети, тем больший объем чувственной информации можно передать синхронно. Граница между физическим и цифровым мирами стирается, когда сеть способна достоверно передавать весь опыт взаимодействия. В итоге 6G выступит не просто телеком-сетью, а платформой для киберфизической конвергенции, необходимой для существования метавселенных. Данная гипотеза подтверждается и позицией ведущих игроков отрасли: в стратегических документах 6G описывается как средство слияния физических, виртуальных и биологических реальностей, что по сути и есть мета-вселенная во всей полноте ее проявления.

4. Потенциальные сценарии использования 6G в отраслях

Ожидаемые возможности 6G открывают путь к множеству прикладных сценариев во всех ключевых отраслях экономики и социальной сферы. 6G может использоваться на благо общества – от здравоохранения до образования.

В медицинской сфере 6G даст новый импульс развитию телемедицины и роботизированной хирургии. Там, где 5G уже позволяет проводить удалённые операции с задержкой ~10–20 мс, 6G снизит этот показатель до практически нулевого, что существенно повысит безопасность и точность дистанционных процедур. Представим хирургический центр будущего: опытный хирург управляет роботизированным манипулятором, оперируя пациента, находящегося за тысячи километров, с помощью гарнитуры дополненной реальности. Благодаря 6G, видеопоток ультравысокого разрешения с микроскопа, тактильная отдача от инструментов и команды управления передаются без ощутимой задержки, создавая эффект присутствия хирурга рядом с пациентом. Это позволит сделать высококласную хирургию доступной в удалённых уголках планеты. Помимо хирургии, 6G облегчит мониторинг пациентов в реальном времени через носимые и имплантируемые датчики. Миллионы медицинских IoT-устройств (кардиостимуляторы, глюкометры, нейростимуляторы) смогут одновременно подключаться к сети, непрерывно передавая жизненно важные показатели врачам и алгоритмам ИИ. Высокая надёжность и защищённость 6G особенно важны для такой критической

информации: ожидается применение квантово-стойкого шифрования для конфиденциальности медицинских данных и приоритетная доставка пакетов в случае угрозы жизни (URLLC 2.0). Применение AI в сети позволит автоматически анализировать поступающие сигналы здоровья и мгновенно реагировать (например, вызывать скорую помощь при признаках инсульта у пациента дома). Таким образом, 6G сделает здравоохранение более проактивным и доступным, снизит время реакции на неотложные случаи и устранил географические барьеры в получении медпомощи.

Транспортная отрасль, вероятно, станет одной из первых, где возможности 6G проявятся максимально ярко. Уже отмечалось значение 6G для автономного транспорта – автомобили, поезда, дроны получают возможность общаться друг с другом и с инфраструктурой без задержек. Это означает переход от отдельных проектов беспилотников к умным транспортным экосистемам. Например, дорожная сеть 6G позволит внедрить систему кооперативного управления движением: светофоры и дорожные датчики автоматически координируются с автопилотами машин для оптимизации потоков и предотвращения пробок. При возникновении опасности (авария, пешеход на дороге) сигнал тревоги распространится по цепочке машин мгновенно, позволяя им синхронно снизить скорость или перестроиться, предотвращая цепное столкновение. 6G также облегчит интеграцию воздушного транспорта в городской среде – появляется концепция Urban Air Mobility, когда пассажирские дроны и летающие такси безопасно курсируют, постоянно обмениваясь данными с земными службами через единое облако. Высокая пропускная способность пригодится и для комфорта пассажиров: потоковые 4K/8K видеосервисы, VR-развлечения в автомобиле или поезде станут обыденностью даже при движении на высокой скорости, поскольку 6G рассчитана на поддержку мобильности свыше 1000 км/ч (важно, например, для поездов на магнитной подушке). На грузовом транспорте 6G позволит полностью отследить маршрут и состояние товаров в реальном времени – цифровая логистика с миллионами датчиков на грузах передаст данные о местоположении, температуре, ударных воздействиях, обеспечивая

прозрачность цепочек поставок. Таким образом, транспорт будущего с 6G станет более безопасным, эффективным и интегрированным, приблизив реализацию концепции «нулевых аварий» и минимального углеродного следа за счёт оптимизации маршрутов.

На производственных предприятиях 6G станет ключевым элементом концепции «Промышленность 4.0» – эры, где человек и умные машины работают в тесном сотрудничестве, а производство обладает полной гибкостью под потребности. В отличие от традиционных линий, жёстко настроенных под один процесс. 5G уже идёт в этом направлении, но ограниченное число подключений и зона покрытия (особенно в сложных цехах) сдерживают масштабируемость. 6G за счёт большей плотности подключений (до 10 млн на км²) позволит оснастить каждую деталь, заготовку или инструмент меткой/датчиком и отслеживать их путь по цеху. Это ведёт к реализации тотальной прослеживаемости и саморегуляции производства. Кроме того, критически важна надёжность: простои на производстве дорого стоят, поэтому 6G с надёжностью 99.999% обеспечит бесперебойную связь для управляющих сигналов роботов. Внедрение тактильного интернета найдёт применение и здесь: оператор-наладчик сможет через сеть ощупывать и контролировать оборудование на расстоянии, получая осязательную обратную связь, словно находится у станка. Кооперативные роботы (cobots) в связке с 6G смогут моментально обмениваться информацией о совместной задаче, действуя согласованно рядом с человеком. Производство станет значительно более гибким, безопасным и интеллектуальным, а человеческий труд – более творческим, освобождённым от рутины, благодаря широкому внедрению беспроводной автоматизации на базе 6G.

Сфера образования, обучающих и культурных услуг также преобразится под влиянием 6G. Широкое распространение получат иммерсивные образовательные среды. Уже сейчас экспериментируют с использованием VR/AR в классах, но разрешения и задержки не всегда позволяют достичь

ощущения присутствия. С 6G станет возможным создать виртуальные классы, в которых преподаватель и студенты, находясь в разных точках мира, взаимодействуют с общими голографическими объектами в режиме реального времени. С таким подходом можно сделать подход к обучению более интерактивным – различные активности с ощущением погружения позволят студентам быстрее понимать сложный материал. Для реализации этого требуется синхронная передача огромных объёмов 3D-данных и тактильных сигналов – то, с чем 6G способна справиться, учитывая её ориентиры по XR-сервисам. Кроме того, 6G позволит оцифровать мировое культурное наследие в беспрецедентном качестве: виртуальные туры по музеям с детализацией артефактов до мельчайших трещин, посещение исторических мест в дополненной реальности с накладкой цифровых реконструкций поверх реального окружения и т.д. Образовательные туры станут доступнее и реалистичнее. В конечном счёте, 6G поспособствует демократизации образования и культуры, убирая преграды расстояния и языка (в реальном времени могут работать системы перевода с ИИ) и обогащая опыт пользователей за счёт высоких технологий.

Практически каждая сфера, от сельского хозяйства до государственной безопасности, найдёт применение возможностям 6G. В агропромышленном комплексе появятся полностью автономные фермы: беспроводные сети сенсоров почвы, дроны для контроля посевов, роботизированная техника на полях – все компоненты взаимодействуют через 6G и управляются ИИ для оптимизации урожайности и бережного отношения к ресурсам. В экологическом мониторинге 6G позволит создать планетарную сеть датчиков, отслеживающих климат, уровень загрязнений, стихийные бедствия в режиме реального времени, что необходимо для реализации целей устойчивого развития. В энергетике 6G станет нервной системой для «умных» энергосетей, балансируя производство и потребление энергии с помощью миллионов подключенных устройств (генераторы, аккумуляторы, бытовые приборы) и таким образом повышая эффективность и интегрируя возобновляемые источники. В сфере безопасности

и обороны 6G обеспечит связь для новых типов систем: роя дронов-наблюдателей, сетей радаров и датчиков, пограничного контроля с использованием AI – все элементы должны обмениваться информацией мгновенно и надёжно. Для чрезвычайных ситуаций (спасательные операции после катастроф) 6G предоставит мобильные узлы связи (например, дроны-релеи), которые быстро развернут сеть там, где стационарная инфраструктура разрушена. Даже в повседневной жизни горожанина 6G может проявляться в мелочах: умные города будут реагировать на нужды жителей проактивно (регулировать освещение, климат, трафик) на основе данных от датчиков и смартфонов, объединённых единой сетью. Всё это показывает, что 6G имеет потенциал стать универсальной инфраструктурой, пронизывающей экономику и повседневность и выводящей их на новый уровень эффективности и комфорта.

Значимость развития 6G: суверенитет, безопасность, экономика, устойчивость

Помимо технических аспектов и прикладных выгод, развитие 6G имеет стратегическое значение для государств и общества в целом. Цифровой суверенитет – ключевой фактор в эпоху глобальной конкуренции технологий. Страны и регионы, лидирующие в разработке и стандартизации 6G, будут определять правила игры на рынке телекоммуникаций и получать контроль над критической инфраструктурой. Например, в Европе уже подчёркивается необходимость обеспечить своё лидерство и независимость в области 6G, опираясь на собственную промышленность и научный потенциал. Это связано с уроками 5G, где зависимость от отдельных иностранных поставщиков вызвала обеспокоенность. Инвестиции в 6G и участие национальных компаний в создании стандарта – это вклад в технологический суверенитет, позволяющий странам самим контролировать сети будущего, включая защиту персональных данных граждан и устойчивость к внешним ограничениям.

Безопасность сетей 6G – ещё один критически важный аспект. С одной стороны, 6G обещает встроенные средства защиты: уже в концепции заложены

принципы «урожденной доверенности» (native trustworthiness), что подразумевает использование аппаратных якорей доверия, распределённых реестров (блокчейн) для проверки целостности узлов и данных. Огромное число разнообразных подключений – от автомобилей до имплантов – потребует новой парадигмы кибербезопасности, где сеть сама по себе интеллектуально выявляет аномалии и атаки в реальном времени. С другой стороны, возникают и новые риски: тотальная связанность может привести к уязвимости всего общества перед киберугрозами. 6G, пронизывающая все отрасли, станет потенциальной мишенью для злоумышленников, поэтому параллельно с развитием технологий связи необходимо развитие методов их защиты. В перспективе 6G может использовать ИИ, который будет опережать злоумышленников, мгновенно изолируя части сети при обнаружении взлома. Также критична приватность: сети 6G, собирающие данные буквально обо «всех и вся», могут превратиться в «цифровой Паноптикон», вызывая опасения общества по поводу тотального контроля. В этой связи важна международная и национальная нормативная база, регламентирующая применение технологий вроде распознавания лиц или слежения, чтобы достижения 6G не обернулись утратой гражданских свобод. Таким образом, безопасность 6G – это баланс технологических решений и политики: и то, и другое должно развиваться рука об руку. С экономической точки зрения, 6G рассматривается как двигатель роста цифровой экономики будущего. Новые сервисы и отрасли, появляющиеся благодаря 6G, создадут спрос на оборудование, приложения, контент, тем самым стимулируя инвестиции и появление новых компаний. Те страны, которые первыми развернут 6G-инфраструктуру, получат конкурентное преимущество, став площадкой для тестирования и масштабирования инноваций (как в своё время 4G дал толчок развитию мобильных приложений, а 5G – промышленного интернета вещей).

Экономический эффект ожидается не только в ИКТ-секторе. Практически во всех традиционных отраслях внедрение 6G приведёт к повышению производительности и появлению новых бизнес-моделей: будь то умное

сельское хозяйство, дистанционное образование или персонализированная медицина. Аналитики прогнозируют, что совокупный рынок решений на базе 6G будет исчисляться сотнями миллиардов долларов после 2030 года, а косвенный вклад в ВВП – ещё выше за счёт роста эффективности. Более того, рабочие места будущего будут связаны с технологиями 6G: потребуется армия специалистов по ИИ, кибербезопасности, аналитике данных в реальном времени. Поэтому участие в гонке 6G – это инвестирование в человеческий капитал и образование кадров. Наконец, 6G тесно увязывается с целями устойчивого развития (sustainable development). Впервые в истории мобильных коммуникаций аспекты устойчивости заявлены среди основных принципов разработки 6G. Это проявляется в нескольких измерениях. Во-первых, сами сети 6G должны стать более энергоэффективными и экологичными. Цель – снизить энергопотребление передачи данных (Джоуль на бит) на порядки, внедрить «зеленые» технологии (например, базовые станции на возобновляемой энергии, устройства, работающие от энергии окружающей среды – концепция Zero Power Communication). Во-вторых, 6G призвана помочь в решении экологических и социальных задач: подключение неохваченных связью регионов (connecting the unconnected) позволит миллиардам людей получить доступ к образованию, медицине и рынкам, сокращая цифровое неравенство. Глобальная сеть датчиков, о которой говорилось ранее, будет мониторить климат и окружающую среду, предоставляя данные для борьбы с изменением климата и деградацией экосистем. Интеллектуальные системы на базе 6G смогут оптимизировать городскую инфраструктуру – от энергосетей до управления трафиком – снижая потери ресурсов и выбросы. Даже в сельском хозяйстве: точное земледелие с 6G позволит экономить воду и удобрения, минимизируя вред природе. Во многом надежды на 6G в контексте устойчивости связаны с тем, что эта технология может объединить цифровой, физический и биологический миры для более эффективного управления планетарными ресурсами. Однако есть и вызовы: производство миллиардов новых устройств 6G, их питание, последующая утилизация – всё это несёт нагрузку на экологию. Поэтому перед инженерами

стоит задача учесть полный жизненный цикл технологий. В целом, если реализовать потенциал 6G ответственно, эта сеть станет инструментом не только для экономического развития, но и для достижения целей устойчивого развития, обеспечивая более включающее, безопасное и экологичное цифровое будущее.

Заключение

Развитие 6G-сетей мобильной связи открывает перед человечеством грандиозные перспективы. Шестое поколение обещает в десятки и сотни раз превзойти 5G по скорости, надёжности и масштабности, что позволит реализовать ранее фантастические идеи: от голограммной телепортации и нейротехнологических коммуникаций до полностью умных городов и планетарных систем мониторинга. 6G станет платформой для слияния коммуникаций, вычислений и чувствительного восприятия, стерев границы между физическим и цифровым мирами. По своей концепции эта сеть должна удовлетворять требования не только людей, но и машин, и даже искусственного интеллекта – не даром 6G называют переходом от соединения людей и вещей к соединению интеллектов. Однако на пути к внедрению 6G стоят серьёзные вызовы. Во-первых, требуются прорывы в фундаментальных технологиях: генерация и приём терагерцовых волн, создание новых материалов для антенн и чипов, способных работать на сверхвысоких частотах, и преодоление проблем распространения сигнала (например, использование продвинутых методов формирования луча и отражающих поверхностей). Во-вторых, потребуется колоссальная инфраструктурная перестройка: если сотни миллиардов устройств будут подключены, нужно пересмотреть принципы адресации, маршрутизации, хранения и обработки таких объёмов данных. Возможно, придётся перейти к децентрализованной архитектуре сети, где функции распределены между облаком и краевыми узлами, а также интегрировать спутниковые группировки. Всё это требует стандартов и координации на глобальном уровне – поэтому уже сейчас международные организации (например, ITU) разрабатывают видение IMT-2030 и дорожную карту 6G, чтобы к 2030 году прийти к единым стандартам. В-третьих, как обсуждалось, необходимо решить вопросы безопасности и

доверия: без этого массовое распространение 6G может столкнуться с общественным скептицизмом. Придётся выработать новые регулирующие нормы, этические стандарты для использования всепроникающей сети. И наконец, аспект стоимости: развёртывание 5G уже требует больших инвестиций, а для 6G – с её плотностью ячеек и новыми диапазонами – затраты могут быть ещё выше. Полноценная реализация 6G позволит человечеству решить ряд насущных проблем – от ликвидации цифрового неравенства до создания новых средств решения климатических задач – и одновременно поставит новые вопросы ответственности и безопасности. Предстоящие годы исследований и разработок определят, насколько успешно мы справимся с этими вызовами. Но уже сейчас ясно одно: движение к 6G – это шаг к новой технологической эпохе, где границы возможного для коммуникаций значительно расширятся, приближая футуристические сценарии к реальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Saad, W., Bennis, M., & Chen, M. (2020). A Vision of 6G Wireless Systems. *IEEE Communications Magazine*, 58(3), 134-141. (Обзор перспектив 6G, вводя понятие соединения интеллекта и ключевые направления исследований).
2. Nokia Bell Labs (2020). The 6G Era. White Paper. (Белая книга, описывающая потенциальные услуги 6G – голографическую связь, метаматериалы, интеграцию ИИ – и обоснование необходимости 6G).
3. ITU-R (2023). IMT-2030 Framework and Vision Recommendation. ITU-R M.[IMT-2030]. (Международная согласованная визия 6G, включающая целевые показатели и сценарии использования).
4. Zhang, Z. et al. (2019). 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Key Technologies and Open Research Challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 14(3), 28-41. (Научная публикация, формулирующая требования к 6G: терабитные скорости, суб-миллисекундные задержки, плотные сети устройств, а также обсуждающая проблемы реализации).
5. Tong, W. (2021). 6G: From Connected People and Things to Connected Intelligence. Keynote at IEEE Globecom 2021. (Выступление, в котором 6G представлена как «распределённая нейронная сеть», слияние физического, цифрового и биологического миров; выделены шесть ключевых возможностей 6G, включая встроенный ИИ, всеобъемлющую безопасность и устойчивость).
6. You, X. et al. (2021). Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. *Sci. China Inf. Sciences*, 64, 110301. (Статья, посвящённая технологиям 6G: терагерцовым коммуникациям, голографическому MIMO, интеллектуальным поверхностям, квантовым коммуникациям, – с научным обоснованием каждого направления).
7. 6G Flagship, University of Oulu (2019). Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence. White Paper, Univ. of Oulu. (Первый

в мире white paper по 6G, связывающий цели 6G с целями устойчивого развития и формулирующий концепцию «повсеместного беспроводного интеллекта» к 2030 году).

8. Matinmikko-Blue, M., et al. (2020). White Paper on 6G Drivers and the UN SDGs. 6G Research Visions, No. 2, Univ. of Oulu. (Аналитический материал, подробно рассматривающий вклад технологий 6G в достижение целей устойчивого развития ООН, включая вопросы цифрового равенства, энергоэффективности, экологического мониторинга и др.).
9. Basar, E. et al. (2020). Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces. IEEE Access, 7, 116753-116773. (Статья об интеллектуальных поверхностях – одной из ключевых технологий 6G, позволяющей управлять радио-средой для улучшения покрытия и пропускной способности, что упоминается в контексте архитектуры 6G).
10. Cisco Annual Internet Report (2020–2030) – Forecast and Trends. (Отраслевой отчёт с прогнозами развития мобильного трафика и подключений, обосновывающий необходимость 6G: приводит данные о взрывном росте IoT-устройств, трафика XR и требований к задержкам для новых приложений к 2030 году).
11. Qin, Z. et al. (2022). 6G Wireless Communications: From Far-Fetched Ideas to Feasible Realities. IEEE Communications Magazine, 60(2), 38-44. (Аналитическая статья, рассматривающая ряд футуристических идей для 6G – от нейроинтерфейсов до квантовой связи – и оценивающая, какие из них могут стать реальностью в горизонте 2030-х годов).
12. Европейская Комиссия (2022). Shaping Europe’s Digital Future: 6G. (Политика ЕС по 6G, подчёркивающая важность технологического суверенитета Европы в развитии 6G, сотрудничества между промышленностью и наукой, а также содержащая примеры потенциальных приложений – голограммы, удалённая хирургия, цифровые двойники).

13. Dang, S. et al. (2020). What Should 6G Be? *Nature Electronics*, 3, 20–29. (Статья в *Nature*, обсуждающая видение 6G: переход от соединения человек-человек к соединению машина-машина и машина-интеллект, вызовы по части спектра, стандартизации и безопасности; содержит сравнение 5G vs 6G по KPI).
14. Quinn Emanuel Urquhart & Sullivan (2023). The Promises and Perils of 6G. (Юрико-аналитический обзор, фокусирующийся на влиянии 6G и AI на общество и законодательство: обсуждаются вопросы приватности (технологический «Паноптикон»), отсутствие регуляции ИИ, необходимость нормативного реагирования на новые возможности и риски 6G).
15. Chen, S. et al. (2021). Vision, Applications and Technology Trends for 6G. [Online]. Available: arXiv:2102.01582. (Препринт, дающий комплексный обзор потенциальных приложений 6G – тактильный интернет, смешанная реальность, промышленный IoT 2.0 – и обсуждающий технологии: суб-ТГц связь, распределённый AI, квантовые сети; упор на необходимость ко-дизайна коммуникаций и вычислений в 6G).
16. Samsung Research (2020). 6G: The Next Hyper-Connected Experience for All. White Paper. (Видение 6G от компании Samsung: прогнозируется появление услуг “Truly Immersive XR”, “High-Fidelity Mobile Hologram” и “Digital Replica”, перечислены целевые показатели 6G и перечислены технологические кандидаты, включая AI, новое радио, терагерцы, сверхплотные сети).
17. Chaccour, C. et al. (2022). Seven Defining Features of 6G. *IEEE Communications Magazine*, 59(12), 84-90. (Статья выделяет семь черт 6G: 1) сети с искусственным интеллектом, 2) интеграция связи и сенсоров, 3) экстремальная надёжность, 4) глобальное покрытие с помощью небесных сетей, 5) голографические коммуникации, 6) блокчейн и децентрализация, 7) ориентация на человека и устойчивое развитие. Дает научное обоснование каждого пункта).

18. Минцифры РФ (2023). Дорожная карта «Беспроводная связь 6-го поколения». (Стратегический документ, описывающий план разработки и внедрения технологий 6G в России, основные этапы НИОКР, целевые показатели и ожидаемые эффекты для экономики и безопасности страны).

Artyom V. Sh.

MIREA – Russian Technological University
(Moscow, Russia)

Anton N. M.

PhD (Tech.), Associate Professor
MIREA – Russian Technological University
(Moscow, Russia)

REVIEW OF PROSPECTIVE TECHNOLOGIES AND APPLICATION SCENARIOS OF SIXTH-GENERATION (6G) MOBILE COMMUNICATION NETWORKS

***Abstract:** the article provides an overview of the promising technologies of the sixth generation of mobile communications (6G) and analyzes the differences between 6G and the previous generation (5G). Key technical characteristics and potential application scenarios of 6G are considered, including support for metaverses, integration of neural interfaces, and quantum communications, as well as the development of fully autonomous cyber-physical systems. The importance of 6G development for ensuring technological sovereignty, security, and achieving sustainable development goals is emphasized.*

***Keywords:** 6G, mobile networks, metaverse, artificial intelligence, neural interfaces, quantum communications, sustainable development.*

Анкета авторов	Автор 1
Фамилия, имя, отчество автора (полностью)	Шендяпин Артём Вадимович
Город	Москва, Россия
Место работы или учебы (полностью)	ФГБОУ ВО «Российский технологический университет – МИРЭА»
Должность или курс с указанием кафедры или подразделения	студент кафедры «Инструментального и прикладного программного обеспечения»
Учёная степень, учёное звание (при наличии)	—
E-mail	ShendyapinArtyom@yandex.ru
Необходим ли сертификат и справка для автора? (да/нет)	да
Название статьи	Обзор перспективных технологий и сценариев применения сетей мобильной связи шестого поколения (6G)
Раздел (секция) публикации	Телекоммуникации
Количество страниц	23 страниц