

Старт развитию нового поколения мобильной связи 6G уже дан

В.О. Тихвинский, заместитель генерального директора АО НИИТС по инновационным технологиям, профессор, д.э.н.; vtiiir@mail.ru

Е.Е. Девяткин, заместитель директора НТЦ Анализа ЭМС ФГУП НИИР, к.э.н.; edevyatkin@niir.ru

Г.С. Бочечка, руководитель проекта АО «Концерн «Созвездие», к.т.н.; g.bochchka@gmail.com

А.С. Бородин, представитель ПАО «Ростелеком» в Международном союзе электросвязи, к.п.н., к.т.н.; borodin.msk@mail.ru

УДК 621.396.2

Аннотация. Рассмотрены перспективы создания новых технологий мобильной связи поколения 6G. Проанализированы национальные исследовательские проекты, а также деятельность международных организаций связи по разработке облика и тенденций развития технологий и услуг сетей мобильной связи 6G. Выполнен сравнительный анализ деятельности крупнейших мировых поставщиков оборудования по созданию и патентованию решений по основным стандартам технологий мобильной связи. На основании выявленных тенденций сделаны выводы о начале гонки по разработке технологий 6G и важности создания в России интеллектуальной собственности и центров компетенции в области новых технологий мобильной связи.

Ключевые слова: технологии мобильной связи 6G, Фокус-группа МСЭ NET-2030, расширенная реальность XR, самоподдерживающиеся сети SSN, базовые патенты.

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня мы находимся на этапе четвертой промышленной революции («Индустрия 4.0») и третьей волны цифровой трансформации, основу которых образуют информационно-телекоммуникационные технологии (ИКТ) и искусственный интеллект. Начиная с 2000-х годов свыше 100 стран мира (большинство индустриально развитых и многие развивающиеся) приняли решение о построении на базе «Индустрии 4.0» (интернет вещей, большие данные, блокчейн и др.) «цифровой экономики». Под проекты цифровизации были утверждены национальные планы развития ИКТ-сетей [1].

Переход современной экономики в стадию «Индустрии 4.0» предполагает массовое применение в различных сферах киберфизических систем и повсеместную роботизацию производства на основе сетей интернета вещей (IoT) [2].

В качестве телекоммуникационного базиса сетей IoT в эпоху «Индустрии 4.0» в ближайшие годы будут использоваться и уже находящиеся в стадии зрелости сети мобильной связи 4G, и новые бурно развивающиеся сети 5G. Стандартизация фазы 2 сетей 5G (Релиз 16) будет заморожена в марте 2020 г. и окончательно завершена в июне 2020 г. [3, 4].

Действующая модель мирового научно-технического прогресса в отрасли телекоммуникаций предполагает появление в течение ближайших 10 лет следующего поколения мобильной связи — 6G.

Несмотря на то что запуск первых коммерческих се-

тей 5G в мире состоялся только в апреле 2019 г., ведущие страны и компании-разработчики технологий 5G уже объявили о планах по созданию технологий мобильной связи шестого поколения. Эксперты телекоммуникационного рынка предполагают, что развертывание сетей 6G начнется не раньше 2030 г. Как ожидается, эти сети позволят передавать данные на скорости более 1 Тбит/с. Поэтому вопросы создания центров компетенций и научно-технических центров в области сетей 6G уже в ближайшее время приобретут высокую актуальность. И если Россия своевременно начнет формировать научно-технические и технологические компетенции, то она может стать в этом вопросе полноправным игроком мирового рынка.

ЗАРУБЕЖНЫЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ПРОЕКТЫ ТЕХНОЛОГИЙ 6G

Финляндия. Одним из первых проектов по исследованию технологий 6G стал проект 6Genesis, запущенный в 2018 г. на базе Университета Оулу (Финляндия). Кроме этого университета в проекте участвуют компания Nokia, Центр технических исследований Финляндии VTT, Университет Аалто, Университет прикладных наук Оулу и муниципальное учреждение BusinessOulu, отвечающее за реализацию промышленной политики города Оулу.

Программа исследований проекта 6Genesis с финансированием в размере €251 млн рассчитана на 8 лет. Ее

Рисунок 1

Процесс разработки нового поколения системы мобильной связи



целью является исследование технологий беспроводной связи, которые в конечном итоге станут частью сетей 6G.

Китай. В ноябре 2019 г. министерство науки и техники КНР заявило о начале работ по созданию технологий 6G. Планируется, что исследования будут проводиться одновременно двумя группами. Первая будет состоять из представителей профильных министерств, ответственных за поддержку исследований и разработок, а также за внедрение технологий 6G в различных отраслях экономики. Вторая группа, в которую войдут научные институты, телекоммуникационные компании и ученые из 37 китайских университетов, будет заниматься научно-техническими исследованиями и непосредственной разработкой технологий 6G.

Южная Корея. Летом 2019 г. исследования в области технологий для сетей 6G начала южнокорейская компания Samsung Electronics, учредившая специальный исследовательский центр, в который вошли специалисты, участвовавшие в разработке технологий 5G. Компания LG Electronics заключила с Южнокорейским институтом передовых технологий соглашение о сотрудничестве, в рамках которого партнеры намерены проводить научные исследования в области технологий 6G. Соответствующая лаборатория будет располагаться в Тэджоне.

История разработки предыдущих поколений систем мобильной связи показывает, что процесс разработки каждой новой системы занимает до 10 лет и опирается на результаты исследований и разработок систем предыдущих поколений. Процесс разработки системы мобильной связи в упрощенном виде показан на рис. 1.

Практика развития систем мобильной связи показывает, что конкурентные позиции на рынке сетевого и абонентского оборудования занимают те компании, которые активно участвуют во всех этапах разработки новых систем, инвестируя десятки миллиардов долларов в создание новых продуктов. Например, компания Huawei, ведущий производитель сетевого и абонентского оборудования для сетей 5G, за последние 10 лет инвестировала \$40 млрд в исследования и разработки технологий 5G [5], а инвестиции на аналогичные цели одного из лидеров рынка чипсетов для мобильных устройств компании Qualcomm составили за последние три года \$17 млрд [6].

Россия. ФГУП НИИР разработал Проект программы

исследований перспектив развития сетей мобильной связи 6G, в который вошли 19 прикладных НИР, обеспечивающих формирование технологического облика сетей 6G с учетом национальных особенностей развития отрасли и создания цифровой экономики РФ.

На основании анализа деятельности международных организаций связи и альянсов операторов и производителей по тематике 6G ФГУП НИИР сформулировал следующие темы НИР и направления фундаментальных исследований:

1. Исследование и формирование основных показателей будущих сетей 6G на период до 2030 г., которые выходят за рамки существующих и будущих сетей мобильной связи.
2. Анализ перспективных телекоммуникационных услуг для развития цифровой экономики (включая IoT) и сценариев их предоставления на вертикально интегрированных промышленных предприятиях на период до 2030 г.
3. Исследование перспектив использования радиочастотного спектра в полосах частот в диапазоне 92–174,8 ГГц для развития сетей мобильной связи поколения 6G.
4. Разработка и исследование сигнально-кодовых конструкций, повышающих спектральную эффективность радиointерфейса 6G.
5. Исследование необходимости и сценариев применения алгоритмов искусственного интеллекта для повышения эффективности радиointерфейса 6G.
6. Исследование алгоритмов пространственного мультиплексирования для антенных систем сети радиодоступа 6G.
7. Исследование принципов и особенностей построения архитектуры сети мобильной связи 6G.
8. Исследование перспектив развития российской электронной компонентной базы на период до 2030 г. и оценка ее применимости в будущих сетях мобильной связи 6G.

Для создания конкурентных отечественных продуктов будущих сетей 6G уже сегодня в России необходимо принять государственную программу поддержки исследований и разработки технологий 6G с привлечением ведущих научно-исследовательских центров, университетов, разработчиков и производителей телекоммуникационного оборудования, а также наладить науч-

Таблица 1

10 мировых лидеров по патентованию изобретений в области технологий 5G

Компания	Количество заявок на патенты в области технологий 5G	Количество международных заявок (USPTO, EPO или PCT) на патенты в области технологий 5G	Количество зарегистрированных патентов хотя бы в одном патентном ведомстве
Huawei Technologies (Китай)	3325	2379	1337
Samsung Electronics (Южная Корея)	2846	2542	1746
LG Electronics (Южная Корея)	2463	2296	1548
Nokia (включая Alcatel-Lucent) (Финляндия)	2308	2098	1683
ZTE Corporation (Китай)	2204	1654	596
Ericsson (Швеция)	1423	1295	765
Qualcomm (США)	1330	1121	866
Intel Corporation (США)	934	885	171
Sharp Corporation (Япония)	808	677	444
NTT Docomo (Япония)	754	646	351

но-техническую кооперацию с ведущими зарубежными R&D центрами.

ВКЛАД ВЕДУЩИХ МЕЖДУНАРОДНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ СВЯЗИ В ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА 6G

Главной площадкой, на которой будут сделаны первые усилия в области 6G, стал Международный союз электросвязи. Так, на заседании 13-й Исследовательской комиссии Сектора стандартизации МСЭ-Т в июле 2018 г. была учреждена Фокус-группа МСЭ-Т «Технологии для сети 2030» (FG NET-2030). FG NET-2030, как платформа для изучения и развития международных сетевых технологий, будет исследовать будущую архитектуру сетей связи, требования к ним, их возможности и варианты использования на период до 2030 г. и далее. Ключевыми сценариями услуг, по мнению МСЭ, будут голографическая связь (телефон, мультимедиа, вещание), связь с чрезвычайно быстрой реакцией в критических ситуациях и высокоточная связь для вертикальных развивающихся рынков [7]. Это подтверждает ориентацию будущих сетей связи на развитие «Индустрии 4.0».

В рамках FG NET-2030 создано три рабочих группы:

- РГ1. Сценарии использования и требования,
- РГ2. Сетевые услуги и технологии,
- РГ3. Архитектура и инфраструктура,

которые отражают интересы исследователей МСЭ к будущим сетям связи.

В Европейском институте стандартизации электросвязи (ETSI) созданы три индустриальные группы, разрабатывающие спецификации сетей новых поколений мобильной связи: mWT (millimeter Wave Transmission), NFV (Network Funktion Virtualisation) и NGP (Next Generation Protocols). Исследованиями вопросов развития новых сетей занимаются также Инженерный совет Интернета IETF (Internet Engineering Task Force) и Исследовательская группа Интернет-технологий IRTF (Internet Research Task Force). Все эти рабочие группы будут напрямую вовлечены в создание облика сетей 6G.

РОЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПРИ СОЗДАНИИ ПРОДУКТОВ 6G

Анализ патентной активности в области технологий 5G показывает, что ведущие мировые телекоммуникационные вендоры уделяют большое внимание созданию интеллектуальной собственности в области новых технологий связи.

В табл. 1 представлены 10 мировых лидеров по патентованию изобретений в области технологий 5G [8]. Из таблицы видно, что больше всего патентных заявок в области 5G подано компанией Huawei Technologies. Лидером по количеству международных патентных заявок (поданных в Ведомство по патентам и товарным знакам США (USPTO), Европейское патентное ведомство (EPO) или Международную патентную систему (PCT)) и по количеству зарегистрированных патентных семейств хотя бы в одном патентном ведомстве является компания Samsung Electronics.

Высокая патентная активность ведущих мировых производителей связана с тем, что они стремятся получить для своих патентов статус «базовых» (standard essential patents, SEP) и тем самым монополизировать технологии мобильной связи и, как следствие, рынки сетевого и абонентского оборудования.

Термин «базовый патент» означает, что охраняемое данным патентом изобретение вошло в стандарт, т.е. создание продукта, соответствующего данному стандарту, невозможно без разрешения владельца этого патента. Если говорить применительно к системам 5G, то изобретения, охраняемые «базовыми патентами», вошли в спецификации 3GPP, и любая компания, которая захочет сделать оборудование 5G, соответствующее этим спецификациям, должна покупать лицензии на использование технологий, которые защищены патентами SEP.

Если проанализировать представленный в табл. 2 список компаний, наиболее активно участвующих в разработке стандартов 5G [8], то можно увидеть, что больше всего вкладов в спецификации 5G внесли ми-

Таблица 2

10 мировых лидеров по количеству вкладов в стандарты 5G

Компания	Количество сделанных предложений (вкладов) в спецификации 5G	Количество одобренных предложений
Huawei Technologies (Китай)	19473	5855
Ericsson (Швеция)	15072	5114
Nokia (включая Alcatel-Lucent) (Финляндия)	11555	3804
Qualcomm (США)	5994	1994
ZTE Corporation (Китай)	4692	1188
Samsung Electronics (Южная Корея)	4573	1239
Intel Corporation (США)	3656	962
LG Electronics (Южная Корея)	2578	685
China Mobile (Китай)	2567	787
САТТ (Китай)	2562	554

ровые лидеры по количеству патентов в области технологий 5G – Huawei, Ericsson, Nokia, Qualcomm, ZTE, Samsung, Intel и LG. И, как результат, эти же компании являются ведущими производителями инфраструктурного оборудования для сетей мобильной связи (рис. 2.) [9], а также лидерами рынка чипсетов для мобильных устройств (по данным компании Strategy Analytics, в Top5 рынка чипсетов входят компании Qualcomm, HiSilicon (Huawei), MediaTek, Samsung LSI и Intel [10]).

Таким образом, конкурентоспособность производителей продукции для сетей мобильной связи напрямую связана с их инвестициями в исследования и разработки новых технологий. Компаниям, не имеющим собственных R&D центров, сложно конкурировать на рынке из-за необходимости лицензирования множества запатентованных технологий.

КЛЮЧЕВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ПОКАЗАТЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТЕЙ 6G

По мнению западных аналитиков [11–13], можно выделить несколько главных тенденций развития сетей 6G.

1. Рост объема передаваемых данных, потребность в большем объеме спектра.

Многие сценарии использования сетей 6G, включая такие приложения, как расширенная реальность (eXtended Reality, XR) и устройства для непосредственного обмена данными между компьютером и человеческим мозгом (wireless Brain-Computer Interactions, BCI), потребуют в 1000 раз более высоких скоростей передачи данных по сравнению с сетями 5G, что в свою очередь приведет к необходимости выделения дополнительного большого частотного ресурса и освоения более высоких диапазонов частот, вплоть до терагерцовых.

Федеральная комиссия по связи США проголосовала за выделение на 10-летний период лицензий для экспериментов в диапазонах частот от 95 ГГц до 3 ТГц [14].

2. Переход от оценки спектральной эффективности на единицу площади к оценке относительно объема пространства и к учету энергоэффективности.

Сети 6G должны будут работать с наземными и воздушными пользовательскими устройствами, такими

как летательные аппараты. Это потребует оценки эффективности использования спектра не только на единицу площади, но и на единицу объема, а также учета эффективности использования энергии абонентскими устройствами.

3. Появление умных излучающих поверхностей.

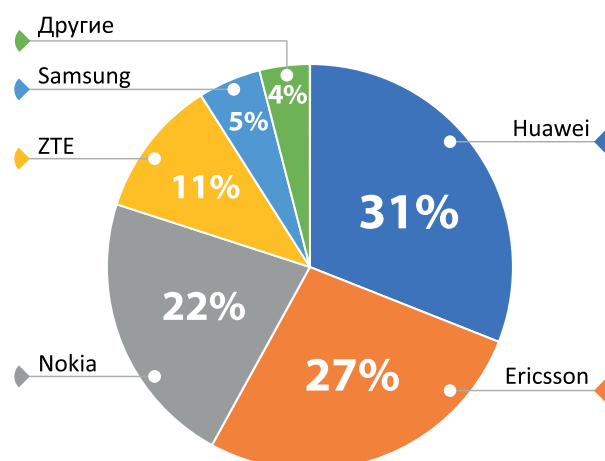
В существующих системах связи для создания сетей радиодоступа используются базовые станции (БС), обеспечивающие радиопокрытия различных размеров и форм. Сети 6G положат начало развитию активных излучающих поверхностей, таких как стены, дороги и даже целые здания. Использование таких больших излучающих поверхностей для беспроводной связи будет способствовать развитию архитектуры сетей 6G.

4. Массовая доступность малых данных.

Революция в области обработки данных в ближайшем будущем продолжится и перейдет от централизованных больших данных к массовым распределенным малым данным. Системы 6G должны обеспечивать передачу как больших централизованных данных, так и огромного количества распределенных малых данных, которые потребуются для предоставления новых услуг.

Рисунок 2

Распределение мирового рынка инфраструктуры для сетей мобильной связи (Источник: IHS Markit 2019)



5. Переход от самоорганизующихся сетей (SON) к самоподдерживающимся сетям Self-Sustaining Networks (SSN).

Сети 6G потребуют смены технологической парадигмы: произойдет переход от классических сетей SON, адаптирующих свои функции к конкретным состояниям среды, к самоподдерживающимся сетям SSN, которые могут постоянно поддерживать свои ключевые показатели эффективности (KPI) в условиях высокой динамики изменения конфигурации и сценариев использования сетей 6G. Базой для создания сетей SSN являются технологии искусственного интеллекта.

6. Конвергенция коммуникаций, вычислений, управления, позиционирования и измерения (Communications, Computing, Control, Localization, and Sensing, 3CLS).

Существующие системы мобильной связи выполняют одну основную функцию — осуществляют беспроводную связь. Сети 6G будут одновременно выполнять такие функции как связь, вычисления, управление, позиционирование и измерения, что необходимо для таких приложений как XR, подключенная робототехника и автономные системы (CRAS), а также системы распределенного реестра (DLT).

7. Конец эпохи смартфонов.

Смартфоны являются основными устройствами сетей 4G и 5G. Тем не менее в последние годы наблюдается рост числа носимых устройств, которые по своим функциям постепенно вытесняют смартфоны. Эта тенденция дополнительно поддерживается такими приложениями, как XR и VCI. Устройства, связанные с этими приложениями, имеют самые разные форм-факторы от интеллектуальных носимых устройств до интегрированных гарнитур и умных имплантов, которые могут принимать прямые сенсорные сигналы от органов чувств человека.

8. Расширение внедрения искусственного интеллекта.

Сочетание сетей 6G и технологий искусственного интеллекта для улучшения характеристик сети также стала неизбежной тенденцией, начиная с сетей 5G+. Интеллектуальность (а точнее «интеллектуальное подключение») станет неотъемлемой характеристикой сетей 6G: интеллектуальными будут все подключенные устройства и сервисы, таким же интеллектуальным должно быть и управление сетью 6G. Функции «Интеллектуального подключения» будут обеспечивать работу и других функций сетей 6G.

Таблица 3

Сравнение требований к системам 5G, 5G+ и 6G

Системы	5G	5G+	6G
Типы приложений	- eMBB; - URLLC; - mMTC	- надежный eMBB; - URLLC; - mMTC; - гибрид (URLLC+eMBB)	- MBRLLC; - mURLLC; - HCS; - MPS
Типы устройств	- смартфоны; - датчики; - приемо-передающее оборудование дронов	- смартфоны; - датчики; - приемо-передающее оборудование дронов; - оборудование XR	- датчики и DLT устройства; - системы CRAS; - оборудование XR и VCI; - умные импланты
Спектральная эффективность с учетом энергоэффективности	10 бит/с/Гц/м ² /Дж	100 бит/с/Гц/м ² /Дж	1000 бит/с/Гц/м ² /Дж
Требования к скорости	20 Гбит/с	100 Гбит/с	1 Тбит/с
Сквозные требования к задержке	5 мс	1 мс	< 1 мс
Задержка обработки на радиосети	100 нс	50 нс	10 нс
Требования к сквозной надежности	99,999%	99,9999%	99,99999%
Диапазон частот	- ниже 6 ГГц; - миллиметровые (MM) волны для фиксированного доступа	- ниже 6 ГГц; - MM-волны для фиксированного доступа в диапазонах 26 и 28 ГГц; - расширение частотных диапазонов в части 52,6–114,25 ГГц	- ниже 6 ГГц; - MM-волны для мобильного доступа; - терагерцевые диапазоны (выше 300 ГГц); - нерадиочастотные диапазоны (оптическая связь VLC и т.д.)
Архитектура	- плотно расположенные БС в диапазонах ниже 6 ГГц с малой зоной покрытия в зоне действия макроБС; - малые соты в диапазонах MM-волн с радиусом действия до 100 м (для фиксированного доступа)	- плотно расположенные БС в диапазонах ниже 6 ГГц с малой зоной покрытия в зоне действия макроБС; - крошечные, плотно расположенные соты в диапазонах MM-волн с радиусом действия менее 100 м	- дальнейшая конвергенция мобильной и фиксированной архитектур сети; - интеллектуальное радиопокрытие без сотовой архитектуры в диапазонах MM-волн для мобильного и фиксированного доступа; - временные точки доступа, обслуживаемые дронами или привязанными аэростатами; - сверхмалые соты в терагерцевых диапазонах
Примечания: MBRLLC – mobile broadband reliable low latency communication (мобильная широкополосная надежная связь с низкой задержкой); mURLLC – massive URLLC (массовая сверхнадежная связь с низкой задержкой); HCS – human-centric services (услуги, ориентированные на человека); MPS – multi-purpose services (универсальные услуги)			

В табл. 3 приведены основные требования к сетям 6G и 5G, 5G+, что позволяет увидеть существенные отличия 6G от сетей 5G и 5G+, а также пути реализации основных тенденций развития сетей 6G, рассмотренных выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успех российских производителей продукции сетей мобильной связи будущего поколения возможен только при своевременном начале формирования компетенций в области технологий 6G и достаточном финансировании научно-исследовательских и инновационных центров, занимающихся исследованиями и разработками новых технологий. Необходимо уже сейчас создавать правовые и институциональные основы, формирующие научно-технические заделы в области технологий 6G на

период до 2030 г.

Существующие организационно-управленческие и организационно-экономические механизмы российских отраслей электроники и связи должны быть в ближайшее время реформированы под цели развития технологий 6G.

Учитывая, что интеллектуальная собственность на технологии 6G играет ключевую роль в будущих доходах поставщиков оборудования и ПО для сетей 6G, ведущие российские производители электроники и средств связи, а также отраслевые вузы должны уделять больше внимания созданию интеллектуальной собственности в области новых технологий связи, и эта деятельность должна быть внесена в приоритетные показатели оценки их работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бутенко, В.В.** Сети 5G/IMT-2020 – основа цифровой трансформации / В.В. Бутенко, В.Э. Веерпалу, Е.Е. Девяткин // Электросвязь. – 2018. – № 12. – С. 4-9.
- 2. Шваб, К.** Четвертая промышленная революция / К. Шваб. – М.: Эксмо-Пресс, 2018. – 230 с.
- 3. Бутенко, В.В.** Сети связи 5G/IMT-2020 и IoT – во все сферы национальной экономики / В.В. Бутенко, Е.Е. Девяткин, Т.А. Суходольская // Электросвязь. – 2018. – № 8. – С. 6-11.
- 4.** Спецификации 3GPP релиза 16. – <https://www.3gpp.org/release-16>.
- 5.** Huawei has invested \$40 billion on 5G R&D. – <https://www.gizchina.com/2019/06/26/huawei-has-invested-40-billion-on-5g-rd/> (дата обращения 01.12.2019).
- 6.** Growing Competition Will Impact Qualcomm Stock in the Medium Term – <https://markets.businessinsider.com/news/stocks/qualcomm-stock-impact-as-competition-grows-1028715958#> (дата обращения 01.12.2019).
- 7.** Network 2030. A Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond. Written by FG-NET-2030. – ITU, 2019. – https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Documents/White_Paper.pdf (дата обращения 01.12.2019).
- 8.** Who is leading the 5G patent race? A patent landscape analysis on declared 5G patents and 5G standards contributions. November 2019. – https://www.iplytics.com/wp-content/uploads/2019/01/Who-Leads-the-5G-Patent-Race_2019.pdf (дата обращения 01.12.2019).
- 9.** Global mobile infrastructure market. IHS Markit. April 3, 2019. – <https://techblog.comsoc.org/category/global-mobile-infrastructure-market/> (дата обращения 01.12.2019).
- 10.** Strategy Analytics – 2Q 2019 Baseband Market Share: Qualcomm and Samsung Emerge as Early 5G Contenders. October 15, 2019. – <https://www.businesswire.com/news/home/20191015005732/en/Strategy-Analytics---2Q-2019-Baseband-Market> (дата обращения 12.12.2019).
- 11. Saad, W.** A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems / W. Saad, M. Bennis, M. Chen. – IEEE Network (Early Access). 15 October 2019. – <https://arxiv.org/abs/1902.10265> (дата обращения 12.12.2019).
- 12. Zhao, Y.** 6G Mobile Communication Network: Vision, Challenges and Key Technologies (in Chinese) / Y. Zhao, G. Yu, H. Xu. – Sci Sin Inform, ISSN 1674-7267, Pre-published, 15 June 2019. – <https://doi.org/10.1360/N112019-00033>.
- 13. Yuan, Y.** Potential Key Technologies for 6G Mobile Communications / Y. Yuan, Y. Zhao, B. Zong, S. Parolari. – <https://arxiv.org/abs/1910.00730> (дата обращения 01.12.2019).
- 14.** FCC Opens Spectrum Horizons for New Services & Technologies. – <https://www.fcc.gov/document/fcc-opens-spectrum-horizons-new-services-technologies> (дата обращения 01.12.2019).

Получено 02.12.19