

Развитие отдельных высокотехнологичных направлений

Белая книга

The background is a dark blue field with a subtle grid of small white squares. A bright, multi-colored light source (yellow, white, and cyan) is positioned on the right side, from which numerous thin, glowing lines radiate outwards. These lines intersect with various semi-transparent geometric shapes, including triangles and polygons, in shades of blue, cyan, and purple. The overall effect is that of a dynamic, futuristic digital space or data visualization.

Развитие отдельных высокотехнологичных направлений

Белая книга



Москва 2022

Редакционная коллегия

Т. Л. Броницкий, К. О. Вишневский, Л. М. Гохберг, Т. С. Зинина, О. В. Кочеткова, С. Г. Приворотская, П. Б. Рудник, Р. С. Тихонов, Ю. В. Туровец, В. В. Федулов, Д. В. Щербинин

Авторский коллектив

А. М. Абакумов, В. Е. Авербах, В. Р. Анпилогов, Г. И. Анциперов, К. С. Белкина, А. В. Bloшенко, Д. А. Богданов, Ю. И. Богданов, С. А. Борисов, Т. Л. Броницкий, А. В. Бурданов, А. А. Васин, А. А. Ведяхин, Н. Н. Веселитская, К. О. Вишневский, А. А. Волошин, О. В. Вольф, П. Е. Воробьев, А. Ю. Галюжин, Т. Р. Гареев, А. В. Гасяк, М. В. Герасимчук, Б. М. Глазков, А. В. Глейм, И. В. Голубкин, А. А. Горбачевич, Л. М. Гохберг, Е. П. Григорьев, А. Б. Деев, А. А. Дементьев, А. Г. Денисов, Р. Р. Димухамедов, А. В. Додулад, В. Н. Донианц, П. С. Дорожкин, К. С. Дорофеев, Н. В. Дорофеев, Е. В. Егоров, М. А. Еременко, В. А. Ефимушкин, Н. С. Ефременкова, А. Ч. Зиангиров, Т. С. Зинина, И. А. Иванов, Ф. И. Иванов, В. В. Ивкова, Е. О. Ильичёв, М. М. Князькин, М. А. Кольченко, М. М. Комаров, Д. А. Корев, И. В. Кот, М. Н. Коцемир, О. В. Кочеткова, Г. Я. Красников, Н. С. Кудряшов, А. Н. Кулагин, Ю. В. Курочкин, Д. В. Лаконцев, Т. В. Ледовских, Д. А. Ляшенко, Ю. Н. Макаров, В. С. Малахова, А. О. Мамчур, Д. Н. Мещерова, А. Ю. Мещерякова, В. А. Моклякова, О. Ф. Мухамедеева, А. А. Назаренко, М. М. Насибулин, А. А. Незнанов, Д. С. Никитин, А. В. Никонов, Е. М. Пажетнов, М. В. Паршин, А. Л. Пивкин, Т. Д. Пичугин, Д. В. Погожев, А. А. Попов, С. Г. Приворотская, С. Ю. Прохоров, И. С. Растегаев, А. А. Ризванов, М. Р. Романенко, П. Б. Рудник, М. В. Рукинов, А. М. Саушкин, В. С. Сафронов, Д. Н. Севастьянов, В. А. Селезнев, М. С. Сквирский, К. В. Смирнов, В. С. Солодовниченко, Е. А. Стрельцова, П. А. Суворов, К. О. Тавакова, Р. С. Тихонов, А. Г. Трубин, Ю. В. Туровец, Ю. М. Урличич, В. В. Федулов, В. В. Хартов, А. В. Хорюшин, П. Г. Черенков, В. И. Шинкарев, Д. В. Щербинин, О. А. Яковлев, О. Я. Яковлев

Содержание

Введение	4
Методические комментарии	7
Ключевые определения	9
Искусственный интеллект	15
Интернет вещей	34
Мобильные сети связи пятого поколения	53
Квантовые вычисления	71
Квантовые коммуникации	90
Технологии распределенных реестров	106
Технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем	122
Технологии создания систем накопления электроэнергии, включая портативные	137
Технологии новых материалов и веществ	150
Перспективные космические системы	167
Заключение	184

Введение

В 2019 г. Президент Российской Федерации поставил перед крупнейшими компаниями амбициозную цель по достижению лидерских позиций на глобальных технологических рынках. В этой связи Правительством Российской Федерации определены 16 высокотехнологич-

ных направлений, а соответствующая работа организована в рамках соглашений о намерениях, заключенных между Правительством Российской Федерации и государственными корпорациями и компаниями с государственным участием (табл. 1).

Табл. 1. Высокотехнологичные направления и ответственные организации

№	Высокотехнологичное направление	Компании-лидеры	Министерства
1	Искусственный интеллект	ПАО «Сбербанк» АО «УК РФПИ»	Минэкономразвития России Минцифры России
2	Мобильные сети связи пятого поколения	ПАО «Ростелеком» Госкорпорация «Ростех»	Минцифры России Минпромторг России
3	Интернет вещей	Госкорпорация «Ростех»	Минцифры России
4	Новые производственные технологии	Госкорпорация «Ростех» Госкорпорация «Росатом»	Минцифры России
5	Перспективные космические системы ¹	Госкорпорация «Роскосмос»	–
6	Новые поколения микроэлектроники и создание электронной компонентной базы	Госкорпорация «Ростех»	Минпромторг России
7	Новые коммуникационные интернет-технологии	ПАО «Ростелеком»	Минцифры России
8	Технологии распределенных реестров	Госкорпорация «Ростех»	Минцифры России
9	Технологии новых материалов и веществ	Госкорпорация «Росатом»	Минпромторг России
10	Технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем	ПАО «Россети»	Минэнерго России
11	Ускоренное развитие генетических технологий	ПАО «НК «Роснефть»	Минобрнауки России
12	Квантовые вычисления	Госкорпорация «Росатом»	Минцифры России
13	Квантовые коммуникации	ОАО «РЖД»	Минцифры России
14	Квантовые сенсоры	Госкорпорация «Ростех»	Минпромторг России
15	Развитие водородной энергетики и декарбонизация промышленности и транспорта на основе природного газа	ПАО «Газпром»	Минэнерго России Минобрнауки России Минэкономразвития России Минпромторг России
16	Технологии создания систем накопления электроэнергии, включая портативные ²	Госкорпорация «Росатом»	Минэнерго России Минпромторг России

¹ Соглашение расторгнуто в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 декабря 2021 г. № 3468-р. Поддержка направления будет осуществляться корпорацией в рамках текущей деятельности.

² Ответственные будут определены после заключения соглашения о намерениях между Правительством Российской Федерации и компанией-лидером.

Соглашения – один из ключевых инструментов планирования и управления в сфере технологического развития. Их реализацию в соответствии с полномочиями обеспечивают заместители Председателя Правительства Российской Федерации, профильные федеральные органы исполнительной власти (Минэкономразвития России, Минцифры России, Минпромторг России, Минэнерго России, Минобрнауки России). Общую координацию осуществляют Первый заместитель Председателя Правительства Российской Федерации и Минэкономразвития России.

В рамках работы по выполнению соглашений по каждому из них реализуется комплексный план мероприятий, увязывающий наиболее эффективные инициативы и проекты развития высокотехнологичного направления в единый цикл – от формирования благоприятных правовых режимов и разработки ключевых технологий до ускоренного внедрения соответствующих продуктов и услуг, их продвижения на внешних рынках (дорожная карта или иной документ реализации – федеральный проект, государственная программа Российской Федерации и др.).

В Белой книге, подготовленной Национальным исследовательским университетом «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ) совместно с Минэкономразвития России, компаниями-лидерами, профильными министерствами и экспертными организациями, представлены десять высокотехнологичных направлений: искусственный интеллект; Интернет вещей; мобильные сети связи пятого поколения (5G); квантовые вычисления; квантовые коммуникации; технологии распределенных реестров; технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем; технологии создания систем накопления электроэнергии, включая портативные; технологии новых материалов и веществ; перспективные космические системы. Большинство из них вошли в первую «волну» упомянутых соглашений о намерениях 2019 года.

Все рассматриваемые высокотехнологичные направления активно развиваются в глобальном масштабе. Об этом свидетельствуют неуклонно увеличивающиеся объемы инвестиций в ис-

следования и разработки, интенсивный рост публикационной и патентной активности и – без преувеличения – бум производства и распространения соответствующих продуктов и услуг, связанных с высокими технологиями, даже в самых консервативных индустриях. Указанные направления – безоговорочные лидеры мировой технологической повестки, без которых немыслима реализация столь масштабных и всеобъемлющих преобразований экономики и общества, как цифровая трансформация, четвертая промышленная революция и др.

Высокотехнологичные направления осваиваются в тесной взаимосвязи, их нельзя рассматривать обособленно (пример – триада «Искусственный интеллект – 5G – Интернет вещей»). Мировая практика показывает, что прорывные инициативы (будь то университетские разработки, стартапы или технологические проекты крупных компаний) набирают достаточный потенциал коммерциализации, только если обогащают и усиливают друг друга, постоянно «перемешиваясь» внутри открытых экосистем – консорциумов, технологических альянсов, платформ, кластеров и т.п. В дальнейшем конвергенция технологий будет лишь усиливаться, приводя к возникновению значимых синергетических эффектов. Немаловажную роль здесь играют открытые архитектуры, интерфейсы и стандарты, обеспечивающие интероперабельность решений различных игроков.

В то же время отдельные технологии, их группы и даже целые направления различаются по уровню технологической готовности и рыночной зрелости (от квантовых вычислений, находящихся на ранней стадии развития, до Интернета вещей, уже сегодня широко распространенного в самых разных отраслях). Это должно получить отражение в тонкой настройке и взаимоувязке инструментов государственной поддержки каждого из высокотехнологичных направлений. Как отмечают эксперты, развитие интеллектуальных технологий требует «гибкого и умного менеджмента». Предстоит в оперативном режиме разработать меры нормативного регулирования и передовые технологические стандарты, создать привлекательные условия для инвестиций бизнеса в новые технологии.

Белая книга открывает серию ежегодных аналитических докладов о развитии высокотехнологичных направлений. В ней приведены оценки достигнутых результатов и перспектив развития высокотехнологичных направлений в мире и в России, представлены повестка исследований и разработок, ключевые технологические решения, систематизированы основные меры государственной поддержки.

При подготовке публикации использованы материалы компаний-лидеров (ПАО «Сбер-

банк», Госкорпорации «Ростех», Госкорпорации «Росатом», ПАО «Ростелеком», ПАО «Россети», ОАО «РЖД», Госкорпорации «Роскосмос»), федеральных органов исполнительной власти (Минцифры России, Минэкономразвития России, Минпромторга России, Минэнерго России), а также ведущих организаций – НИУ ВШЭ, Сколковского института науки и технологий, центров компетенций Национальной технологической инициативы (НТИ) и Платформы НТИ, профильных институтов РАН.

Методические комментарии

В рамках подготовки Белой книги по каждому из рассматриваемых высокотехнологичных направлений проведены следующие исследовательские работы.

Систематизация структуры высокотехнологичных направлений. Для анализа высокотехнологичных направлений необходимо прежде всего четко определить их границы. В связи с этим на первом этапе работы по каждому из рассматриваемых направлений был определен состав относящихся к нему технологий и их групп. Для этого были привлечены ведущие специалисты, в том числе представители компаний-лидеров и экспертных организаций, проведены экспертные обсуждения. Согласованная структура каждого высокотехнологичного направления сформирована с учетом зарубежной практики. В разделах Белой книги она представлена в наглядной форме облака тэгов, что отражает вложенность технологических уровней: крупным шрифтом обозначены группы технологий, более мелким – отдельные технологии. При этом в рамках каждого облака сгруппированы технологии, близкие по функционалу или области применения.

Для объективной количественной оценки масштабов исследовательской и инновационной деятельности по каждому из высокотехнологичных направлений в августе-сентябре 2021 г. выполнены библиометрический анализ и изменение патентной активности.

Библиометрический анализ за 2010–2020 гг. проведен на основе базы данных Scopus. По высокотехнологичным направлениям именно в Scopus индексируется больше публикаций (в том числе российских), чем в других базах данных (например, по искусственному интеллекту – 845,4 тыс. в Scopus против 570 тыс. в Web of Science). Поиск

публикаций, относящихся к определенному высокотехнологичному направлению или группе технологий в его составе, проводился посредством специализированных запросов к базе данных, которые включали ключевые слова, разработанные экспертами в разрезе сформированной структуры высокотехнологичного направления.

Патентный анализ за период с 2010 по 2019 г.¹ проведен с использованием патентной базы PatStat Global. Она содержит 90+ млн патентных документов от большинства патентных ведомств мира, включая крупнейшие – USPTO, EPO, JPO. Поиск и отбор патентных документов по каждому направлению осуществлялся на основе перечней ключевых слов, разработанных экспертами в соответствии со структурой каждого высокотехнологичного направления. Использовались только термины на английском языке, так как все ключевые поля в документах в базе PatStat Global переведены с национальных языков на английский. В отдельных случаях, по согласованию с экспертами, область поиска была ограничена дополнительными критериями – классами Международной патентной классификации (МПК), технологическими областями (в соответствии с Таблицей соответствия технологий, утвержденной Всемирной организацией интеллектуальной собственности).

Построение кривой технологической зрелости. S-образная кривая технологической зрелости – это наглядная форма представления различия групп технологий, относящихся к высокотехнологичному направлению, по стадиям жизненного цикла и уровню готовности к широкому внедрению. Расположение технологий на кривой определено с учетом результатов интеллектуального анализа больших данных², индикаторов публикационной и патентной

¹ Данные за 2020 г. в PatStat Global представлены лишь частично и не учитывались при анализе. Это связано с временным лагом в обновлении информации – общей чертой большинства патентных баз.

² С использованием системы интеллектуального анализа больших данных iFORA, разработанной в Институте статистических исследований и экономики знаний Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (ИСИЭЗ НИУ ВШЭ).

активности, рыночной аналитики, а также экспертных оценок. Каждая технология отнесена к одному из четырех этапов:

- I этап** – зарождение технологии (высокая публикационная активность);
- II этап** – расцвет технологии (рост патентования и объема рыночной аналитики);
- III этап** – зрелость технологии (преобладание рыночной аналитики);
- IV этап** – плато (снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике).

В Белой книге также представлены количественные и качественные оценки достигнутых результатов и перспектив развития высокотехнологичных направлений в мире и в России, предоставленные компаниями-лидерами, федеральными органами исполнительной власти, экспертными организациями, а также соответствующие данные наиболее авторитетных источников, включая международные организации, ведущие исследовательские и аналитические центры, консалтинговые компании.

Ключевые определения

Абонентская станция (абонентское устройство)	пользовательское (оконечное) оборудование, подключаемое к сети подвижной связи
Автоклавное формование полимерных композиционных материалов (ПКМ)	формообразование изделия из полимерного композиционного материала при повышенных температурах и давлении
Аддитивные технологии (АТ)	обобщенное название технологий изготовления изделий по цифровой модели методом послойного добавления материала
Арамидное волокно	синтетические нити из полиамида, имеющие сверхпрочную структуру благодаря особому соединению атомов в молекуле
Безавтоклавное формование ПКМ	формообразование изделия из полимерного композиционного материала при средних температурах и давлении
Блокчейн	одноранговая сеть, основанная на децентрализованной технологии цепочки блоков и принципе равноправия участников. Данные не хранятся на едином сервере, все участники имеют равный уровень доступа и права
Возобновляемые источники энергии (ВИЭ)	возобновляемые источники энергии, эксплуатирующие возобновляемые или практически неисчерпаемые ресурсы, такие как солнечный свет, энергия ветра, потоки воды, приливы, геотермальная энергия и др.
Децентрализованные приложения	приложения, исполняемые в одноранговой сети, состоящей из множества серверов
Инвертор	устройство для преобразования постоянного тока в переменный
Интернет вещей (IoT)	совокупность объединенных в единую сеть устройств или систем, которые осуществляют сбор данных и обмен ими и могут удаленно контролироваться через сеть интернет с помощью программного обеспечения на любом типе компьютеров, смартфонов или через интерфейсы
Искусственный интеллект (ИИ)	комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека. Комплекс технологических решений включает информационно-коммуникационную инфраструктуру, программное обеспечение (в том числе то, в котором используются методы машинного обучения), процессы и сервисы по обработке данных и поиску решений

Квантовая суперпозиция	фундаментальный принцип квантовой механики, согласно которому, если для некоторой квантовой системы допустимы состояния Ψ_1 и Ψ_2 , то допустима и любая их линейная комбинация $\Psi_3 = c_1 \cdot \Psi_1 + c_2 \cdot \Psi_2$; она называется суперпозицией состояний Ψ_1 и Ψ_2 (принцип суперпозиции состояний)
Квантовое программное обеспечение	совокупность программ системы обработки информации и программных документов, предназначенных для использования на устройствах квантовых вычислений
Квантовые коммуникации (КК)	технологии передачи информации, основанные на законах квантовой физики и обеспечивающие принципиально новое качество защищенности информационной инфраструктуры, что критически важно для развития цифровой экономики
Квантовый компьютер (вычислитель)	квантовое вычислительное устройство, основанное на кодировании информации в квантовом состоянии двухуровневой системы – кубита (или многоуровневой системы – кудита). В отличие от классического компьютера, основанного на бинарном коде (т. е. анализирующем информацию, представимую в виде «0» и «1»), такие машины основаны на кодировании информации в квантовом состоянии двухуровневой системы, что позволяет работать не только с состояниями «0» и «1», но и любой их суперпозицией
Квантовый процессор	устройство, предназначенное для кодирования и хранения информации в состояниях квантовых систем, выполнения логических операций и измерений над этими состояниями (с использованием дополнительного оборудования). Обладает следующими характеристиками: число кубитов (эквивалентная размерность пространства логических состояний), точность однокубитных и двухкубитных операций
Квантовый симулятор	устройство для приближенного моделирования квантово-механических систем. Квантовые симуляторы могут быть реализованы различными методами на различных технологических платформах
Компьютерное зрение	технологии искусственного интеллекта, которые находят, отслеживают и классифицируют объекты
Консенсус	решение о включении определенного блока в блокчейн, достижение которого возможно лишь после проверки
Концентраты редкоземельных металлов	смесь природных минералов, содержащая несколько полезных компонентов, результат процесса обогащения руд

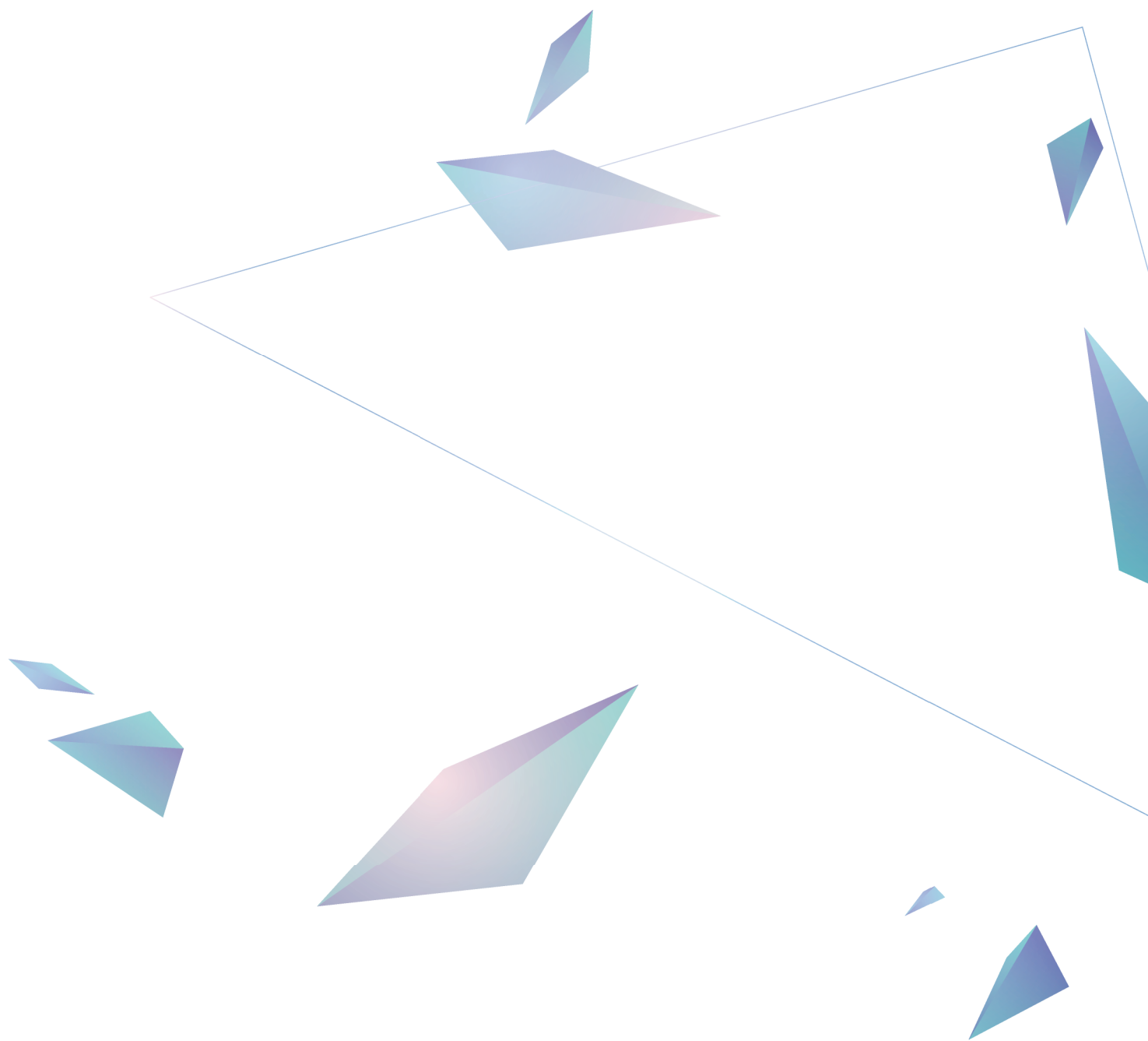
Кубит	элементарная единица квантовой информации. Кубит может быть закодирован в состоянии двухуровневой системы. Различают физические кубиты – реальные квантовые реализации кубитов на одной из физических платформ, как правило страдающие от нежелательной декогеренции, что приводит к ошибкам в вычислениях; и логические кубиты – алгоритмы, реализующие помехозащищенное кодирование квантовой информации в физическом носителе
Магنون	квазичастица, соответствующая элементарному возбуждению системы взаимодействующих спинов
Мобильные сети связи пятого поколения (5G)	технологии беспроводной связи пятого поколения, характеризующиеся высокой пропускной способностью (не менее 10 Гбит/с), надежностью и безопасностью сети, низким уровнем задержки передачи данных (не более одной миллисекунды), что позволяет эффективно использовать большие данные
Облачная платформа для квантовых вычислений	набор инструментов, предназначенных для удаленного запуска и использования квантовых алгоритмов и квантового программного обеспечения
Облачные сервисы	технологии распределенной обработки данных, в которой компьютерные ресурсы и мощности предоставляются пользователю как интернет-сервис
Обогащение руд	совокупность методов разделения минералов по разнице их физических и/или химических свойств
Обработка естественного языка	технологии искусственного интеллекта, направленные на понимание языка и генерацию грамотного текста, а также создание более удобной формы взаимодействия компьютера и человека
Оракулы	инфраструктурные алгоритмы, переводящие внешнюю информацию в формат блокчейна
Перспективные методы и технологии искусственного интеллекта	методы, направленные на создание принципиально новой научно-технической продукции, в том числе в целях разработки универсального (сильного) искусственного интеллекта (автономное решение различных задач, автоматический дизайн физических объектов, автоматическое машинное обучение, алгоритмы решения задач на основе данных с частичной разметкой и (или) незначительных объемов данных, обработка информации на основе новых типов вычислительных систем, интерпретируемая обработка данных и другие методы)
Полимерный композиционный материал (ПКМ)	многокомпонентный материал, изготовленный из двух или более компонентов с различными физическими и/или химическими свойствами, с характеристиками, отличными от характеристик исходных компонентов

Поляритон	составная квазичастица, возникающая при взаимодействии фотонов с элементарными возбуждениями среды – оптическими фотонами, экситонами, плазмонами, магнонами и др.
Препрег	композиционный материал-полуфабрикат, листы тканой или нетканой структуры, пропитанные неотвержденными полимерными связующими
Приватная система распределенного реестра	закрытые сети, в которых устанавливаются критерии членства, в соответствии с которыми участники допускаются к управлению узлами и получают доступ к сервисам сети
Промышленный Интернет вещей	сети передачи данных, объединяющие устройства в производственном секторе, оборудованные датчиками и способные взаимодействовать между собой и/или с внешней средой без вмешательства человека
Публичная система распределенного реестра	открытые сети, допуск к участию в которых не ограничен для широкого круга пользователей, статус оператора не закреплен за определенными участниками, а также отсутствуют централизованные инстанции, управляющие правилами сети, ее конфигурацией и выпуском криптографических ключей
Разделенные редкоземельные металлы (РЗМ)	индивидуальные редкоземельные химические элементы с низким содержанием примесей в металлической форме или в виде оксидов
Распознавание и синтез речи	технологии искусственного интеллекта, позволяющие осуществлять перевод речевого сигнала в текстовые данные, а также преобразовывать текст в речевой сигнал
Рафинирование редкоземельных металлов	металлургический процесс очистки металлов от примесей
Реактивная мощность	мощность, которая не была передана в нагрузку, а привела к потерям на нагрев и излучение
Реактопластичное (термопластичное) связующее	синтетический полимер, способный в результате отверждения превращаться в неплавкий и нерастворимый полимер трехмерной структуры
Рекомендательные системы и интеллектуальные системы поддержки принятия решений	технологии искусственного интеллекта, посредством которых процесс выполняется без участия человека, и осуществляется поддержка в принятии решения человеком, а также предсказание объектов и действий, которые будут интересны пользователю
Рециклинг (композитов)	вторичная переработка полимерных композиционных материалов на основе углепластиков в новые продукты, востребованные в различных отраслях промышленности
Сверхпроводимость	фундаментальное физическое явление, при котором в материале отсутствует активное сопротивление при передаче по нему электрического тока

Сеть радиодоступа (Radio Access Network, RAN)	элементы телекоммуникационной сети, обеспечивающие подключение абонентского терминала к этой сети
Силовая электроника	область электроники, связанная с преобразованием, управлением или переключением электрической энергии
Системы накопления электроэнергии	современные электроэнергетические устройства с функцией многократного аккумулирования электрической энергии, способные потреблять и отдавать энергию
Смарт-инвертор	инвертор с интеллектуальной системой управления
Смарт-контракт	самоисполняемый в доверительной среде (созданной с использованием технологии блокчейн) контракт, заключенный напрямую между покупателем и продавцом и записанный в качестве программного кода
Стеклопластик	вид композиционного материала, состоящего из стекловолокнистого наполнителя (стеклянного волокна) и связующего вещества
Термопластичное связующее	полимерный материал, способный обратимо переходить при нагревании в высокоэластичное либо вязкотекучее состояние, а при остывании – обратно в твердое состояние
Технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем	область, которая охватывает целый ряд передовых решений, включая системы накопления энергии, ВИЭ, распределенную генерацию, микроэнергосистемы, интеллектуальные системы управления и защиты, силовую электронику и электротехнику, а также применение новых материалов (композитов) и физических принципов (высокотемпературной сверхпроводимости) для построения линий электропередач
Токен	единица учета, предназначенная для представления цифрового баланса в некотором активе
Токенизация	совокупность инструментов выпуска цифрового актива
Точность (достоверность) операций (Fidelity)	средняя вероятность получения ожидаемого результата при выполнении операции (однокубитной или двухкубитной) на квантовом процессоре
Транзакция	наименьший элемент взаимодействия, который представляет собой обмен информацией между двумя или более пользователями и/или информационными системами
Углепластик	композиционный многослойный материал, представляющий собой полотно из углеродных волокон в оболочке из полимерных смол
Углеродное волокно (УВ)	специализированный прочный материал, состоящий из тонких нитей толщиной 5–10 мкм, сформированных атомами углерода, который получен с помощью термической обработки искусственных или природных органических волокон

Фотон	элементарная частица, квант электромагнитного излучения
Хэш	функция, конвертирующая строку символов большой длины в значение (или ключ) стандартизированной длины, сохраняющее содержание исходных данных
Цифровая платформа	система алгоритмизированных взаимовыгодных взаимоотношений значимого количества независимых участников отрасли экономики (или сферы деятельности) в единой информационной среде, которая приводит к сокращению транзакционных издержек благодаря использованию набора цифровых технологий работы с данными и изменению системы разделения труда
Электронная компонентная база (ЭКБ)	электрорадиоизделия, электронные модули нулевого уровня, представляющие собой совокупность электрически соединенных электрорадиоизделий, образующих функционально и конструктивно законченные сборочные единицы, предназначенные для реализации функций приема, обработки, преобразования, хранения и (или) передачи информации или формирования (преобразования) энергии, выполненные на основе несущих конструкций и обладающие свойствами конструктивной и функциональной взаимозаменяемости (Постановление Правительства Российской Федерации от 24 июля 2021 г. № 1252)
Энергосистема	комплекс взаимосвязанных электроэнергетических предприятий, устройств для передачи и распределения электроэнергии и электроустановок потребителей
Non-Fungible Token (NFT)	вид виртуального актива, который служит закреплением прав на индивидуально-определенный актив в системе блокчейн
Thread	основанная на IPv6 технология ячеистой сети с низким энергопотреблением для продуктов Интернета вещей
Tiny Machine Learning (TinyML)	«крошечное» машинное обучение, которое может быть реализовано в системах с низким энергопотреблением, таких как датчики или микроконтроллеры, в целях выполнения автоматизированных задач
Weightless	набор стандартов открытых беспроводных сетей с низким энергопотреблением для обмена данными между базовой станцией и тысячами компьютеров вокруг нее

Искусственный интеллект



Сокращения

РФПИ	Российский фонд прямых инвестиций
СППР	системы поддержки принятия решений
ЦОД	центр обработки данных
ЭКБ ИИ	электронная компонентная база искусственного интеллекта
5G	мобильные сети связи пятого поколения
AutoML (Automated Machine Learning)	автоматизированное машинное обучение
GAN (Generative Adversarial Network)	генеративно-сопоставительные сети
GPT-3	одна из самых больших в мире генеративных языковых моделей
HPC (High Performance Computing)	высокопроизводительные вычисления
Open Source	открытое программное обеспечение

Искусственный интеллект (ИИ) входит во все сферы жизни. Мы сталкиваемся с ним, когда общаемся с виртуальными помощниками, получаем индивидуальные рекомендации на стриминговых сервисах или ранжированные с учетом наших предпочтений результаты поисковых запросов. ИИ используется в управлении финансами, в том числе при одобрении кредитных заявок, в промышленности, медицине. На дорогах стали появляться первые беспилотные автомобили, управляемые с помощью алгоритмов машинного обучения.

ПАО «Сбербанк», Российский фонд прямых инвестиций (РФПИ) и Правительство Российской Федерации заключили соглашения о намерениях в целях развития в России высокотехнологичного направления «Искусственный интеллект» в соответствии с Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года.¹ Основные задачи направления, в том числе предусмотренные в федеральном проекте «Искусственный интеллект», – развитие научного потенциала

в области технологий искусственного интеллекта, подготовка высококвалифицированных специалистов в области ИИ, создание стимулирующей правовой среды для оборота данных и снятие регуляторных барьеров в России, разработка программного обеспечения и содействие внедрению ИИ-решений в отраслях и государственных органах, популяризация технологий ИИ среди широкой аудитории. За развитие экосистемы ИИ в России отвечает ПАО «Сбербанк». Функция привлечения инвестиций в российские ИИ-проекты и компании закреплена за РФПИ.

В настоящем разделе доклада приводятся оценки достигнутых результатов и перспектив развития высокотехнологичного направления «Искусственный интеллект» в мире и в России, в том числе дается обзор повестки исследований и разработок технологий искусственного интеллекта, представлены существующие на рынке ключевые ИИ-решения, систематизированы основные меры государственной поддержки развития искусственного интеллекта.

Что такое искусственный интеллект?

Искусственный интеллект – это комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека². Он охватывает информационно-коммуникационную инфраструктуру, программное обеспечение (в том числе то, в котором используются методы машинного обучения), процессы и сервисы по обработке данных и поиску решений.

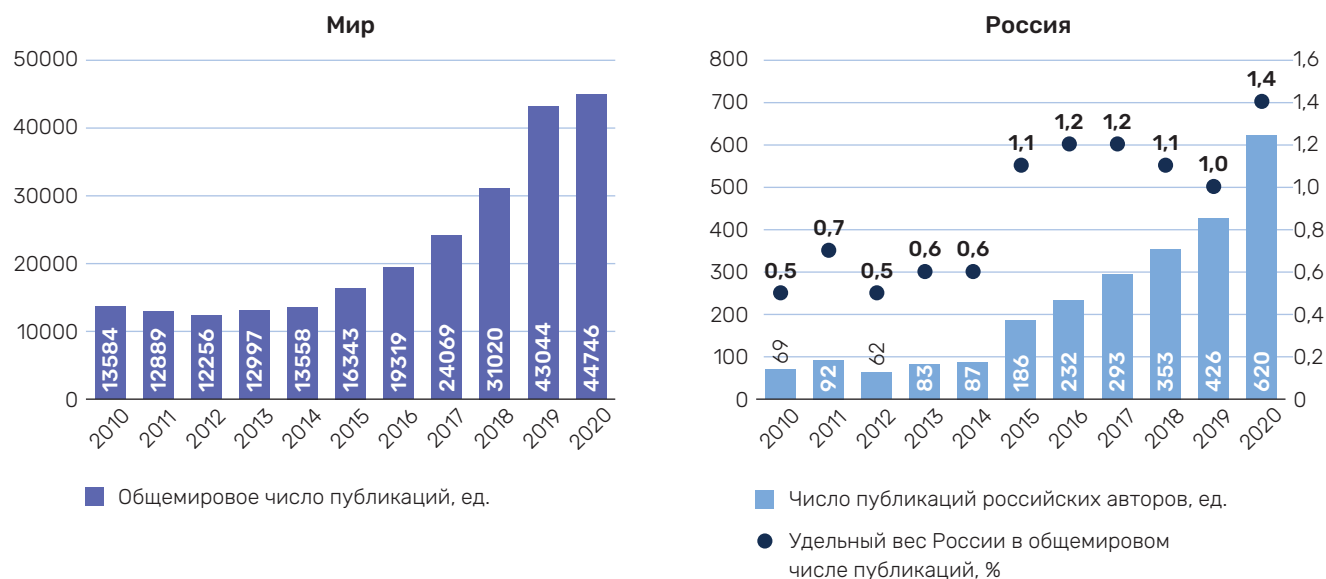
К числу ключевых групп технологий ИИ относятся компьютерное зрение, обработка естественного языка, распознавание и синтез речи, интеллектуальные системы поддержки

принятия решений и перспективные методы в области ИИ. Отдельное место занимает электронная компонентная база для ИИ, которая, хоть и непосредственно не относится к сфере ИИ, критически важна для всех направлений его развития.

ИИ – одна из наиболее динамичных научных сфер. В период с 2016 по 2020 г. наблюдался более чем двукратный рост числа научных публикаций, связанных с ИИ, индексируемых в Scopus (с 19,3 тыс. до 44,7 тыс.) (рис. 1). Удельный вес работ российских авторов составляет порядка 1,5%, но постепенно растет. В рейтинге стран по числу публикаций в научных журналах Россия занимает 20-е место, в тройку лидеров входят Китай (с большим отрывом), США и Индия.

¹ Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490.

² Согласно Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 года.

Рис. 1. Ключевые показатели публикационной активности

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Общемировое число патентных заявок с 2015 по 2019 г. выросло почти в три раза (с 22,5 тыс. до 63,7 тыс.) (рис. 2). В этот период российские авторы подавали порядка 100–140 патентных заявок в год. На фоне радикального увеличения внимания ключевых организаций к вопросам защиты результатов интеллектуальной деятельности в сфере ИИ удельный вес отечественных заявок плавно снижался с 0,4% в 2015 г. до 0,2% в 2019 г.

В рейтинге стран по числу патентов лидирует с большим отрывом Китай (103,9 тыс. заявок за 2017–2019 гг.), далее следуют США (23,5 тыс.) и Япония (12,2 тыс.). Россия находится на 15-м месте (387 заявок).

Развитие ИИ активно поддерживается правительствами большинства ведущих стран. Мировую повестку исследований и разработок в сфере ИИ определяют Китай и США. Это абсолютные лидеры по количеству публикаций, патентных заявок и масштабам финансирования данной деятельности. Объем государственных вложений в исследования и разработки в США оценивается в 1,5 млрд долл. в 2021 г. Согласно рекомендациям Комиссии национальной безопасности по искусственному интеллекту

(National Security Commission on Artificial Intelligence), к 2026 г. предлагается увеличить бюджет на исследования и разработки в области ИИ до 32 млрд долл. в год³.

В 2021–2027 гг. Европейская комиссия планирует ежегодно выделять 1 млрд евро на исследования и разработки в рамках программ «Горизонт Европа» и «Цифровая Европа»⁴. Кроме того, у отдельных стран ЕС есть национальные стратегии развития ИИ. Так, например, Германия к 2025 г. потратит на соответствующие цели 5 млрд евро⁵.

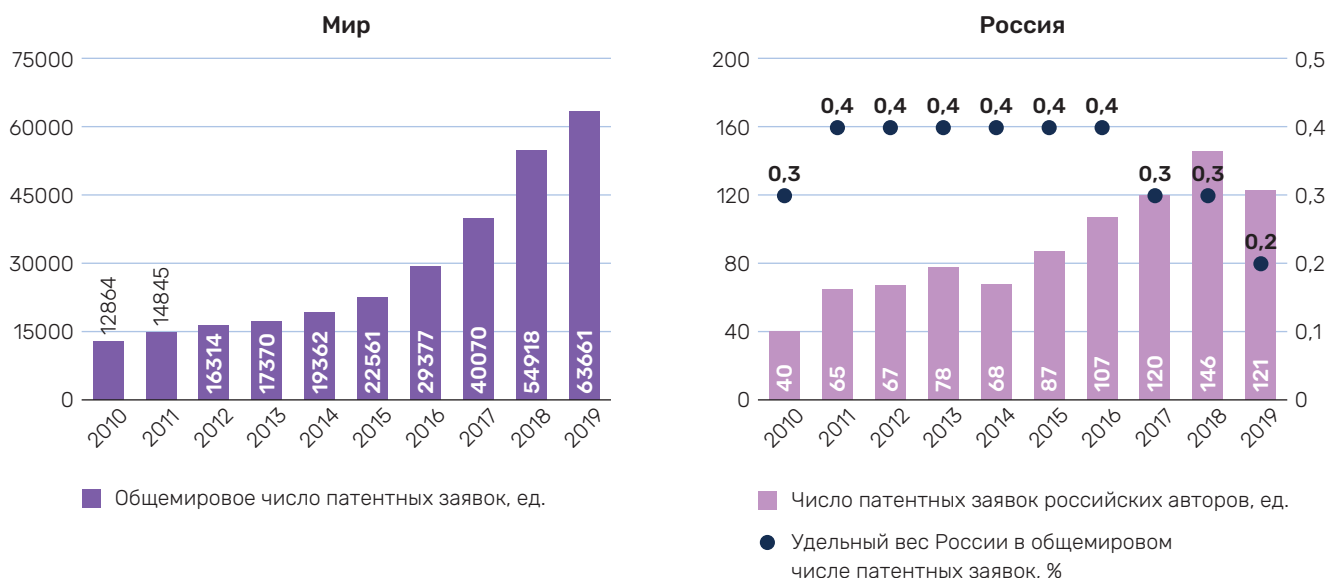
Несмотря на рост числа государственных стратегий и программ во всем мире в последние несколько лет, основной вектор развития ИИ задают крупнейшие цифровые корпорации США. Их ежегодный объем затрат на исследования и разработки превышает бюджеты национальных инициатив. Это, прежде всего, Amazon (42,7 млрд долл., показатель представляет «затраты на технологии и контент» в 2020 г.), Alphabet (27,6 млрд долл.), Microsoft (19,3 млрд долл.), Apple (18,7 млрд долл.), Facebook (18,5 млрд долл.)⁶. Значительная доля исследований указанных компаний приходится на ИИ и смежные области по созданию

³ <https://reports.nscai.gov/final-report/chapter-11/>

⁴ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-approach-artificial-intelligence> <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/coordinated-plan-artificial-intelligence-2021-review>

⁵ https://knowledge4policy.ec.europa.eu/ai-watch/germany-ai-strategy-report_en

⁶ По данным финансовой отчетности компаний за 2020 г.

Рис. 2. Ключевые показатели патентной активности

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

программных, аппаратных или сервисных решений.

Оценки государственных затрат на развитие ИИ в Китае неполные и зачастую сильно разнятся. Основным ориентиром могут служить ежегодные данные лидеров рынка. Совокупные затраты на исследования и разработки трех основных цифровых компаний Китая составили порядка 16 млрд долл. в 2020 г.: Alibaba (порядка 6,7 млрд долл. – общие расходы на разработку продуктов), Tencent (порядка 6 млрд долл.), Baidu (порядка 3 млрд долл.).⁷

Развитие ИИ невозможно без современной инфраструктуры. Основные вложения ведущих стран направлены на создание мощностей для централизованных вычислений в ЦОД. Отдельным потоком идут вложения в микроэлектронику и элементную базу ИИ.

В большинстве ведущих стран реализуются проекты или программы развития высокопроизводительных вычислений (суперкомпьютеров). Они имеют длительный горизонт выполнения и предполагают стабильное финансирование в течение ряда лет. Например, Европейская комиссия в 2021–2027 гг. планирует направить 7 млрд евро на инициативу по созданию

инфраструктуры высокопроизводительных вычислений (the EuroHPC Joint Undertaking)⁸.

Исходя из имеющихся данных об инвестициях, можно утверждать, что приоритет отдается созданию вычислительных мощностей, доступных научным и производственным организациям, в том числе для коллективного пользования. Так, программа CloudBank в США направлена на закупку и предоставление на конкурсной основе через федеральные гранты и контракты квот для использования облачных платформ⁹. Также планируется создать общенациональный исследовательский ресурс для ИИ (NAIRR), обеспечивающий доступ для широкого круга студентов и исследователей к вычислительным мощностям, качественным данным, образовательным инструментам¹⁰.

Об уровне развития такой инфраструктуры можно судить по наличию и мощности суперкомпьютеров. Регулярно обновляемый рейтинг Топ-500 включает многие национальные инициативы по их созданию. В 2021 г. Россия в нем представлена семью установками: тремя суперкомпьютерами Яндекса – «Червоненкис» (19-й по мощности в мире), «Галушкин» (36-й) и «Ляпунов» (40-й), двумя суперкомпьютерами

⁷ По данным финансовой отчетности компаний за 2020 г.

⁸ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/high-performance-computing-joint-undertaking>

⁹ <https://www.cloudbank.org/faq>

¹⁰ <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2021/06/10/the-biden-administration-launches-the-national-artificial-intelligence-research-resource-task-force/>

ПАО «Сбербанк» – «Кристофари нео» (43-й) и «Кристофари» (72-й), а также суперкомпьютерами «Ломоносов-2» (241-й) и «МТС Гром» (294-й), принадлежащими МГУ им. М.В. Ломоносова и ПАО «МТС» соответственно.

В части облачных сервисов среди наиболее значимых примеров – немецкий проект GAIA-X, направленный на создание распределенной инфраструктуры данных. Поддержка государства в 2021–2024 гг. в совокупности составит почти 190 млн евро¹¹.

Весь спектр мероприятий, примеры которых приведены выше, направлен в том числе на формирование фундаментальных заделов в области математики и компьютерных наук. Это базовое условие для создания конкурентоспособных продуктов и сервисов, причем не только ИИ, но и всех цифровых технологий. Кроме того, реализуются инициативы по совершенствованию регуляторной базы. Стратегии развития рынка данных (например, в США и Германии) связаны в основном с выработкой организационных и законодательных подходов к предоставлению данных, накапливаемых государством.

Текущий вектор развития ИИ сочетает совершенствование компонентной базы и вычислительных возможностей, быстрое распространение генеративных составительных моделей, автоматизацию моделей машинного обучения.

В последние годы в развитии ИИ пройдено несколько важных вех, которые к настоящему времени обеспечили возможность широкого распространения ИИ-решений для автоматизации выполняемых человеком задач на качественно новом уровне. Большая часть из них связана с ростом производительности аппаратной базы и достижением знаковых прикладных результатов в сфере ИИ. Некоторые из них представлены далее.

Deepfake (от англ. deep learning – глубинное обучение и fake – подделка). На рубеже 2016–2017 гг. в Data Science сообществе начали лавинообразно набирать популярность вариации алгоритма генеративных состязательных сетей (generative adversarial network, GAN), позволяющего по ключевым признакам объектов

восстанавливать их целиком (в том числе заменяя отдельные элементы, например лица). Решения на основе GAN позволяют «оживлять» статичные изображения и создавать на их основе вполне реалистичную анимацию. Использование этого метода приводит к появлению так называемых дипфейков (Deepfake). В настоящее время технология активно осваивается киноиндустрией. При этом набирает обороты и обратное направление – AntiDeepFake. Лабораторией кибербезопасности ПАО «Сбербанк», например, разработана технология на основе ИИ для автоматизированного выявления DeepFake с точностью до 98%.

Dactyl от OpenAI и прыгающие роботы от Boston Dynamics. В 2019 г. OpenAI был обучен робот Dactyl, который оказался способным собрать реальный кубик Рубика одной рукой-манипулятором. Таким образом, была доказана способность роботов, обученных полностью на синтезированных данных, взаимодействовать с объектами реального мира. Другим знаковым событием стала покупка 80% Boston Dynamics, знаменитых своими прыгающими и танцующими роботами, компанией Hyundai. Последняя планирует создать персональные средства передвижения для сложной местности, что знаменует новый этап в развитии рынка роботов для частных лиц.

AlphaFold 2. В 2020 г. компания DeepMind объявила о том, что созданный ею алгоритм справился с задачей, которую полвека пытались решить биологи, – научиться предсказывать пространственную структуру белков по их химическому составу и тем самым сделать возможным прогноз их биологической активности. Алгоритм был обучен на общедоступных данных из 170 тыс. белков с известной структурой. Создатели использовали около 128 ядер TPUv3 (эквивалент 100–200 графических процессоров). Одним из результатов стало предсказание нескольких ранее неизвестных структур вируса SARS-CoV-2 (белки ORF3a, ORF8).

GPT-3. 28 мая 2020 г. группа исследователей из OpenAI опубликовала статью с описанием самого продвинутого алгоритма обработки естественного языка (GPT-3). Он может быть

¹¹ <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2021/03/20210315-gaia-x-entering-its-operational-phase.html>

использован для решения подавляющего большинства задач, сформулированных на английском языке. В настоящее время исключительной коммерческой лицензией на GPT-3 обладает Microsoft. Русскоязычную версию этого алгоритма – ruGPT-3 – представил ПАО «Сбербанк».

DALL-E от OpenAI. В 2021 г. одним из важных достижений стало создание технологии генерации изображений по текстовому описанию. Разработанная компанией OpenAI нейросеть DALL-E позволяет создавать высококачественные изображения абстрактных и несуществующих объектов, сочетая несвязанные характеристики и применяя их к существующим изображениям. Визуализации генерируются с помощью нейросети, в основе которой лежит алгоритм GPT-3. Это позволяет создавать широкую палитру необычных изображений.

ПАО «Сбербанк» представил нейросеть-трансформер ruDALL-E, генерирующую

оригинальные изображения по короткому текстовому описанию на русском языке. В настоящее время в open source уже доступны эта и другие генеративные модели: ruDALL-E XL (1.3 млрд параметров), RuGPT-3 (самая большая ИИ-модель для русского языка, которая умеет писать тексты), ruCLIP (Base, Small и Large), RuDOLPH.

В будущем ИИ-системы смогут разобраться в самых сложных вопросах науки (например, в проблеме изменения климата). Однако для решения искусственным интеллектом ответственных задач необходимо обеспечить интерпретируемость (Explainable AI), при которой человек понимает весь процесс принятия решения алгоритмом. Это позволит повысить надежность, прозрачность, а также улучшить технические и потребительские характеристики ИИ-систем.

Технологии

К настоящему моменту в мире продолжают-ся дискуссии о подходах к структурированию области искусственного интеллекта. Наиболее часто в качестве признака группировки технологий используются прикладные области: компьютерное зрение, обработка естественного языка, распознавание и синтез речи, рекомендательные системы и системы поддержки

принятия решений (рис. 3). Успех ИИ-решений в прикладных областях достигается благодаря прогрессу в перспективных методах. В свою очередь, перспективные методы и лежащая в их основе математика опираются на архитектуру вычислительной базы. Физической основой для всех технологий ИИ является электронная компонентная база.

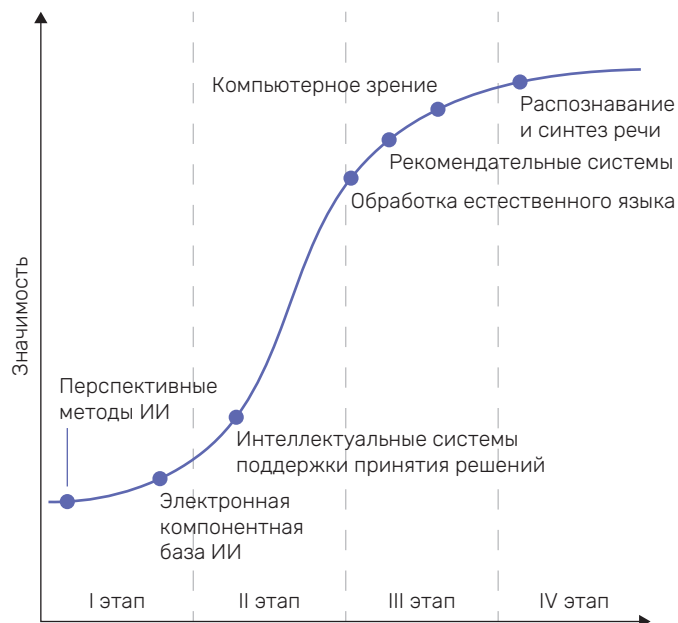
Рис. 3. Структура высокотехнологичного направления



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Технологии ИИ существенно различаются по уровню готовности. Представленная кривая технологической зрелости, построенная с помощью системы интеллектуального анализа больших данных iFORA, отражает стадии

(этапы) разработки основных групп технологий ИИ (рис. 4). Перспективные методы ИИ, как наиболее прорывные, отличаются наименьшей зрелостью. Ввиду высокой скорости изменений научные публикации в области перспективных

Рис. 4. Кривая технологической зрелости

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Методические пояснения. Значимость характеризует уровень зрелости технологии и отражает нормализованную упоминаемость технологии в данный период времени в публикациях соответствующего типа (научные статьи, патенты, рыночная аналитика). С учетом интенсивности исследований и разработок выделены четыре этапа:

I этап – зарождение технологии (высокая публикационная активность);

II этап – расцвет технологии (рост патентования и объема рыночной аналитики);

III этап – зрелость технологии (преобладание рыночной аналитики);

IV этап – плато (снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике).

методов ИИ устаревают в течение полугода – двух лет.

Вклад российских исследователей в общемировой корпус научных публикаций по основным группам технологий (компьютерное зрение, обработка естественного языка, распознавание и синтез речи и др.) в среднем по годам соответствует общей доле российских публикаций по ИИ (рис. 5). При этом доля патентных заявок в области обработки естественного языка в два раза выше, чем по остальным группам технологий.

Все направления мировой научно-технической повестки в той или иной степени представлены в российской науке. В частности, в области теоретической информатики российские фундаментальные исследования соответствуют

глобальным трендам (анализ базовых структур данных и вычислительной сложности, логика, детерминированные алгоритмы обработки структурной информации, мультимодальной кластеризации, алгоритмы для обработки естественного языка, выделения признаков, обработки изображений и т. п.).

К числу развитых в России технологических направлений также относятся:

- некоторые из разделов математических основ ИИ, особенно в области дискретной математики (анализ формальных понятий, неклассические логики, мультимодальная кластеризация и др.), статистики (включая основы статистического машинного обучения) и анализ временных рядов;

Рис. 5. Основные показатели публикационной и патентной активности по группам технологий

		Научные публикации			Патентные заявки			
		Мир	Россия	Доля России, %	Мир	Россия	Доля России, %	
Компьютерное зрение	2020	14818	176	1,2	2019	23158	51	0,2
	2015	6742	125	↑	2015	9873	30	↑
	2010	6328	50	0,8	2010	6090	19	0,3
Обработка естественного языка	2020	5117	105	2,1	2019	7401	26	0,4
	2015	2598	18	↑	2015	3742	37	↑
	2010	1312	5	0,4	2010	1909	7	0,4
Распознавание и синтез речи	2020	2190	37	1,7	2019	3065	6	0,2
	2015	1472	7	↑	2015	2279	8	↑
	2010	1096	4	0,4	2010	1234	5	0,4
Рекомендательные системы и интеллектуальные системы поддержки принятия решений	2020	3182	24	0,8	2019	1814	3	0,2
	2015	956	4	↑	2015	1647	7	↑
	2010	593	2	0,3	2010	993	0	0
Перспективные методы	2020	33529	400	1,2	2019	38677	54	0,1
	2015	8359	58	↑	2015	6823	16	↑
	2010	6527	18	0,3	2010	3300	11	0,3
Электронная компонентная база ИИ	2020	133	8	6,0	2019	167	2	1,2
	2015	62	0	↑	2015	72	0	↑
	2010	8	0	0	2010	27	0	0

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

- программные инструменты анализа данных и машинного обучения (CatBoost и др.);
- методы автоматической обработки текста и русскоязычные текстовые корпуса (DeepPavlov, BigARTM);
- методы и инструменты распознавания изображений, в частности, распознавания символов (характерный пример – продукты компании АBBYY).

Основными драйверами развития ИИ-индустрии в России остаются университеты

и другие учебные заведения, выпускающие специалистов высокого уровня (МФТИ, НИУ ВШЭ, Сколковский институт науки и технологий, НИУ ИТМО, МГУ им. М.В. Ломоносова), ведущие центры исследований и крупные компании, создающие базис для роста профессионалов (ПАО «Сбербанк», Яндекс, МТС, VK, ПАО «Газпром нефть», АBBYY), ряд компаний среднего бизнеса.

Продукты и рынки

По оценкам IDC, в 2021 г. объем мирового рынка ИИ составил 327,5 млрд долл., а к 2024 г. достигнет отметки в 554,3 млрд долл.¹² Рыночные оценки существенно различаются в силу отсутствия общепризнанного определения ИИ, единых критериев отнесения продуктов и сервисов к сфере ИИ, а также единой методологии оценки текущего и перспективного объема рынка.

Рынок ИИ охватывает значительное число различных сегментов. Некоторые продукты и продуктовые линейки являются более узкоспециализированными (например, интеллектуальные сервисы медицинской диагностики), остальные могут адаптироваться для широкого спектра задач. Большинство решений тесно связаны друг с другом, при этом один и тот же продукт может быть реализован с использованием различных технологий и методов.

К числу основных продуктовых линеек относятся биометрические системы, интеллектуальные виртуальные ассистенты, рекомендательные системы, беспилотный транспорт, решения в области предиктивного обслуживания, интеллектуальные виртуальные ассистенты, рекомендательные системы, беспилотный транспорт, решения в области предиктивного обслуживания, системы диагностики состояния транспортных средств и промышленного оборудования, интеллектуальные сервисы медицинской диагностики и поддержки врачебных решений.

Большинство продуктовых линеек объединяют программные, аппаратные и сервисные компоненты, что позволяет развивать смежные продукты для различных приложений. В сегментах горизонтальных продуктовых линеек доминируют преимущественно крупные компании цифровой индустрии. Меньшей концентрацией отличаются рынки с более выраженной секторальной спецификой (например, транспорта), в развитии которых активно участвуют профильные игроки (компании, университеты и др.).

Наиболее емкими сегодня являются рынки биометрических систем (36,6 млрд долл.), авиационного (27,4 млрд долл.) и автомобильного транспорта различных уровней автономности (23,3 млрд долл.) (табл. 1).

По оценкам, в перспективе до 2026 г. наиболее крупными станут рынки беспилотного транспорта (автомобильный – 64,9 млрд долл., авиатранспорт – 58,4 млрд долл.), а также биометрические системы (68,6 млрд долл. к 2025 г.), интеллектуальные виртуальные ассистенты в классе систем для обработки естественного языка (51,9 млрд долл. к 2028 г.).

Число стартапов (компаний, существующих на рынке не более пяти лет) – важный показатель состояния рынка ИИ. Именно в среде молодых компаний формируются благоприятные условия для разработки прорывных продуктов и новых технологий. По данным платформы Crunchbase, общемировое количество стартапов, основная деятельность которых связана с ИИ, превысило 9,7 тыс. в 2020 г.

Флагманские продукты и продуктовые линейки ИИ создаются на основе подготовленных к использованию алгоритмических «кирпичей» – базовых технологий. В свою очередь каждая из них включает в себя технологии более низкого уровня и классы алгоритмов и методов, применяемых для реализации ключевых функций.

Ведущими центрами компетенций в области компьютерного зрения в России являются Яндекс, VisionLabs, NtechLab. В 2019 г. компания VisionLabs трижды заняла первое место на международном тестировании алгоритмов распознавания лиц Национального института стандартов и технологий США (NIST). Алгоритм FindFace от NtechLab, на базе которого компания представляет линейку решений для государства и разных отраслей бизнеса, признан лучшим на конкурсах MegaFace Benchmark (Вашингтонский университет), EmotionNet Challenge (Университет Огайо) – первом в мире соревновании по распознаванию эмоций

¹² <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS47482321>

Табл. 1. Объемы рынка по основным продуктовым линейкам искусственного интеллекта в мире

Название продуктовой линейки	Объем рынка, млрд долл.
Биометрические системы ¹³	36,6
Интеллектуальные виртуальные ассистенты ¹⁴	5,8
Рекомендательные системы ¹⁵	2,1
Беспилотный транспорт:	
Беспилотные автомобили ¹⁶	23,3
Беспилотные авиационные системы ¹⁷	27,4
Автономные поезда ¹⁸	6,9
Диагностика состояния транспортных средств и промышленного оборудования, в том числе предиктивное обслуживание ¹⁹	4,5
Интеллектуальные сервисы медицинской диагностики ²⁰ и поддержки врачебных решений ²¹	1,7

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ на основе открытых источников рыночной аналитики.

людей – и занял лидирующую позицию в рейтинге мирового бенчмарка Facial Recognition Vendor Test, организованного Национальным институтом стандартов и технологий США. Алгоритмы от NtechLab по идентификации силуэтов и действий на видео вошли в тройку победителей на конкурсах WIDER Pedestrian Challenge и ActEV-PC.

Среди флагманских продуктов, в основе которых лежат технологии компьютерного зрения, выделяются следующие российские решения, соответствующие мировому уровню:

- решения VisionLabs для идентификации и верификации лиц практически в любой среде (в современных городах, на пограничных пунктах и транспортных узлах, в корпорациях, на заводах), а также для сбора и анализа данных – о типах транспортных средств, марках автомобилей, видах общественного транспорта – из различных источников, в том числе с камер видеонаблюдения;

- FindFace Security – «коробочное» решение от NtechLab для организации видеонаблюдения с использованием распознавания лиц;
- первое на российском рынке устройство с экраном и умной камерой SberPortal, а также ТВ-медиацентр с умной камерой SberBox Top;
- сервис поиска по изображению от Яндекса, превосходящий по качеству решения Google, Bing и Baidu;
- платформа CoBrain-Analytics для разработки и использования медицинских сервисов на основе ИИ;
- ИИ-сервисы для первичных снимков компьютерной томографии в амбулаторных условиях, системы поддержки принятия врачебных решений для использования в амбулаторно-поликлиническом звене и для других целей. По данным Правительства Москвы, в московских поликлиниках с помощью ИИ уже поставили более 2 млн диагнозов.

¹³ <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/next-generation-biometric-technologies-market-697.whtml>

¹⁴ <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/intelligent-virtual-assistant-industry>

¹⁵ <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2021/06/16/2247973/0/en/The-Recommendation-Engine-market-was-valued-at-USD-2-12-billion-in-2020-and-it-is-expected-to-reach-USD-15-13-billion-by-2026-registering-a-CAGR-of-37-46-during-the-period-of-2021-.html>

¹⁶ <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2021/08/06/2276438/0/en/At-22-7-CAGR-Global-Autonomous-Cars-Market-Share-Revenue-Expected-to-Reach-USD-64-88-Billion-by-2026-FnF-Research.html>

¹⁷ <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/unmanned-aerial-vehicles-uav.asp>

¹⁸ <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-autonomous-trains-market-report-2021-market-is-expected-to-grow-from-6-95-billion-in-2020-to-7-73-billion-in-2021---long-term-forecast-to-2030--301289945.html>

¹⁹ <https://www.businesswire.com/news/home/20211022005161/en/Global-Predictive-Maintenance-Market-Opportunity-Analysis-and-Industry-Forecasts-2021-2030---ResearchAndMarkets.com>

²⁰ <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/artificial-intelligence-medical-diagnostics-market-22519734.html>

²¹ <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/clinical-decision-support-systems-market-18085342.html>

Группа технологий обработки естественного языка, большая часть которых находится в открытом доступе, разрабатываются преимущественно Google, Facebook, DeepMind, Microsoft Research, а также ведущими китайскими компаниями. Российские решения в области обработки естественного языка, распознавания и синтеза речи лучше других справляются с русским языком, но отстают по остальным. Так, алгоритм «Яндекс.Переводчика» в 2020 г. признан лучшим по направлению англо-русского и русско-английского перевода на ежегодном международном соревновании по машинному переводу Conference on Machine Translation (WMT), опередив алгоритмы Google и Microsoft. Экспертиза по этим решениям сосредоточена в основном там же, где и данные для обучения (Яндекс, ЦРТ, ПАО «Сбербанк» и ряд других компаний). Среди флагманских российских продуктов можно выделить следующие:

- голосовой помощник Яндекса «Алиса», который помогает людям решать повседневные задачи;
 - семейство виртуальных ассистентов Салют от ПАО «Сбербанк», которое интегрировано в умные устройства Sber (SberPortal, SberBox, SberBox Top, SberBox Time, платформа умного дома), мобильные приложения СберБанк Онлайн и Салют, а также телевизоры под управлением Салют ТВ. При этом в компании создана открытая платформа для внешних разработчиков SmartMarket, на которой зарегистрировано более 70 тыс. человек. На SmartMarket, в числе прочего, можно создавать навыки для ассистентов Салют – сейчас их выпущено более тысячи;
 - решение SmartSpeech от ПАО «Сбербанк» для распознавания и синтеза речи, позволяющее бизнесу без специального оборудования подключать речевые технологии;
 - решения для распознавания голоса, синтеза речи, записи и анализа, идентификации лица и голоса группы компаний ЦРТ (входит в экосистему ПАО «Сбербанк»). Технологии выявления подделок голоса и распознавания речи группы ЦРТ занимают лидирующие позиции в мировых рейтингах NIST, VOICES, CHiME;
 - голосовой ассистент «Маруся» от VK (ранее – Мэйл.Ру Групп), встроенный в умную колонку «Капсула».
- В области рекомендательных систем и систем поддержки принятия решений российские продукты удерживают паритет с мировыми разработками. Особенностью отечественных разработок является их глубокая интеграция и неотделимость от бизнес-процессов. Основные компетенции сосредоточены в компаниях ПАО «Сбербанк», Яндекс, Лаборатория Касперского, МТС, ПАО «Газпром нефть» и ряде других. Среди основных флагманских продуктов можно отметить следующие:
- системы ПАО «Сбербанк» для автоматизации процесса выдачи кредитов при уменьшенных рисках (кредит за 7 минут для корпоративных клиентов);
 - системы Яндекса на основе запросов пользователей и данных о посещаемых ими web-страницах, обеспечивающие персонализированные рекомендации товаров и услуг и встроенные во все сервисы компании (поисковик «Яндекс», «Яндекс.Музыка», «Яндекс.Еда», «Яндекс.Дзен» и др.);
 - системы ПАО «Газпром нефть», позволяющие сократить цикл геологического анализа с 6 месяцев до 14 дней. «Цифровая нефть» позволяет находить скрытые залежи углеводородов путем цифровой обработки геологических данных. С помощью «Когнитивного геолога» на основе вероятностных вычислений, в частности, можно выстраивать детальные цифровые модели месторождений.
- В области перспективных технологий ИИ на отечественном рынке пока представлены единичные разработки, например, от ПАО «Сбербанк». К ним, в частности, относятся сервис для автоматического построения и обучения моделей на пользовательских данных на основе автоматизированного машинного обучения (AutoML), мультимодальная метамодель FUSION BRAIN, способная одновременно решать широкий круг задач в области компьютерного зрения, обработки естественного языка и др.

В России сохраняется отставание по электронной компонентной базе (ЭКБ). Ведущие игроки (Китай, США, ЕС) стремятся снизить зависимость от небольшого числа мировых производителей ЭКБ.

В последние годы наблюдается рост масштабов внедрения ИИ-решений в отраслях, что обусловлено совершенствованием технологий, а также повышением уровня информированности пользователей о дополнительных возможностях применения ИИ. Внедрение продуктов и сервисов на основе ИИ позволяет повысить эффективность деятельности по таким показателям, как скорость (сокращение сроков выполнения процессов, принятия решений и др.), качество (совершенствование потребительских характеристик продукции и сервисов, улучшение клиентского опыта и др.), объективность (уменьшение количества ошибок, вызванных человеческим фактором), экономическая эффективность (рост доходов, сокращение расходов), персонализация (формирование индивидуальных предложений и траекторий). В каждой традиционной отрасли есть набор задач, для решения которых применяется ИИ:

- в сельском хозяйстве – прогноз урожайности, точное земледелие (удобрение, полив, химическая защита растений с учетом прогноза погоды) для конкретной территории, использование автономной сельскохозяйственной техники (комбайнов, сортировщиков и др.);
- в лесном комплексе – выявление точек на основе анализа спутниковых снимков, контроль незаконной вырубki с помощью интеллектуального мониторинга лесоизменений;
- в нефтегазовой промышленности – автоматизированное определение месторождений, оптимизация режимов работы оборудования при разработке месторождений,

предиктивное обслуживание оборудования, оптимизация логистической цепочки;

- в металлургии – выбор оптимальной формулы шихты²² с помощью ИИ, применение роботов, контроль безопасности на производстве по данным с камер, контроль качества готовой продукции;
- в машиностроении – интеллектуальное моделирование и прототипирование при проектировании продукции, использование коллаборативных роботов, предиктивный ремонт оборудования, биометрический контроль доступа на объекты;
- в транспортной отрасли – беспилотное и автоматизированное управление движением, доставка с помощью дронов, биометрия на объектах транспортной инфраструктуры;
- в строительстве и коммунальном хозяйстве – контроль за ходом строительства с помощью дронов, контроль безопасности на стройке, предиктивный ремонт коммунального оборудования;
- в государственном управлении – обработка бумажных документов с помощью компьютерного зрения, персонализированные рекомендации для граждан по получению госуслуг, автоматический разбор и маршрутизация обращений граждан, в том числе с использованием чат-ботов;
- в здравоохранении – анализ медицинских снимков для определения патологий, персональные рекомендации по профилактике заболеваний, автопротоколирование медицинских документов, «второе мнение» для врача;
- в образовании – персонализированные образовательные траектории, автоматизированная оценка работ, контроль «списывания» и др.

²² Шихта – смесь материалов, загружаемых в металлургические агрегаты, для получения конечных продуктов заданного химического состава и свойств.

Государственная поддержка

Развитие индустрии искусственного интеллекта как одного из приоритетных направлений закреплено в специализированных и комплексных стратегических, программных и плановых документах большинства ведущих стран, в том числе Великобритании²³, Германии²⁴, Китая²⁵, США²⁶, Франции²⁷, Республики Корея²⁸, Японии²⁹. В дополнение к основным стратегическим документам инициативы внедрения ИИ-решений предусмотрены в различных отраслевых документах, стратегиях цифровизации государственного управления ведущих стран. Для развития ИИ задействован широкий спектр мер и инструментов, который включает: поддержку создания новых решений на основе цифровых технологий (преимущественно в форме грантового финансирования); пересмотр регуляторных условий и технологических стандартов; докапитализацию фондов и институтов развития, осуществляющих поддержку технологических компаний; инвестиции в развитие цифровой инфраструктуры, в том числе развертывание сетей 5G; финансирование программ обучения точным наукам, повышения квалификации и переподготовки кадров; налоговые льготы и преференции; обеспечение открытого доступа к датасетам (наборам данных).

В условиях доминирования небольшого числа цифровых платформ и концентрации вокруг них новейших разработок национальные стратегии многих стран предусматривают достижение технологического суверенитета и создание собственных заделов по технологиям ИИ. Поэтому часто вопросам фундаментальных исследований и усовершенствования собственных

ИИ-решений посвящены отдельные документы (например, в США – National AI R&D Strategic Plan)³⁰. Страны-лидеры уделяют значительное внимание развитию инфраструктуры и поощряют создание программных решений с открытым кодом (open source). При этом основным полем для конкуренции становятся не сами методы и технологии, а человеческий капитал и научно-образовательная система передачи знаний для создания надстроек над базовыми технологиями в виде отдельных приложений.

Международная кооперация в форме альянсов и консорциумов обеспечивает диалог по широкому кругу вопросов, включая стандартизацию ИИ, безопасность, этические и социальные аспекты, объяснимость ИИ (Consortium on the Landscape of AI Safety, Partnership on AI, Global AI Ethics Consortium, Альянс в сфере искусственного интеллекта в России и др.).

Создаются территориальные ИИ-хабы (экосистемы) на уровне отдельного города, региона или межстрановых объединений (AI4EU в ЕС, CyberWalley в Германии, AI Town в Китае, Queensland AI Hub в Австралии и др.). Благодаря объединению усилий представителей академического и бизнес-сообщества снижаются риски по разработке и внедрению ИИ-решений в первую очередь для малых компаний, возникают синергетические эффекты. Например, Кибер-долина (CyberWalley) в Германии как крупнейший в Европе исследовательский кластер ИИ объединяет целую группу научных организаций и ведущих мировых корпораций, что обеспечивает воплощение результатов фундаментальных работ в конкретных решениях³¹. В Республике Корея с 2021 г.

²³ <https://www.gov.uk/government/publications/artificial-intelligence-sector-deal/ai-sector-deal>

²⁴ https://ec.europa.eu/knowledge4policy/publication/germany-artificial-intelligence-strategy_en

²⁵ <https://flia.org/wp-content/uploads/2017/07/A-New-Generation-of-Artificial-Intelligence-Development-Plan-1.pdf>

²⁶ <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2019-02-14/pdf/2019-02544.pdf>

²⁷ <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid136649/la-strategie-nationale-de-recherche-en-intelligence-artificielle.html>

²⁸ <https://www.msit.go.kr/>

²⁹ <https://www.nedo.go.jp/content/100865202.pdf>

³⁰ <https://www.ai.gov/strategic-pillars/innovation/#National-AI-Research-and-Development-Strategic-Plan>

³¹ <https://cyber-valley.de/>

действует инновационный ИИ-хаб, который насчитывает более 200 национальных и зарубежных организаций-участников, большая часть которых – частные компании, в том числе Google и Meta (ранее – Facebook). Благодаря аккумуляции компетенций и формированию открытой исследовательской среды планируется создать ИИ-экосистему мирового уровня³².

В нашей стране основы государственной политики в области искусственного интеллекта были заложены в 2019 г. Правительство Российской Федерации заключило соглашения о намерениях с ПАО «Сбербанк» и РФПИ³³ в целях развития высокотехнологичной области «Искусственный интеллект». Цели развития определены Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 г.³⁴ и включают обеспечение роста благосостояния и качества жизни населения; обеспечение национальной безопасности и правопорядка; достижение устойчивой конкурентоспособности российской экономики, в том числе лидирующих позиций в мире в области ИИ.

С целью реализации Национальной стратегии развития искусственного интеллекта на период до 2030 г. разработан федеральный проект «Искусственный интеллект»³⁵, предполагающий реализацию мероприятий по следующим направлениям:

- поддержка научных исследований и разработок;
- разработка и развитие программного обеспечения, в том числе за счет поддержки стартапов и пилотного внедрения технологий ИИ;
- создание комплексной системы правового регулирования в сфере искусственного интеллекта;
- повышение доступности и качества данных;
- повышение доступности аппаратного обеспечения;

- повышение уровня обеспечения российского рынка технологий ИИ квалифицированными кадрами и уровня информированности населения о возможных сферах использования ИИ.

Указанные направления соответствуют ключевым приоритетам стратегических документов зарубежных стран. Схожие мероприятия осуществляются в Германии, Великобритании, Китае, США, Республике Корея, Японии.

В целях реализации федерального проекта на текущий момент принято восемь постановлений Правительства Российской Федерации, направленных в том числе на предоставление субсидий в целях реализации результатов федерального проекта по поддержке пилотных проектов апробации технологий ИИ в приоритетных отраслях; поддержку и акселерацию ИИ-стартапов, поддержку разработки открытых библиотек в сфере искусственного интеллекта; поддержку исследовательских центров в сфере ИИ; проведение преакселерации школьников и студентов, обеспечение получения гражданами Российской Федерации дополнительного профессионального образования; создание Центра экспертизы по реализации федерального проекта «Искусственный интеллект»; разработку аппаратно-программных комплексов для целей ИИ; формирование программ высшего образования и повышения квалификации преподавателей; проведение хакатонов и лекций по тематике ИИ.

Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации провел отбор шести исследовательских центров в сфере ИИ. Их деятельность нацелена на проведение передовых научных исследований в области ИИ для создания новых разработок и прикладных решений на их основе, а также внедрение таких решений индустриальными партнерами центров. Бюджетное финансирование каждого исследовательского центра составит 900 млн руб. до 2024 г. Указанную поддержку получают:

³² <https://www.smartcitytoday.co.kr/news/articleView.html?idxno=21280>

³³ Утверждены распоряжениями Правительства Российской Федерации от 8 июля 2019 г. № 1484, от 3 сентября 2019 г. № 1964-р.

³⁴ Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490.

³⁵ Паспорт федерального проекта «Искусственный интеллект» утвержден на заседании Президиума Правительственной комиссии по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности 27 августа 2020 г.

- Сколковский институт науки и технологий: ИИ для оптимизации управленческих решений в целях снижения углеродного следа;
- МФТИ: анализ естественного языка методами ИИ (дополнительное направление – ИИ для робототехники и управления беспилотными системами);
- НИУ «Высшая школа экономики»: межотраслевые технологии ИИ и ИИ для приоритетных отраслей экономики и социальной сферы;
- Университет ИТМО: ИИ для промышленности. Создание на базе технологий сильного ИИ методов решения новых классов задач;
- Университет Иннополис: межотраслевые технологии ИИ и ИИ для иных приоритетных отраслей экономики и социальной сферы;
- Институт системного программирования РАН: разработка доверенных систем, использующих технологии ИИ.

Перспективы развития

Развитие ИИ будет определяться достижениями в областях, связанных с компьютерным зрением, обработкой естественного языка, распознаванием и синтезом речи, рекомендательными системами и интеллектуальными системами поддержки принятия решений, перспективными методами, а также электронной компонентной базой ИИ. Сохранят свою актуальность задачи, связанные с созданием «сильного» искусственного интеллекта. Сейчас мы видим только первые шаги в этом направлении: мультимодальность, мультизадачность. Будет усиливаться тенденция к обобщению задач, когда модели, обученные для одного класса задач (например, для генерации текста), дообучают для другого (например, для генерации изображений). В ближайшие несколько лет архитектуры будут усложняться, а подходы комбинироваться. В этой связи особую важность приобретает междисциплинарность исследований и разработок. Инициативы ведущих стран направлены на масштабное инвестирование в исследования и разработки и создание собственных заделов по основным группам технологий ИИ.

В перспективе до 2024 г. в рамках федерального проекта «Искусственный интеллект» будет реализован комплекс мероприятий, охватывающий все наиболее значимые аспекты разработки и внедрения ИИ. Для активизации научных исследований в сфере ИИ будет оказываться поддержка соответствующим исследовательским центрам. На развитие разработок нацелены гранты малым предприятиям. В целях сокращения кадрового дефицита в области ИИ будут разработаны образовательные программы – бакалаврские и магистерские. Кроме того, количество специалистов планируется увеличить за счет выдачи персональных цифровых сертификатов на прохождение дополнительного профессионального образования в области ИИ. Стимулированию спроса на продукцию ИИ будет способствовать грантовая поддержка пилотных проектов апробации искусственного интеллекта в отраслях.

В дополнение к мерам федерального проекта «Искусственный интеллект» для достижения лидерства в области ИИ целесообразно предусмотреть мероприятия по ряду ключевых направлений.

В научно-образовательной сфере необходимо обеспечить проведение исследований и разработок по наиболее актуальным и перспективным тематикам, а также подготовку квалифицированных кадров в области создания основных групп технологий – математиков и программистов.

В 2021 г. ПАО «Сбербанк» учреждена ежегодная Научная премия Сбера, призванная поощрить и стимулировать выдающихся ученых, ведущих активную научно-исследовательскую деятельность в России. Предусмотрено три номинации, охватывающие разные области научного знания. В каждой номинации объявлен денежный приз в 20 млн рублей. Одна из номинаций Премии – «Цифровая вселенная» – предусматривает награду для ученого, работающего в области математики и компьютерных наук, включая искусственный интеллект. Поощрение развития отечественных разработок позволит развить существующий научно-технический задел в сфере ИИ и успешно конкурировать на фоне возникающих глобальных вызовов.

Создание технологий мирового уровня и конкурентоспособных продуктов требует формирования комфортных условий для специалистов в области ИИ внутри страны, в том числе за счет повышения привлекательности национальной юрисдикции для ИИ-специалистов, а также обеспечения доступа к высокопроизводительной вычислительной инфраструктуре для реализации проектов в сфере ИИ.

Российские разработчики в партнерстве с научными организациями уже сегодня способны создавать продукты и сервисы мирового уровня. Вместе с тем для ускоренного развития ИИ-индустрии необходимо обеспечить стимулирование спроса со стороны секторов-потребителей. В этой связи целесообразно предусмотреть соответствующие меры государственной

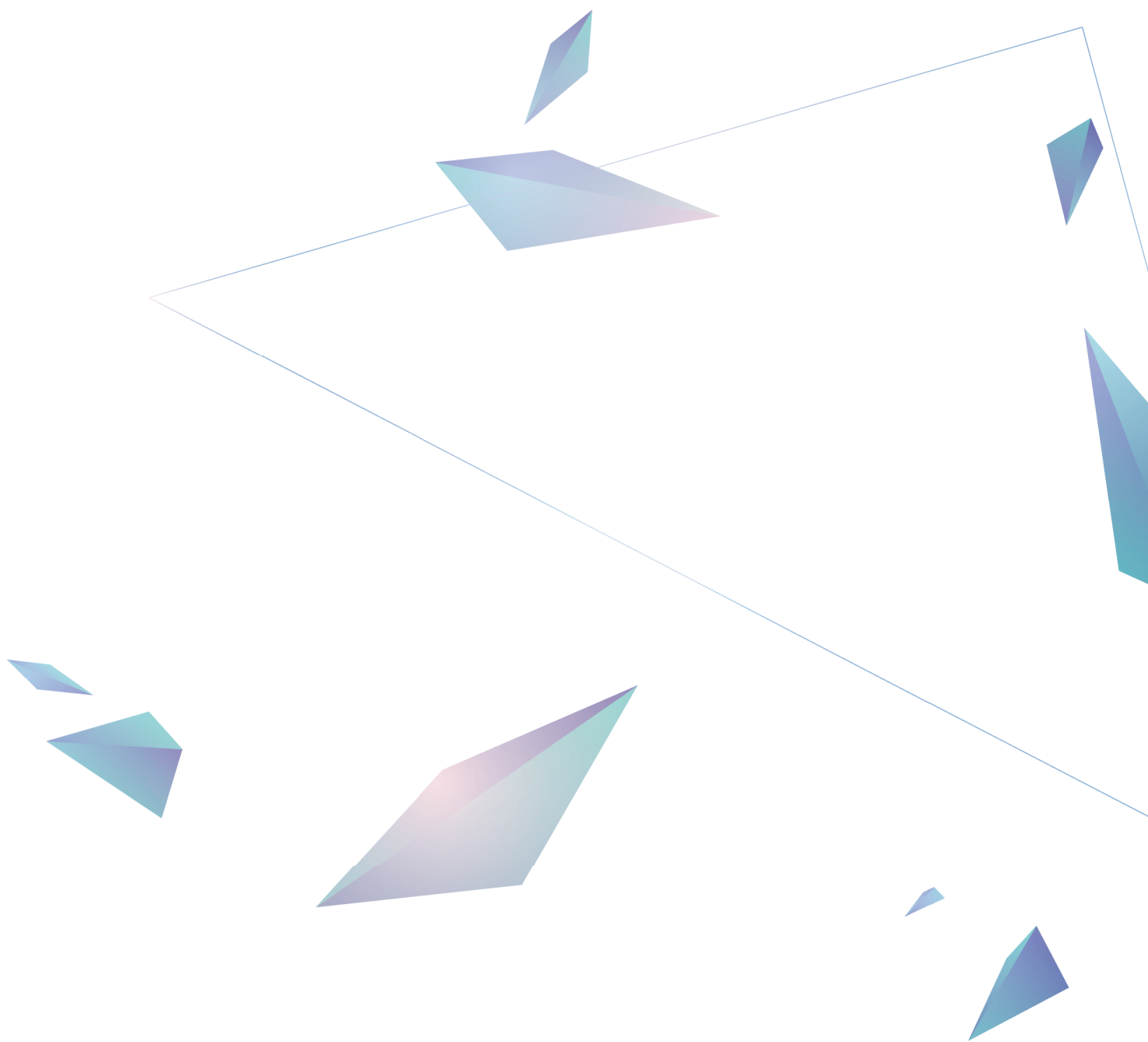
поддержки, в том числе нацеленные на содействие эффективному внедрению российских решений в отраслях экономики и социальной сферы, включая налоговые стимулы.

Для снижения издержек внедрения ИИ и расширения круга потенциальных заказчиков целесообразно стимулировать развитие рынка данных и создание программного обеспечения с открытым кодом. Обмен опытом и поддержка разработки подобного программного обеспечения будет способствовать повышению уровня

компетенций отечественных участников «открытых» платформ.

Дальнейшее развитие ИИ должно быть скоординировано с другими высокотехнологичными направлениями (например, для ИИ необходимы вычислительные мощности и современная ЭКБ, для создания беспилотников – технологии 5G). Это не только позволит добиться технологической независимости, но и обеспечит значительный синергетический эффект на стыке нескольких направлений.

Интернет вещей



Сокращения

IoT (Internet of Things)	Интернет вещей
AIoT (Artificial Intelligence of Things)	искусственный интеллект вещей
eURLLC (enhanced Ultra Reliable Low Latency Communication)	сверхнадежная связь с малой задержкой
Li-Fi (Light Fidelity)	технология передачи данных с использованием видимого света
LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)	сеть дальнего радиуса действия с расширенным спектром
LPWAN (Low-Power Wide Area Network)	энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия
LTE-M (Long-Term Evolution Machine Type Communication)	стандарт сети LTE для межмашинного взаимодействия
MBAN (Medical Body Area Network)	медицинская нательная сеть
MiWi	проприетарный беспроводной протокол, поддерживающий одноранговое соединение в звездообразной сети
mMTC (massive Machine-Type Communications)	массовые машинные коммуникации с помощью большого числа подключенных устройств с низким энергопотреблением
ML (Machine Learning)	машинное обучение
NB-IoT (Narrow Band Internet of Things)	узкополосный Интернет вещей
NFC (Near-Field Communication)	ближняя бесконтактная связь
OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture)	унифицированная архитектура OPC

OpenUNB (Open Ultra-Narrowband)	протокол беспроводной передачи данных для высокочастотных сетей на основе сверхузкополосной связи
RFID (Radio Frequency Identification)	радиочастотная идентификация
TSN (Time-Sensitive Networking)	чувствительный ко времени сетевой обмен данными
WBAN (wireless body area network)	беспроводная нательная компьютерная сеть на основе стандарта IEEE 802.15.6
Wi-Fi	технология беспроводной локальной сети с устройствами на основе стандартов IEEE 802.11
WirelessHART (Highway Addressable Remote Transducer Protocol)	сетевая технология для беспроводных устройств на базе протокола HART
WLAN (Wireless Local Area Network)	беспроводная локальная сеть
WPAN (Wireless Personal Area Network)	беспроводная персональная сеть
XNB (Extended Narrowband)	расширенная узкополосная сеть
ZigBee	беспроводная связь между устройствами с низким потреблением энергии с возможностью выстраивания ячеистой топологии сети
Z-Wave	беспроводной протокол связи, разработанный для домашней автоматизации

Распространение Интернета вещей – один из ключевых трендов развития цифровой экономики. Данное направление отличает высокий уровень технологической готовности и зрелости соответствующих рынков, на которых представлено множество поставщиков продукции и услуг. Интернет вещей – своего рода экосистема для взаимодействия различных устройств, сбора, передачи и обработки данных с них, управления процессами в автоматизированном режиме. Интернет вещей в сочетании с решениями в сфере искусственного интеллекта и мобильных сетей связи пятого поколения позволит обеспечить переход отраслей экономики и социальной сферы на качественно более высокий уровень технологического развития, что приведет к росту производительности труда, повышению качества и гибкости производств и сервисов, снижению аварийности и др.

Госкорпорация «Ростех» и Правительство Российской Федерации заключили соглашение о намерениях в целях развития в России высокотехнологичного направления «Интернет вещей». В рамках его реализации утверждена дорожная карта¹, предусматривающая меры по формированию благоприятной регуляторной среды, созданию условий для появления отечественных коммерчески успешных платформ, сервисов и решений на базе Интернета вещей, в том числе обеспечению их интероперабельности.

В настоящем разделе доклада приводятся оценки достигнутых результатов и перспектив развития высокотехнологичного направления «Интернет вещей» в мире и в России, в частности, дается обзор повестки исследований и разработок, представлены существующие на рынке ключевые решения, систематизированы основные меры государственной поддержки развития Интернета вещей.

Что такое Интернет вещей?

Концепция Интернета вещей (IoT) была впервые сформулирована в 1999 г. командой исследователей Массачусетского технологического института. Ее суть состоит в объединении в единую сеть устройств или систем, которые осуществляют сбор данных и обмен ими и могут удаленно контролироваться через сеть Интернет с помощью программного обеспечения на любом типе компьютеров, смартфонов либо через интерфейсы. По оценкам, к 2025 г. внедрение Интернета вещей обеспечит экономический эффект в диапазоне 4–11 трлн долл.²

Наибольший объем рынка Интернета вещей приходится на Азиатский регион, несколько уступают ему по этому показателю Северная Америка, Европа и Ближний Восток.

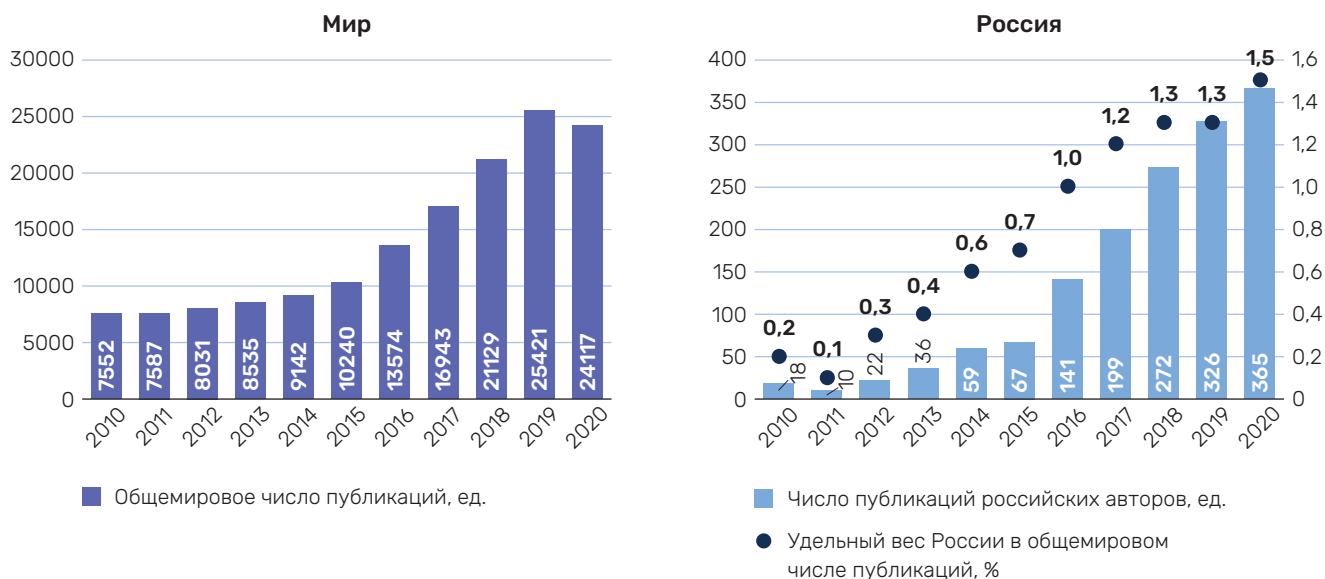
Интернет вещей охватывает широкий спектр технологий телекоммуникаций, сенсорики, мехатроники, информационной безопасности, распределенной обработки информации и др.

Соответственно, среди ключевых игроков рынка можно выделить группы компаний, занимающиеся производством оборудования, разработкой программного обеспечения, отвечающие за подключение к Интернету вещей и информационную безопасность, а также работающие в сегменте промышленного внедрения.

В последние годы в мире постоянно повышается интенсивность исследований и разработок по тематике Интернета вещей. Об этом свидетельствует рост числа научных публикаций. В частности, с 2010 г. их число увеличилось более чем в 3 раза, причем на отрезке с 2016 по 2019 г. рост носил взрывной характер (рис. 1). При этом доля России в 2020 г. составила около 1,5%, увеличившись с 2014 г. приблизительно вдвое. По показателю публикационной активности лидирует Китай, Россия отстает минимум в 4 раза, занимая лишь 19-е место.

¹ Дорожная карта развития высокотехнологичной области «Интернет вещей», утвержденная протоколом заседания президиума Правительственной комиссии по цифровому развитию, использования информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности от 8 декабря 2020 г. № 31. Является основным механизмом реализации соглашения о намерениях между Правительством Российской Федерации и Госкорпорацией «Ростех», заключенного в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 июля 2019 г. № 1484-р в целях развития Интернета вещей.

² <https://www.mckinsey.com/featured-insights/internet-of-things/how-we-help-clients>

Рис. 1. Ключевые показатели публикационной активности

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

В рейтинге стран по числу патентных заявок на изобретения в 2017–2019 гг. Россия находится на 15-м месте. Однако следует отметить, что с 2014 г. в нашей стране также наблюдалась восходящая динамика, но менее выраженная по сравнению с ростом публикационной активности (рис. 2). При этом, если в мире ключевыми заявителями являются компании, то в России более активно патентуют вузы и научные организации. В целом лидерство в области публикационной и патентной активности принадлежит Азиатскому региону, прежде всего Китаю.

Наибольшие государственные вложения в развитие Интернета вещей приходятся на Китай и США. В Китае только специальным фондом финансирования проектов Интернета вещей аккумулировано почти 14,6 млрд долл.³ В США значимые инвестиции в это технологическое направление осуществляются по программе Computing-Enabled Networked Physical Systems (CNPS) в рамках инициативы Networking and Information Technology Research and Development (NITRD) (около 1 млрд долл. за 2016–2021 гг.)⁴. Пакет мер поддержки

проектов реализуется в Германии в рамках инициативы «Индустрия 4.0» (500 млн долл.)⁵. Правительство Республики Корея в 2020 г. инвестировало: более 414 млн долл. в разработку технологий автоматизации производств, включая промышленный Интернет вещей (Industrial Internet of Things, IIoT)⁶. В целом затраты на реализацию проектов прикладных исследований при поддержке государства варьируют от нескольких десятков до сотен миллионов долларов и охватывают полный цикл «разработка – внедрение – масштабирование». Так, в Китае поставлена задача к 2025 г. создать три-пять конкурентоспособных на глобальном уровне межсекторальных платформ⁷. Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) разрабатывает стандарты в области кибербезопасности Интернета вещей с акцентом на промышленном секторе⁸.

Ведущие мировые компании в области Интернета вещей – это в основном разработчики цифровых платформ. В число лидеров входят Microsoft Azure, Amazon AWS, PTC, IBM Watson, Google Cloud, Alibaba Cloud, SAP, Baidu, Cisco

³ https://www.uscc.gov/sites/default/files/Research/SOSi_China's%20Internet%20of%20Things.pdf

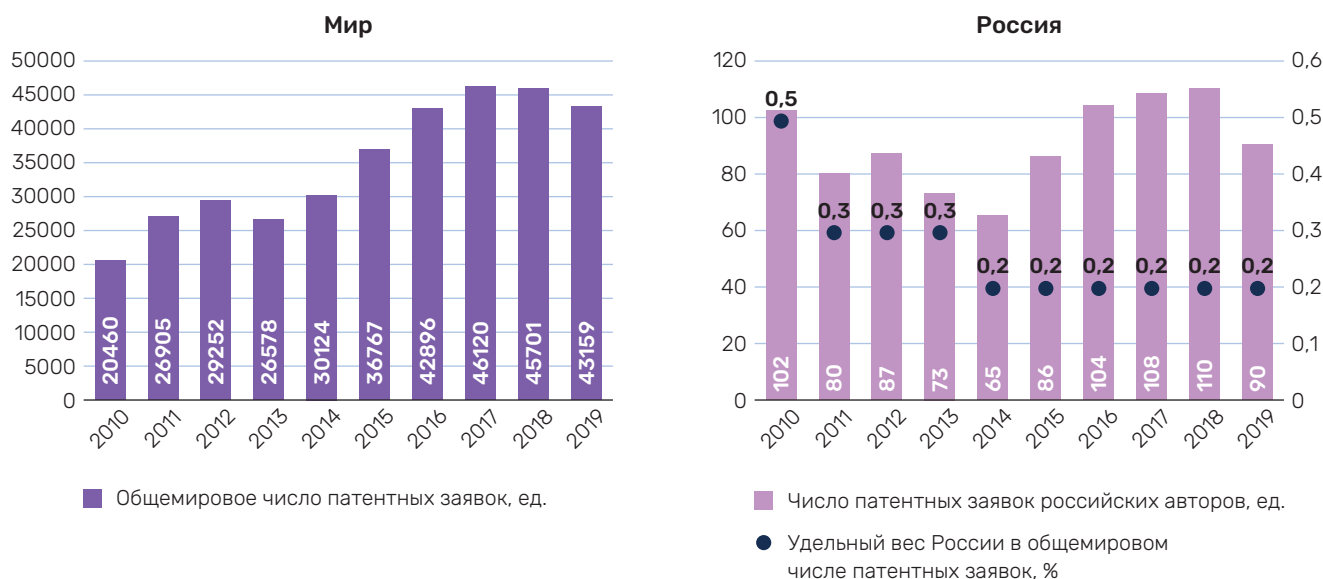
⁴ <https://www.nitrd.gov/apps/itdashboard/dashboard/>

⁵ <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/5jlwvzz8td0n-en.pdf?expires=1630032418&id=id&accname=guest&checksum=19149F2771DC8D0D60239E2C6C317F9B>

⁶ <https://www.selectusa.gov/article?id=Korea-Manufacturing-Technology-Smart-Factory>

⁷ <https://merics.org/sites/default/files/2020-06/MERICSReportDigitalPlatformEconomyEN02.pdf>

⁸ <https://www.nist.gov/system/files/documents/2020/02/11/9.%20Dowell%202020-Programmatic%20Priority%20Talk%20IoT%20v3.pdf>

Рис. 2. Ключевые показатели патентной активности

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Kinetic⁹. Бюджеты указанных компаний на исследования и разработки, значимая доля которых приходится на Интернет вещей, оцениваются в диапазоне от нескольких сотен миллионов до нескольких миллиардов долларов.

По прогнозам IDC, в 2020 г. совокупные расходы на Интернет вещей в мире достигли 742 млрд долл. и до 2024 г. продолжат расти на 11,3% в год¹⁰. Порядка трех четвертей затрат приходится на Китай, США и Европу. К 2025 г. в мире будет насчитываться более 55,7 млрд устройств Интернета вещей, из которых 75% будут подключены к IoT-платформам¹¹. Значительная часть инвестиций в ближайшие годы будет связана с развертыванием сетей 5G, расширением вычислительных мощностей для обработки растущего объема данных, а также ростом числа оконечных устройств. Существенную роль в повестке Интернета вещей играют граничные вычисления¹². По оценкам IDC, в 2020 г. их рынок составил 250,6 млрд долл.¹³

Ввиду высокой технологической зрелости Интернета вещей основные события последних лет связаны с созданием инфраструктуры,

внедрением соответствующих решений в отраслях экономики и социальной сферы и развитием нормативного регулирования.

К числу наиболее значимых событий в 2018 г. можно отнести следующие¹⁴:

- В США впервые в мире принят закон о кибербезопасности систем Интернета вещей. Начиная с 1 января 2020 г., любой производитель устройства, которое «прямо или косвенно» подключается к интернету, должен оснастить его функциями безопасности для предотвращения несанкционированного доступа, модификации или раскрытия информации.
- Компания Rockwell Automation, обеспечивающая промышленную автоматизацию, объявила о вложении 1 млрд долл. в акции компании РТС – лидера в разработке программного обеспечения для платформ Интернета вещей.
- Развернуты первые сети 5G в крупных городах мира.

С 2019 г. Интернет вещей более активно распространяется в отраслях экономики¹⁵:

⁹ <https://www.statista.com/statistics/1132818/iot-platforms-ranking-worldwide/>

¹⁰ <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS46609320>

¹¹ <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prAP46737220>

¹² https://ec.europa.eu/newsroom/repository/document/2021-18/European_CloudEdge_Technology_Investment_Roadmap_for_publication_pMdz85DSw6nqPppq8hE9S9RbB8_76223.pdf

¹³ <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS46878020>

¹⁴ <https://iot-analytics.com/iot-2018-in-review/>

¹⁵ <https://iot-analytics.com/iot-2019-in-review/>

- Компания Eutelsat сообщила о намерениях запустить 25 спутников для обслуживания рынка Интернета вещей. Amazon AWS объявила, что планирует запустить группировку из 3236 низкоорбитальных спутников, чтобы предоставить доступ к интернету «необслуживаемым и недостаточно обслуживаемым территориям».
- Запущен ряд облачных платформ (VMware, Cisco, Siemens и др.), основанных на контейнерах (Kubernetes). Новая архитектура обеспечила более высокий уровень гибкости и производительности и подходит для централизованного или периферийного развертывания Интернета вещей.

В 2020 г. дополнительным импульсом к развитию Интернета вещей послужила пандемия COVID-19:

- Обозначился новый этап развития Интернета вещей – его интеграция с алгоритмами машинного обучения («искусственный интеллект вещей», AIoT). Xiaomi объявила о намерении в ближайшие пять лет инвестировать в 5G и AIoT порядка 7,2 млрд долл.¹⁶

- Международная организация по стандартизации 3GPP выпустила второй набор спецификаций для технологии 5G. Он направлен на обеспечение «сверхнадежной связи с малой задержкой» (eURLLC) и возможностей позиционирования, а также на поддержку чувствительного ко времени сетевого обмена данными (Time-Sensitive Networking, TSN), что критически важно для промышленного Интернета вещей.

За прошедшие несколько лет появились системы мониторинга и безопасности устройств Интернета вещей, аналитические центры для обработки поступающих с них больших данных. Создаются платформы Интернета вещей, которые позволяют управлять множеством устройств. Если еще недавно эти технологии ассоциировалась с промышленностью и автоматизацией, то сейчас они широко представлены практически во всех отраслях экономики и социальной сферы – энергетике, сельском хозяйстве, торговле, транспортной отрасли, здравоохранении, жилищно-коммунальном хозяйстве и управлении городской средой, экологии и природопользовании.

¹⁶ <https://iot-analytics.com/iot-2020-in-review/>

Технологии

В основе любой полноценной системы Интернета вещей лежат несколько групп технологий (рис. 3). Весь их спектр охватывают в своих разработках только компании-гиганты, при этом на рынке присутствует множество разработчиков и интеграторов, занимающих отдельные ниши.

В цепочке от первичного получения информации с помощью датчиков до облачной платформы, на которой осуществляется ее анализ, задействованы технологии передачи данных по различным каналам связи, взаимодействия

сетевого и управляющего оборудования; при этом необходимо обеспечить достаточный уровень безопасности. Каждая группа включает ряд технологий, применяемых для решения конкретных задач. Например, при построении сетей связи выбор конкретной технологии зависит от топологии и площади покрытия. Эти технологии различны для персональных и глобальных систем.

Основные группы технологий Интернета вещей имеют различный уровень зрелости.

Рис. 3. Структура высокотехнологичного направления



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Стадии (этапы) их разработки и внедрения показаны на кривой технологической зрелости (рис. 4), построенной с помощью системы интеллектуального анализа больших данных iFORA.

Технологии, связанные с передачей информации и непосредственно с каналами передачи данных, развиваются довольно давно. Именно поэтому рост рынка, как и числа исследований в данной области, замедляется. В то же время увеличение количества устройств Интернета вещей в последнее время стимулирует развитие технологий кибербезопасности. На мировом уровне наиболее активно ведутся разработки окончательных устройств, отраслевых платформ и решений именно в области информационной безопасности. По остальным группам

технологий число публикаций уже практически не растет. Так, больше всего публикаций в данной области относится к технологиям построения сетей связи, но за последние годы этот показатель менялся несущественно. Возможная причина в том, что организации занимаются не столько разработкой новых технологий, сколько их внедрением. IoT-платформы и устройства обеспечения взаимодействия физических и программных составляющих систем находятся на втором этапе развития, что соответствует нарастающим темпам патентной активности.

Результаты библиометрического и патентного анализа свидетельствуют о том, что вклад России в развитие технологий Интернета вещей пока невелик, но можно отметить

Рис. 4. Кривая технологической зрелости



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Методические пояснения. Значимость характеризует уровень зрелости технологии и отражает нормализованную упоминаемость технологии в данный период времени в публикациях соответствующего типа (научные статьи, патенты, рыночная аналитика). С учетом интенсивности исследований и разработок выделены четыре этапа:

I этап – зарождение технологии (высокая публикационная активность);

II этап – расцвет технологии (рост патентования и объема рыночной аналитики);

III этап – зрелость технологии (преобладание рыночной аналитики);

IV этап – плато (снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике).

соответствие мировым трендам по различным группам технологий, особенно в части динамики научных публикаций (рис. 5).

К числу перспективных технологий в области Интернета вещей и в смежных направлениях на горизонте до 2030 г. можно отнести технологии построения систем связи (5G mmWave, оптические сети связи, LPWA, Li-Fi), технологии кибербезопасности (включая новые алгоритмы шифрования), энерго-сберегающие технологии (алгоритмы и новую элементную базу), искусственный интеллект в привязке к данным с устройств Интернета вещей (AIoT и TinyML). В отдаленной перспективе ожидается развитие спутникового интернета и – на еще более дальнем горизонте – Интернета чувств.

Наиболее важными для развития Интернета вещей направлениями в настоящее время представляются каналы связи и производство полупроводников. Возможности российской науки в этих областях ограничены имеющейся технологической базой.

В России в фокусе исследований и разработок находится прежде всего создание аппаратных и программных составляющих конкретных устройств Интернета вещей, тогда как в ведущих странах акцент делается в первую очередь на коммуникационные технологии. Разработку решений для построения сетей Интернета вещей и протоколов функционирования в нашей стране сдерживает небольшой объем внутреннего рынка. Созданные российскими исследователями алгоритмы безопасности

Рис. 5. Основные показатели публикационной и патентной активности по группам технологий

	Научные публикации			Патентные заявки				
	Мир	Россия	Доля России, %	Мир	Россия	Доля России, %		
Технологии построения сетей связи	2020	11181	177	1,6	2019	28668	45	0,2
	2015	7307	41	↑	2015	29448	43	↑
	2010	7137	16	0,2	2010	16242	52	0,3
Протоколы и стандарты передачи данных	2020	667	12	1,8	2019	3271	10	0,3
	2015	270	4	↑	2015	2128	3	↑
	2010	128	0	0	2010	1857	1	0,1
Кибербезопасность	2020	2715	37	1,4	2019	6003	4	0,1
	2015	410	5	↑	2015	2203	0	↑
	2010	45	0	0	2010	251	0	0
Оборудование для обеспечения взаимодействия	2020	2352	46	2,0	2019	9404	35	0,4
	2015	606	4	↑	2015	4923	40	↑
	2010	117	2	1,7	2010	2555	50	2,0
Оконечные устройства	2020	7555	68	0,9	2019	3721	1	0,03
	2015	1872	15	↑	2015	1690	0	↑
	2010	169	0	0	2010	134	0	0
IoT-платформы	2020	4638	89	1,9	2019	10391	4	0,04
	2015	882	7	↑	2015	3258	1	↑
	2010	48	0	0	2010	331	0	0

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

и криптографические алгоритмы конкурентоспособны на мировом рынке.

Многие разработки отечественных организаций носят узкоспециализированный характер и предназначены для решения конкретных задач – от сбора данных с датчиков и устройств жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) до мониторинга экологической ситуации (состояния воды, воздуха) и др.

На мировом рынке уже сформировалось предложение решений на основе зарубежной компонентной базы. Актуальная технологическая задача состоит в обеспечении сбора данных с устройств на платформы обработки информации. Привлечение российских специалистов к решению данной проблемы открывает возможности для расширения присутствия России на внешних рынках.

Продукты и рынки

Рынок Интернета вещей формируют три ключевые продуктовые линейки: отраслевые платформы, аппаратные и программные системы передачи данных, устройства и приложения для различных отраслей.

К первой группе относятся платформы, объединяющие различные технологии для определенной сферы применения. Среди них наибольший объем рынка на текущий момент занимает промышленный интернет, который сохранит лидерские позиции и в ближайшей перспективе. В 2020 г. рынок достиг отметки в 216 млрд долл., а к 2028 г., по прогнозам, увеличится более чем в 5 раз – до 1,11 трлн долл.¹⁷ На рынке отраслевых платформ лидируют «цифровые гиганты», создавшие глобальные экосистемы, – IBM, Amazon, Microsoft, Cisco, Oracle, Salesforce.com, SAP, PTC¹⁸. Абсолютное первенство принадлежит компании Amazon, вложения которой в облачную платформу с 2010 г. составили 40 млрд долл. Среди ключевых продуктов следует отметить AWS IoT, ThingWorx, Microsoft Azure IoT, Google Cloud, IBM Watson, Cisco Kinetic.

В линейке аппаратных и программных систем представлены такие компании, как Infineon Technologies, Texas Instruments, Analog Devices, Qualcomm, STMicroelectronics¹⁹. Большинство из них занимаются разработкой трансиверов и устройств, с ними связанных. У лидеров бюджеты на исследования и разработки превышают 1 млрд долл. Рынок трансиверов на горизонте до 2024 г. составит 18,5 млрд долл., ожидается ежегодный прирост более чем на 10%²⁰. Среди представленных на рынке продуктов можно выделить трансивер SX1211I084TRT (Semtech), BGT24MTR12

(Infineon), MAX2829ETN + (MaximIntegrated), ADUCRF101, ADF7030-1 (AnalogDevices), XMM 6255 (Intel). Также в данной линейке будет динамично развиваться рынок сенсоров Интернета вещей, который к 2026 г. составит 29,6 млрд долл.²¹

На рынке устройств и приложений для отраслей представлено множество решений. В число компаний-лидеров входят Dell, Advantech, Apple, Aeris Communication, HTC²². Среди продуктов можно выделить Intel Galileo, Raspberry Pi, OpenMote, Трекеры ATrack, CargoSense.

Лидерство на рынке Интернета вещей принадлежит Китаю и США²³. Вместе с тем ряд разработанных российскими компаниями платформенных решений существенно превосходят зарубежные аналоги. В России к разряду надежных поставщиков цифровых технологий Интернета вещей можно отнести более 150 организаций²⁴ (и это без учета Госкорпорации «Ростех»). Ведущие телеком-компании России – МТС, Вымпелком, МегаФон, Ростелеком – выступают пионерами по внедрению отечественных решений на рынках B2C, B2B, аппаратных систем Интернета вещей, отраслевых решений и др. Сегодня в рамках профильных ассоциаций и консорциумов консолидирована значительная часть разработчиков технологий и интеграторов решений Интернета вещей, что создает основу для нового этапа развития экосистемы.

Среди аппаратных и программных систем передачи данных Интернета вещей, в том числе в промышленности, следует отметить разработки крупнейших телекоммуникационных компаний, таких как МТС (МТС IoT HUB), МегаФон

¹⁷ <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-internet-of-things-iiot-market>

¹⁸ <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/iiot-cloud-platform-market-195182.html#:~:text=The%20IoT%20cloud%20platform%20market%20is%20expected%20to%20grow%20from,USD%20of%2011.5%20billion%20by%202025.&text=Trends%20that%20are%20driving%20the,Need%20to%20increase%20operational%20efficiency>

¹⁹ <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-5g-rf-transceiver-market-to-witness-a-cagr-of-30-4-between-2020-and-2030--301098826.html>

²⁰ <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2019/05/30/1856804/0/en/RF-Transceiver-Market-to-Reach-18-5-Billion-By-2024-Registering-a-CAGR-of-11-6-P-S-Intelligence.html>

²¹ <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/sensors-iiot.asp>

²² <https://www.marketresearchfuture.com/reports/connected-iiot-devices-market-4776>

²³ https://json.tv/en/ict_telecom_analytics_view/russian-iiot-market-by-the-end-of-2019-forecast-to-2025https://unctad.org/system/files/official-document/tir2020_en.pdfhttps://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=EUR245893320

²⁴ <https://iiot.ru/catalog/>

(IoT-M2M), Билайн (Non-IP Data Delivery), Mail.Ru (IoT Platform), а также решения для передачи данных LoRaWAN НОВОУЧЕТ, СБТ, Ростелеком, Неоматика, Сеть 868, Thingenix. Производством аппаратного обеспечения с протоколами передачи данных российского происхождения занимаются компании Waviot и GoodWan. Что касается устройств и приложений для различных отраслей, в первую очередь выделяются устройства для сельского хозяйства и железнодорожных перевозок компании Cognitive Pilot, решения компании Борлас, Rubetek, iRZ Мониторинг, Сеть 868, Овен, ICB Com, Thingenix и др.

Российские разработки оборудования для обеспечения взаимодействия и окончательных устройств не уступают мировым, но основные аппаратные решения (микроконтроллеры, элементы запоминающих устройств и др.) выполнены на зарубежной элементной базе, а возможности совершенствования отечественной продукции и их экспансии на мировой рынок зависят, в первую очередь, от доступности элементной базы, объемов спроса и, следовательно, ее стоимости. Основное превосходство российских решений для Интернета вещей над зарубежными аналогами на отечественном рынке состоит в более функциональном программном обеспечении (ПО) – более эффективных алгоритмах обработки данных, решениях в области хранения данных и мониторинга и др., а также в оперативной поддержке пользователей, в том числе на русском языке. Однако на зарубежных рынках данные преимущества нивелируются.

Многие отечественные решения в сфере IoT-платформ находятся на стадии прототипа и проходят тестирование. В качестве успешного примера таких разработок можно отметить платформу промышленного Интернета вещей ГК «Цифра» (Zyfra Industrial IoT Platform). Аналогичная ситуация на рынке отраслевых платформ и промышленного ПО. Большинство российских компаний в сфере Интернета вещей занимаются преимущественно интеграцией зарубежных решений. Исключение составляют телеком-операторы, разрабатывающие собственные аппаратные платформы, например МТС NB-IoT Development Kit.

Большинство новых индустриальных цифровых платформ выполняются с использованием открытого кода, и Россия здесь не исключение. Компании Яндекс, VK (Mail.ru), PostgresPro являются контрибуторами международных проектов с открытым кодом, но влияние отечественных компаний в этой сфере пока невелико. Ситуация может измениться в случае реализации российских предложений ведущими мировыми разработчиками аппаратных частей и инфраструктуры, что в ближайшей перспективе не представляется возможным (в том числе ввиду санкций) без активной работы на международных площадках. Развитие российских платформенных решений на отечественном рынке перспективно в области индустриального Интернета вещей, в том числе в рамках разрабатываемых Госкорпорацией «Ростех» систем мониторинга производственных систем²⁵.

²⁵ <https://rostec.ru/news/razrabotka-rostekha-obepechit-rost-effektivnosti-promyshlennogo-oborudovaniya-do-30/>

Государственная поддержка

Зарубежные страны применяют широкий спектр мер и инструментов государственной поддержки развития Интернета вещей. Это грантовое финансирование создания новых решений; совершенствование регулирования, включая технологические стандарты; инвестиции в развитие цифровой инфраструктуры, включая развертывание сетей 5G; финансирование программ обучения, повышения квалификации и переподготовки кадров; налоговые льготы и преференции; приоритетные госзакупки передовых решений компаний-резидентов. Проводимая в зарубежных странах политика направлена на развитие новых производственно-сбытовых цепочек и бизнес-моделей, поддержку быстрорастущих компаний и содействие их выходу на международный рынок, стимулирование притока в страну высококвалифицированных специалистов.

В США закон о планировании и межведомственной координации поддержки развития Интернета вещей был принят в 2016 г.²⁶ В Китае соответствующая директива была одобрена в 2013 г.²⁷ Основные инвестиции предусматриваются в рамках проектов и планов перехода к Индустрии 4.0, создания умных фабрик и развития киберфизических систем, в ряде случаев – проектов умного города. Стимулирование развития Интернета вещей предусмотрено в стратегии цифрового развития Германии (Digital Strategy 2025)²⁸ и стратегии «Сделано в Китае 2025» (Made in China 2025)²⁹. В отдельных случаях крупные города разрабатывают собственные комплексные дорожные карты внедрения технологий Интернета вещей. Характерным примером является Нью-Йорк³⁰. В ЕС стратегия развития

Интернета вещей следующего поколения реализуется в рамках крупнейшей программы исследований и инноваций «Горизонт Европы» (Horizon Europe), ранее – «Горизонт 2020» (Horizon 2020). В дополнение к этому действует программа Европейской комиссии «Цифровая Европа» (Digital Europe), согласно которой компаниям, гражданам и государственным администрациям ЕС предоставляются данные и облачные сервисы с целью создания общеевропейского пространства данных в различных секторах. Задачи по развитию Интернета вещей предусмотрены в стратегических, программных и плановых документах Австралии³¹, Великобритании³², Германии³³, Канады³⁴, Нидерландов³⁵, Сингапура³⁶, США³⁷, Республики Корея³⁸.

В результате реализации программ поддержки обеспечиваются разработка и внедрение устройств Интернета вещей для различных сфер применения: обеспечения измерений и исправной работы оборудования (США, Китай), мониторинга энергопотребления (США, Китай, Республика Корея), контроля за состоянием медицинских холодильников (США), теплиц в сельском хозяйстве (США, Япония), оборудования для мониторинга движения транспортных средств (Китай, Япония, Великобритания, Германия) и устройств для умного города (Китай, Япония, Республика Корея, Великобритания), для медицинской реабилитации (Япония) и пр.

Наиболее развитые экосистемы, обеспечивающие кооперацию бизнеса, научных организаций и государственных структур в целях внедрения Интернета вещей, складываются на базе альянсов и консорциумов, в том числе

²⁶ <https://www.congress.gov/115/bills/s88/BILLS-115s88rfh.pdf>

²⁷ <https://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/16531-China-IoT-Report-LR.pdf>

²⁸ <https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/EN/Publikation/digital-strategy-2025.html>

²⁹ https://www.uschamber.com/sites/default/files/final_made_in_china_2025_report_full.pdf

³⁰ https://www1.nyc.gov/assets/cto/downloads/iot-strategy/nyc_iiot_strategy.pdf

³¹ <https://www.csiro.au/en/Do-business/Futures/Reports/Future-Industries/Advanced-manufacturing-roadmap>

³² https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/664563/industrial-strategy-white-paper-web-ready-version.pdf

³³ <https://www.bmbf.de/bmbf/en/research/hightech-and-innovation/high-tech-strategy-2025/high-tech-strategy-2025.html>

³⁴ [https://www.ic.gc.ca/eic/site/062.nsf/vwapj/Digitalcharter_Report_EN.pdf/\\$file/Digitalcharter_Report_EN.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/062.nsf/vwapj/Digitalcharter_Report_EN.pdf/$file/Digitalcharter_Report_EN.pdf)

³⁵ <https://www.government.nl/documents/reports/2018/06/01/dutch-digitalisation-strategy>

³⁶ <https://www.imda.gov.sg/-/media/Imda/Files/SG-Digital/SGD-Framework-For-Action.pdf?la=en>

³⁷ <https://www.manufacturing.gov/sites/default/files/2021-06/Advanced-Manufacturing-Strategic-Plan-2018.pdf>

³⁸ <http://english.msip.go.kr/cms/english/>

международных. Их основные задачи – координация исследований и разработок, выстраивание эффективного взаимодействия промышленности с научными и образовательными организациями, а также с регуляторами, формирование технологических стандартов. Подобные объединения созданы во всех странах – ключевых игроках на рынке Интернета вещей.

Industry IoT Consortium³⁹ (США) располагает собственным лабораторным оборудованием, испытательными стендами и площадками для тестирования технологий в отраслях. Взаимодействие участников проходит на площадках испытательных стендов (test beds). В случае успеха проекты в сфере Интернета вещей могут быть масштабированы на международном уровне.

Internet of Things Consortium⁴⁰ (США) занимается продвижением устройств и услуг в области Интернета вещей и изучением запросов потребителей, преимущественно в таких сферах, как подключенные дома, транспорт, города, финансовый сектор и носимые устройства. В состав консорциума входят крупные компании, научные центры и государственные организации.

OMA Spec Works⁴¹ – международный альянс, который продвигает использование протокола LwM2M для подключения умных устройств.

Edge Computing Consortium⁴² (Китай) служит платформой для сотрудничества в индустрии периферийных вычислений. Включает такие организации, как Huawei Technologies, Шэньянский институт автоматизации Китайской академии наук, CAICT, Intel, ARM Holdings и iSoftStone Information Technology (Group).

Alliance for Internet of Things Innovation⁴³ (ЕС) обеспечивает продвижение, исследования, развитие, стандартизацию технологий Интернета вещей для внедрения на европейских предприятиях. В его состав входят исследовательские центры и университеты, компании – разработчики технологий, производители телеком-устройств⁴⁴.

Ассоциация KNX (ЕС) включает конкурирующие между собой компании, которые объединены вокруг интерфейса KNX, что обеспечивает полное взаимодействие решений для домашней (умный дом) и промышленной автоматизации.

В разработке международных стандартов весомую роль играет Международный союз электросвязи, в Секторе стандартизации которого создана Исследовательская комиссия 20, работающая в области Интернета вещей.

В нашей стране существенную роль в развитии экосистемы Интернета вещей играют Ассоциация участников рынка интернета вещей (АИВ) и консорциум Центра компетенций Национальной технологической инициативы по направлению «Технологии беспроводной связи и интернета вещей».

Активное распространение Интернета вещей в России началось относительно недавно – в 2016–2017 гг. В 2017 г. было утверждено несколько ключевых стратегических, программных и плановых документов. Дорожная карта «Технет»⁴⁵ направлена на внедрение ИТ-систем для управления и проектирования промышленных производств при создании «фабрик будущего». Важной вехой стало принятие национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации»⁴⁶. В 2017 г. было создано несколько профильных структур для развития промышленного интернета, в частности Технический комитет Росстандарта 194 «Кибер-физические системы» (ТК 194)⁴⁷ и Национальная платформа промышленной автоматизации⁴⁸. В конце 2018 г. Минпромторг России и Росстандарт утвердили Перспективный план стандартизации в области передовых производственных технологий на 2018–2025 годы⁴⁹, которым предусмотрена разработка более 70 нормативно-технических документов, в том числе в области Интернета вещей, промышленного Интернета вещей, больших данных, искусственного интеллекта, а также стандартов киберфизических систем и умного производства.

³⁹ <https://www.iiconsortium.org/>

⁴⁰ Internet of Things Consortium. Режим доступа: <https://iofthings.org/>

⁴¹ <https://omaspecworks.org/>

⁴² <http://www.ecconsortium.net/>

⁴³ <https://aioti.eu/>

⁴⁴ <https://aioti.eu/members/>

⁴⁵ https://nti2035.ru/documents/docs/DK_technet.pdf

⁴⁶ <http://static.government.ru/media/files/9gFM4FHj4PsB7915v7yLVuPgu4bvR7M0.pdf>

⁴⁷ <http://tc194.ru/>

⁴⁸ <http://nppa.ru/>

⁴⁹ <https://nti2035.ru/upload/iblock/41c/41cb2bc4c3bad4a7b6a2d99486abfdad.pdf>

В 2019 г. утвержден национальный стандарт для Интернета вещей «Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала NB-Fi»⁵⁰, ставший первым в целой серии стандартов в данном направлении, в том числе для LoRaWAN RU⁵¹. В 2021 г. Росстандарт утвердил вторую серию национальных стандартов⁵² в области Интернета вещей, сенсорных сетей, а также промышленного Интернета вещей.

В России технологии Интернета вещей внедряются прежде всего в промышленности, ЖКХ, сельском хозяйстве. Среди важных направлений их использования – экологический мониторинг, пожарная безопасность, метеорологическое наблюдение. В последние годы высокими темпами осуществляется цифровизация сферы ЖКХ, внедрение умных энергетических сетей (smart grids) и «интеллектуальных» счетчиков (smart meters). Несмотря на это, темпы внедрения Интернета вещей в ЖКХ были незначительными вплоть до 2020 г. В 2020 г. вступил в силу Федеральный закон от 27 декабря 2018 г. № 522-ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации», согласно которому гарантирующие поставщики электроэнергии обязаны за свой счет устанавливать приборы учета в многоквартирных домах, а сетевые компании – в коммерческом секторе и частных домах.

В 2019 г. реализован проект по установке на ключевом уральском центре электроэнергетики нового цифрового комплекса для предотвращения нарушения устойчивости энергосистемы⁵³. В этом же году открыт Центр инноваций и Интернета вещей в здравоохранении⁵⁴. Реализуется ряд проектов умных городов и районов в Москве, Санкт-Петербурге, Казани, Екатеринбурге, а также в небольших городах, например Иннополисе и Сарове.

Дорожная карта развития высокотехнологичного направления «Интернет вещей», реализуемая в рамках соглашения между Правительством Российской Федерации и Госкорпорацией «Ростех», включает следующие цели:

- создание условий для развития технологий, в том числе формирование благоприятной регуляторной среды посредством преодоления нормативно-правовых барьеров, гармонизации существующих и создаваемых стандартов;
- обеспечение условий для создания коммерчески успешных платформ, сервисов и решений на базе Интернета вещей;
- достижение синергии в части интероперабельности разрабатываемых отечественных протоколов передачи данных, программного обеспечения, платформ и сервисов на их основе для Интернета вещей.

Во исполнение обязательства по указанному соглашению Госкорпорацией «Ростех» создан центр компетенций по высокотехнологичной области «Интернет вещей».

Правительством Российской Федерации определены следующие приоритетные направления внедрения Интернета вещей в отраслях экономики и социальной сферы: экологический мониторинг (системы контроля промышленных выбросов особо опасных и вредных производств), технологическая безопасность (системы контроля производственных процессов), ЖКХ (системы мониторинга потребления коммунальных услуг), умный дом, умный город, мониторинг и управление общественным транспортом, дорожное строительство (RFID-метки, автоматизация управления техникой / автономная техника), метеорологическое наблюдение (системы мониторинга погодных условий), пожарная безопасность (системы контроля пожарной безопасности), маркировка древесины ценных лесных пород (системы отслеживания заготовки и реализации древесины ценных лесных пород).

⁵⁰ <https://docs.cntd.ru/document/1200162760>

⁵¹ Там же.

⁵² <https://docs.cntd.ru/document/1200177821>

⁵³ https://iotas.ru/media/news_iiot/806/

⁵⁴ <https://iothealthcare.sk.ru/>

Перспективы развития

Интернет вещей – сквозное высокотехнологичное направление с быстрорастущими рынками. Оно представляет собой не набор разрозненных технологий, а экосистему, в основе которой лежат платформы, обеспечивающие взаимодействие конечных устройств, специальных приложений, интеграцию данных и формирование аналитики. В полной мере потенциал Интернета вещей раскрывается для потребителей только в связке с использованием комплиментарных технологий, а именно «IoT + BigData + AI + Cloud + 5G».

В последние годы активное внедрение технологий Интернета вещей и возрастающие потребности различных отраслей привели к насыщению российского рынка зарубежными решениями. Большинство отечественных компаний в данном сегменте выступают в роли интеграторов и используют преимущественно зарубежные программные и аппаратные решения. Однако имеются успешные российские IoT-платформы, которые прошли серию пилотных внедрений. Также можно отметить отечественные разработки оборудования для обеспечения взаимодействия и оконечных устройств, не уступающие мировым лидерам (в основном выполнены на зарубежной элементной базе). Внедрение Интернета вещей в нашей стране зачастую осуществляется точно, без построения соответствующей глобальной инфраструктуры, что приводит к снижению экономического эффекта.

В некоторых сегментах рынка Интернета вещей (включая аппаратную базу – сенсоры, процессоры) доминируют компании – устоявшиеся мировые лидеры в области электроники, что существенно затрудняет вход в эти сегменты новых игроков. В то же время рынки устройств и приложений Интернета вещей для отраслей достаточно сильно фрагментированы и конкурентны, с десятками тысяч компаний и сравнительно низкими барьерами входа. У российских предприятий здесь есть возможности

для продвижения и усиления своих позиций. Однако выход отечественных продуктов на международный рынок невозможен без полноценной базовой инфраструктуры мирового масштаба. Кроме того, необходимо обеспечить участие российских организаций-лидеров в деятельности международных консорциумов и альянсов в сфере Интернета вещей, в том числе в целях продвижения отечественных разработок и стандартов на глобальном рынке.

Внедрение Интернета вещей предусматривается стратегическими направлениями цифровой трансформации отраслей⁵⁵ и инициативами социально-экономического развития до 2030 г.⁵⁶ Они определяют следующие целевые ориентиры в данной области, переключаясь с приоритетами, предусмотренными в дорожной карте:

- энергетика – оснащение потребителей интеллектуальными приборами учета электроэнергии и газа; сбор данных предприятиями ТЭК с помощью технологий Интернета вещей; оснащение производственного персонала цифровыми носимыми устройствами; внедрение Интернета вещей в рамках распределенных интеллектуальных энергосистем;
- промышленность – использование промышленного Интернета вещей, сбора данных и диспетчерского контроля для управления процессами в реальном времени;
- городское хозяйство и ЖКХ – создание центра компетенций по умному дому; внедрение интеллектуального управления коммунальной (инженерной) инфраструктурой (умный водоканал, умное теплоснабжение, умное городское освещение), систем диспетчеризации и автоматизированных систем управления технологическими процессами, в том числе с использованием беспроводной инфраструктуры связи,

⁵⁵ Разработаны федеральными органами исполнительной власти и утверждены серией распоряжений Правительства Российской Федерации в конце 2021 – начале 2022 г.

⁵⁶ Утверждены распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 октября 2021 г. № 2816-р.

как для многоквартирных домов, так и для индивидуального жилищного строительства организованных поселков, для бесшовного (end-to-end) оказания цифровых услуг;

- транспорт – предиктивная аналитика, моделирование транспортных потоков с применением технологий искусственного интеллекта и больших данных, в том числе собираемых устройствами Интернета вещей; внедрение Интернета вещей в рамках создания беспилотных логистических коридоров, развитие автономного судовой и беспилотной аэродоставки грузов (аэротакси);
- сельское хозяйство – реализация сервисов дистанционного мониторинга состояния почвы и растений для различных приложений (детекция сорняков, цифровое фенотипирование растений, выявление заболеваний и т.п.); внедрение цифровых платформ управления производством, облачных систем управления киберфизическими системами и Интернетом вещей, прогностических платформ;
- здравоохранение – дистанционный мониторинг состояния здоровья с использованием персональных медицинских помощников.

Для широкого внедрения Интернета вещей необходимо развитие нормативного регулирования и государственной поддержки. В ближайшее время, в частности, требуется обеспечить⁵⁷:

- поддержку разработки и внедрения технологий Интернета вещей за счет длинных дешевых кредитов (в рамках постановления Правительства Российской Федерации от 5 декабря 2019 г. № 1598) и грантов;
- формирование перечня перспективных решений Интернета вещей для поддержки экспорта;
- разработку стандарта умного здания;
- формирование перечня крупных проектов в области Интернета вещей в России

(в том числе в части разработки и производства «базового слоя» цифровой инфраструктуры);

- актуализацию нормативных правовых актов, определяющих и закрепляющих статус устройств, приложений и сервисов на базе технологии Интернета вещей на территории Российской Федерации; направленных на защиту информации для Интернета вещей на территории Российской Федерации; закрепляющих статус отечественного оборудования и программного обеспечения Интернета вещей на территории Российской Федерации⁵⁸;
- продвижение в Международном союзе электросвязи (МСЭ) и Региональном содружестве в сфере связи стандартов (рекомендаций) и других документов в области Интернета вещей, внесение предложений от имени России в международные и региональные стандарты Международной организации по стандартизации (ИСО), Международной электротехнической комиссии (МЭК)⁵⁹;
- разработку и актуализацию стандартов в области Интернета вещей на национальном уровне, их гармонизацию с международными стандартами⁶⁰.

В среднесрочной перспективе (до 2024 г.) целесообразно⁶¹:

- внедрить меры поддержки для развертывания «базового слоя» цифровой инфраструктуры (сенсоров, актуаторов, камер), а также для миграции с зарубежных решений Интернета вещей;
- разработать нормативные правовые акты по сбору, анализу и хранению данных в разных отраслях, а также комплекс открытых индустриальных стандартов для оптимизации процессов обмена данными между участниками рынка, осуществляющими их сбор, хранение и обработку.

Развитие Интернета вещей невозможно без создания условий для масштабирования

⁵⁷ Предложения, сформированные на площадке АНО «Цифровая экономика».

⁵⁸ Согласно дорожной карте развития высокотехнологичной области «Интернет вещей».

⁵⁹ План (дорожная карта) реализации Концепции построения и развития узкополосных беспроводных сетей связи «Интернета вещей» на территории Российской Федерации.

⁶⁰ Согласно дорожной карте развития высокотехнологичной области «Интернет вещей».

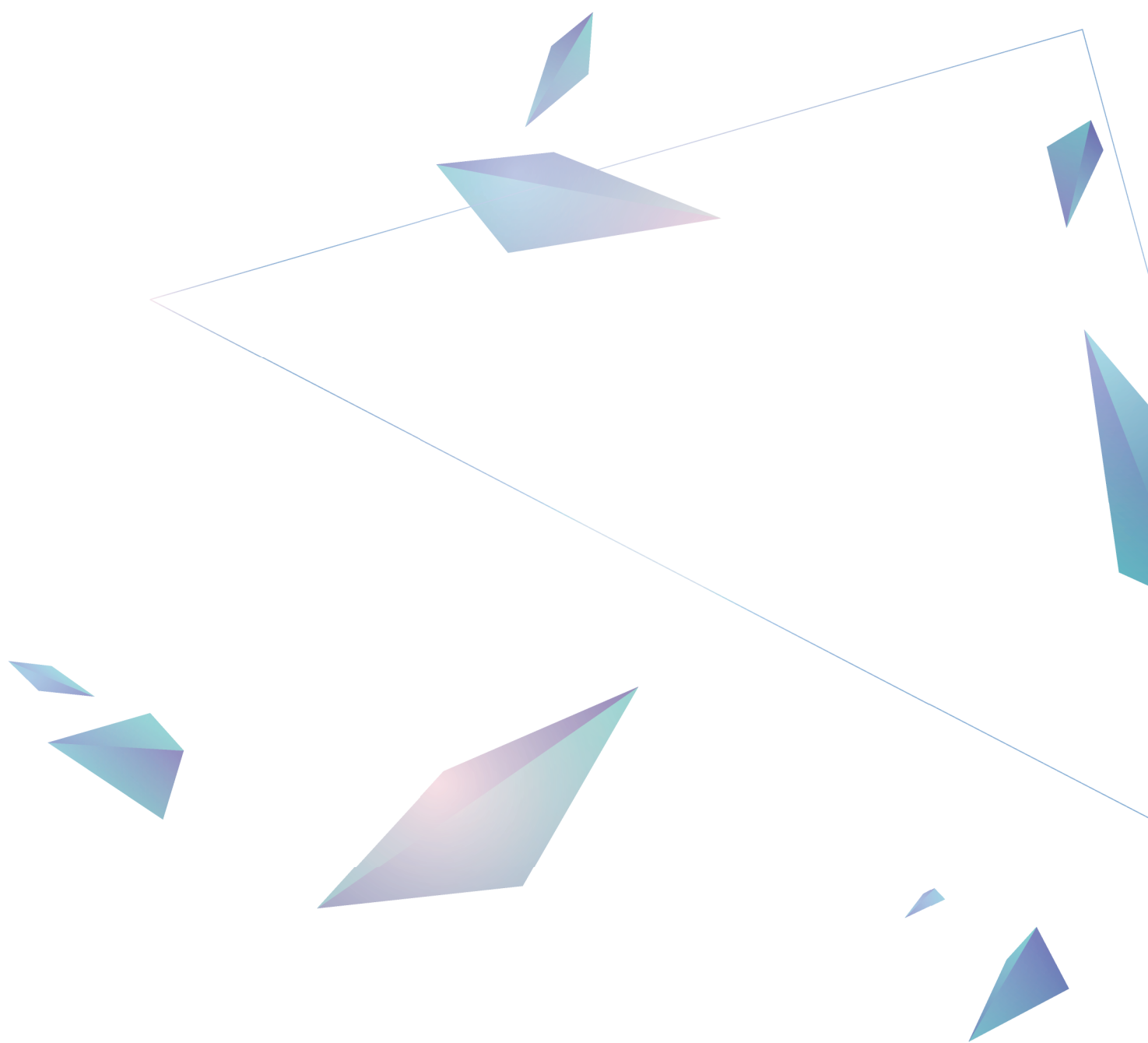
⁶¹ Предложения, сформированные на площадке АНО «Цифровая экономика».

деятельности молодых и перспективных российских инновационных компаний, в том числе за счет стимулирования внутреннего спроса на продукцию и услуги в сфере Интернета вещей со стороны государства, крупных компаний (включая компании с государственным участием) и частного бизнеса. В числе необходимых условий эффективного развития Интернета вещей в нашей стране прежде всего следует отметить:

- стимулирование развития рынков продукции и услуг в сфере Интернета вещей, в том числе спроса со стороны государства и крупных компаний;

- государственную поддержку (включая софинансирование) разработки и внедрения новых технологий (гранты, субсидии, льготные кредиты на внедрение в рамках федерального проекта «Цифровые технологии», Национальной технологической инициативы);
- развитие нормативного регулирования как в части снятия барьеров для разработки и внедрения технологий Интернета вещей, так и в части установления ограничений и требований по использованию отечественных решений.

Мобильные сети связи пятого поколения



Сокращения

БС	базовая станция
ИКТ	информационно-коммуникационные технологии
ПО	программное обеспечение
5G	мобильные сети связи пятого поколения
6G	мобильные сети связи шестого поколения
AR/VR	дополненная и виртуальная реальность
eMBB (Enhanced Mobile Broadband)	расширенный мобильный широкополосный доступ, отличающийся значительно более высокой скоростью, низкой задержкой сигнала и поддержкой высокого числа подключений
LTE (Long-Term Evolution)	наиболее распространенный стандарт мобильной связи четвертого поколения
MEC (Mobile Edge Computing)	мобильные граничные вычисления
mMTC (Massive Machine Type Communications)	массовые машинные коммуникации с помощью большого числа подключенных устройств с низким энергопотреблением
mmWaves	миллиметровые волны
QoS (Quality of Service)	качество обслуживания
SEP (Standard Essential Patents)	патенты, относящиеся к стандартам
URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications)	связь с высокой надежностью и сверхнизкой задержкой передачи данных
XR (Extended Reality)	расширенная реальность

Цифровые технологии стремительно меняют мир. Каждый человек ощущает их влияние на свою жизнь, практически все отрасли экономики и социальной сферы проходят ту или иную стадию цифровой трансформации. Темпы изменений столь высоки, что ключевым фактором сохранения конкурентоспособности отдельных предприятий и целых секторов становится способность быстро адаптировать бизнес-модели к новым реалиям цифровой экономики.

Идеологи и практики интернета более 20 лет назад предвидели, что успех любой индустрии – от медицины до сталелитейной промышленности – в ближайшем будущем будет определять не столько оптимизация ее структур и процессов, сколько научно-технический прорыв в области цифровых технологий. «Кровеносной системой» для новых форм организации производства становятся мощные и гибкие цифровые сети. Решение огромного пласта технологических задач цифровой экономики будет доступно благодаря мобильным сетям связи пятого поколения. Они будут способствовать внедрению

современных технологий в отраслях экономики и социальной сферы, а вслед за этим сделают возможными масштабную цифровизацию, роботизацию и автоматизацию многих промышленных процессов. Формируется новая парадигма: сети связи становятся универсальной платформой, технологической основой изменения жизни и работы человека, социальной и экономической деятельности общества во всем мире.

В июле 2019 г. была достигнута договоренность между Правительством Российской Федерации, Госкорпорацией «Ростех» и ПАО «Ростелеком» о совместном развитии высокотехнологичного направления «Мобильные сети связи пятого поколения». Стороны заключили соглашение о намерениях, в соответствии с которым разработана дорожная карта¹ и распределены зоны ответственности за развитие 5G в России. В рамках дорожной карты Госкорпорация «Ростех» отвечает за разработку телекоммуникационной продукции для мобильных сетей связи 5G, а ПАО «Ростелеком» – за создание инфраструктуры и соответствующих сервисов, услуг и цифровых платформ.

Что такое мобильные сети связи пятого поколения?

Мобильные сети связи – это основа критической информационной инфраструктуры развитых стран. Сейчас это уже не технологическое преимущество, а базовая потребность, ключевой ресурс большинства отраслей. С массовой цифровизацией и внедрением информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) последнее поколение сетей мобильной связи стало влиять на все производственные процессы, отрасли, экономику в целом, меняя их быстро и кардинально. Технологии и сервисы 5G становятся фундаментом цифровой трансформации,

инфраструктурной и технологической основой новых бизнес-моделей и отраслевых сценариев развития.

Исключительная важность технологии 5G для информационной инфраструктуры требует технологической независимости в этой области. Это означает, что оборудование и программное обеспечение, на базе которых будут разворачиваться сети и сервисы 5G для потребителей в России, должны разрабатываться и производиться локально, с минимальной зависимостью от зарубежных поставщиков. При этом

¹ Дорожная карта развития высокотехнологичной области «Мобильные сети связи пятого поколения», утвержденная протоколом заседания президиума Правительственной комиссии по цифровому развитию, использования информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности от 16 ноября 2020 г. № 27. Является основным механизмом реализации соглашения о намерениях между Правительством РФ, Госкорпорацией «Ростех» и ПАО «Ростелеком» от 10 июля 2019 г., заключенного в соответствии с распоряжением Правительства РФ от 08 июля 2019 г. № 1484-р в целях развития мобильных сетей связи пятого поколения.

внутренние разработки должны соответствовать мировым стандартам, а цифровые решения отечественного производства – быть конкурентоспособными на мировом рынке. Кроме очевидных соображений национальной безопасности, телекоммуникационное оборудование сетей 5G – это наиболее быстро растущий сегмент рынка телекоммуникационного оборудования, который сам по себе является драйвером для смежных технологических областей. Так, по оценкам экспертов, телекоммуникационное оборудование потребляет более 35% всей электронной компонентной базы, производимой в мире.

К настоящему моменту все ведущие страны (США, Китай, Республика Корея, Япония, крупнейшие страны ЕС, Великобритания и др.) отмечают исключительную важность 5G для развития экономики и стратегической безопасности инфраструктуры. Отдельные страны-лидеры, в первую очередь Китай и США, уже сформировали существенный научно-технологический задел в этой области.

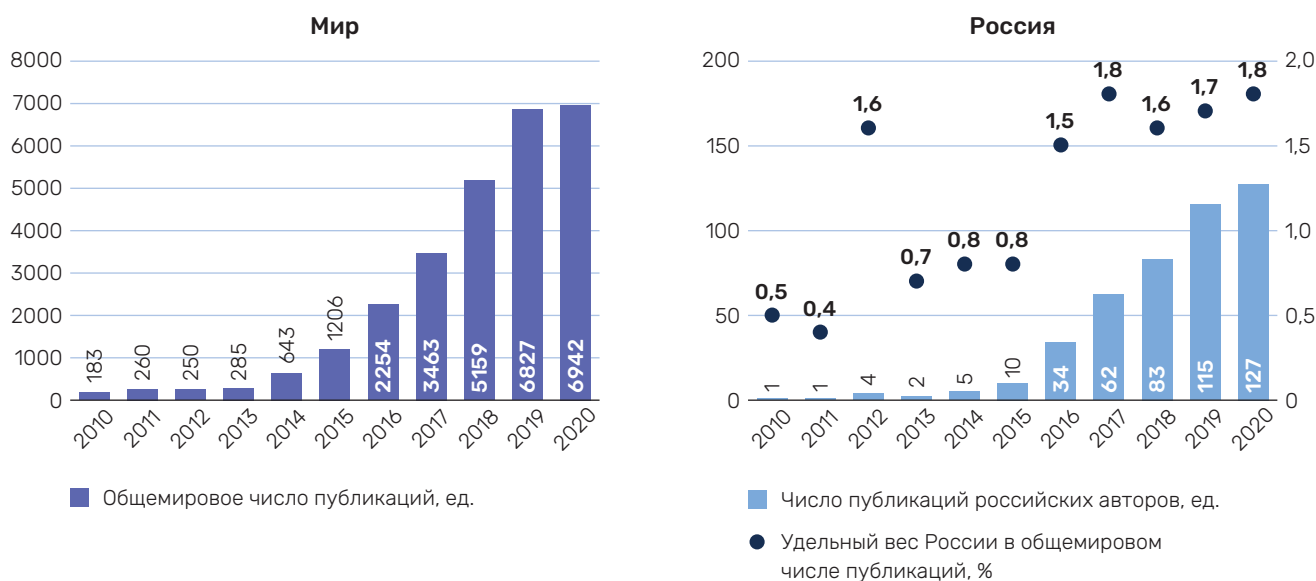
Китай с довольно значительным отрывом лидирует по фундаментальным (порядка четверти всех научных публикаций в мире за последние три года) и прикладным исследованиям (практически половина всех патентных заявок за 2017–2019 гг.). В тройку лидеров входит

и США, при этом объем патентования здесь почти в 4 раза ниже, чем в Китае. В топ-5 по уровню публикационной активности входят также Индия, Великобритания и Германия, по числу заявок на патенты – Республика Корея, Япония и Швеция. Россия по обоим показателям замыкает двадцатку лидеров.

Всего к концу 2020 г. в мире было опубликовано порядка 30 тыс. научных статей, посвященных исследованиям технологий 5G, более половины из них – за последние три года (рис. 1). Доля российских научных публикаций в этой области в 2020 г. выросла до 1,8%, что в целом сопоставимо с другими высокотехнологичными направлениями. При этом наиболее значительный рывок произошел в 2016 г., когда число российских публикаций выросло более чем в три, а их доля в мире – почти в два раза.

Число заявок на патенты в мире с 2015 г. растет крайне динамично, только за 2019 г. оно увеличилось на 42% (рис. 2). В большой степени это обеспечивается патентной активностью Китая, где прирост в том же году составил 70%. Количество российских патентных заявок в последние несколько лет остается незначительным и составляет всего лишь 0,1% от общемирового. Это свидетельствует о более низком уровне зрелости технологий 5G в России по сравнению с ведущими странами.

Рис. 1. Ключевые показатели публикационной активности



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Лидерами патентования выступают компании Huawei, Nokia, Qualcomm, Ericsson, BBK Electronics, Samsung. Риски в данной области связаны с тем, что подавляющее большинство патентов компаний-олигополистов являются «патентами, относящимися к стандартам» (SEP, standard essential patents). Без лицензий на SEP-патенты ни одна компания не может вывести на рынок телекоммуникационное оборудование или создать архитектуру сетей 5G. Для компаний – держателей SEP-патентов создаются условия для получения сверхприбыли («золотые шахты роялти»²), а предприятия-производители понесут большие затраты, связанные с легальным использованием запатентованных технологий.

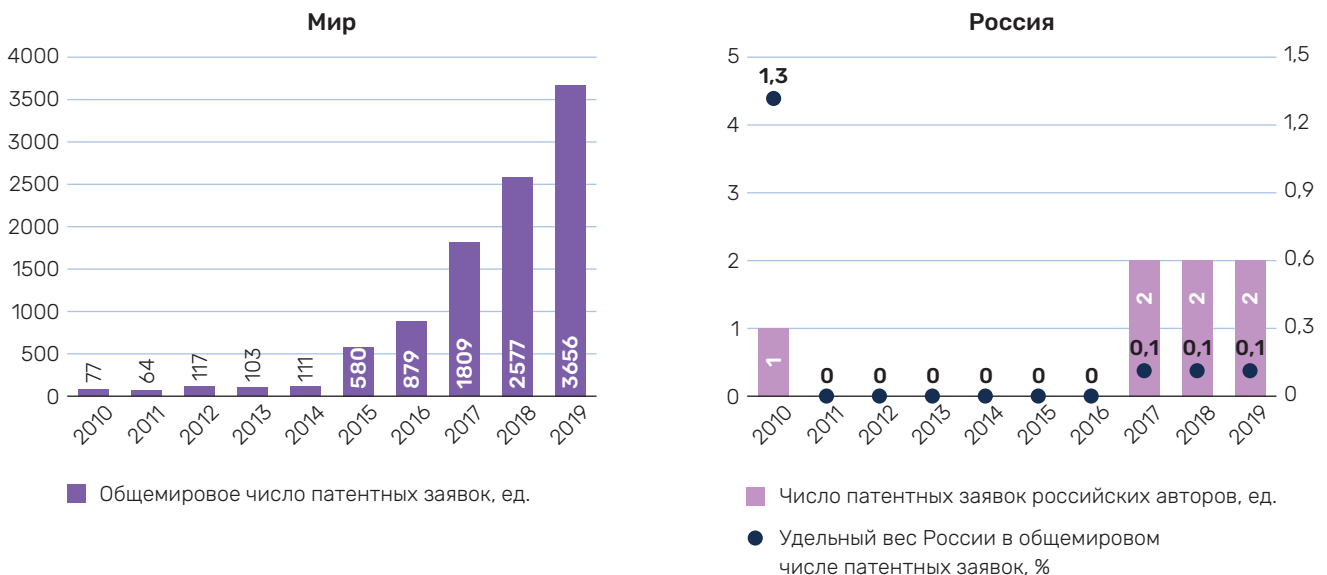
Приоритетность развития мобильных сетей связи пятого поколения подтверждается непрерывно возрастающим объемом инвестиций в данную область со стороны национальных правительств и крупных телекоммуникационных компаний. В 2019 г. глобальный объем инвестиций в инфраструктуру сетей связи 5G составил 4,1 млрд долл., а в 2020 г. – уже более 8,1 млрд долл. (не учитывая «закрытые» данные по Ки-

таю, где развернуто более 70% мировой инфраструктуры сетей 5G)³.

В основном в разработку инфраструктуры 5G (сетевое оборудование) инвестируют крупнейшие производители оборудования для операторов связи: Huawei, Ericsson, Nokia, ZTE, а также Samsung (эти пять компаний занимают 95% рынка оборудования мобильной связи операторского класса)⁴. Общий объем их инвестиций в исследования и разработки в 2020 г. превысил 30 млрд долл., приблизительно 80% этих расходов приходится на сетевое оборудование для мобильной связи. При этом затраты лидирующих компаний на исследования и разработки постоянно возрастают (порядка 30–40% за последние пять лет).

На пятилетнем горизонте ожидается взрывной рост рынка 5G: с 2020 по 2026 г. его объем может вырасти более чем в 100 раз – до 667,9 млрд долл.⁵ Уже в 2021–2022 гг. прогнозируется резкое увеличение спроса, связанное с повышением уровня технологической зрелости решений на основе 5G и расширением доступности соответствующих сервисов.

Рис. 2. Ключевые показатели патентной активности



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

² <https://venturebeat.com/2019/05/02/china-dusts-the-u-s-finland-and-south-korea-with-34-of-key-5g-patents/>

³ <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/gartner-says-worldwide-5g-network-infrastructure-spending-to-almost-double-in-2020>

⁴ <https://www2.deloitte.com/xe/en/insights/industry/technology/technology-media-and-telecom-predictions/2021/radio-access-networks.html/#endnote-15>

⁵ <https://www.alliedmarketresearch.com/5g-technology-market>

Технологии

Технологии 5G применяются как для создания инфраструктурной основы сетей связи (функциональные модули и компоненты сети), так и для разработки приложений, сервисов и платформенных решений (рис. 3). В настоящее время на мировом рынке представлен целый ряд решений, включая оборудование и программное обеспечение, достаточно высокой степени готовности.

Отправной точкой для внедрения прикладных решений в области 5G во многих странах становится выделение необходимых частот, без которых невозможно функционирование сетей пятого поколения. С 2018 г. идет активная «расчистка» диапазонов под сети связи 5G: аукционы частот уже прошли в США, Республике Корея, Великобритании, Канаде, Чехии, Австрии, Германии, Греции, Нидерландах и других странах.

По темпам распространения 5G обгоняет стандарты предыдущих поколений. В 2018 г. впервые была запущена сеть 5G в тестовом режиме. В 2019 г. в Республике Корея появилась первая в мире общенациональная коммерческая сеть 5G. К концу 2020 г. сети 5G покрывали порядка 80% территории Сеула и 30% – шести других крупных городов. Через два года после первого запуска каждый пятый интернет-пользователь в Корее получил доступ к сетям 5G (всего более 13 млн абонентов)⁶.

Сегодня практически все группы технологий 5G переживают период активного роста и коммерциализации, хотя и различаются по уровню технологической зрелости (рис. 4). Разнятся и доли соответствующих телекоммуникационных рынков по разным технологиям. Например, согласно исследованию Ericsson⁷, темпы роста рынка абонентских устройств 5G значительно опережают общую динамику рынка смартфонов

(т. е. устройства 5G будут постепенно вытеснять устройства, предназначенные для систем связи предыдущих поколений).

Основной драйвер роста рынка абонентских устройств 5G – развитие Интернета вещей, включая сенсоры, датчики и другое оборудование (среднегодовой темп роста – 73%)⁸. В частности, распространение промышленного Интернета вещей и расширение спектра его применения (автоматизация производства, умные города, энергоэффективные сети и др.) повышают востребованность абонентских устройств 5G.

Вероятно, наиболее быстро будут распространяться сервисы и платформы на базе 5G. В последнее время, в первую очередь в связи с пандемией COVID-19, четко наметилась тенденция роста спроса на приложения, которые минимизируют физический контакт между людьми (средства для организации виртуальных встреч и конференций, удаленного обучения, телемедицины, потоковой передачи данных и др.), что создает повышенную потребность, например, в технологиях дополненной и виртуальной реальности (AR/VR). Полномасштабное внедрение данных технологий невозможно без развития соответствующей инфраструктуры сетей связи нового поколения, обеспечивающих передачу и обработку больших объемов данных с приемлемой задержкой и высоким качеством обслуживания (QoS).

Среди перспективных направлений реализации сетей связи нового поколения – переход в диапазон миллиметровых волн (mmWaves), а также принципиально новые методы цифровой обработки данных (новые методы модуляции, помехоустойчивого кодирования и др.), технологии и методы множественного доступа и мультиплексирования (в том числе неортогонального множественного доступа и агрегации несущих),

⁶ <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/35780/Entering-the-5G-Era-Lessons-from-Korea.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

⁷ <https://www.ericsson.com/4ad7e9/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2021/ericsson-mobility-report-november-2021.pdf>

⁸ https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/5g-iot-market-164027845.html?gclid=EAlalQobChMlr7-3i4_J8glV10eRBR15uAEbEAAAYAiAAEgJa3fD_BwE

Рис. 3. Структура высокотехнологичного направления



Источники: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ; Сколковский институт науки и технологий.

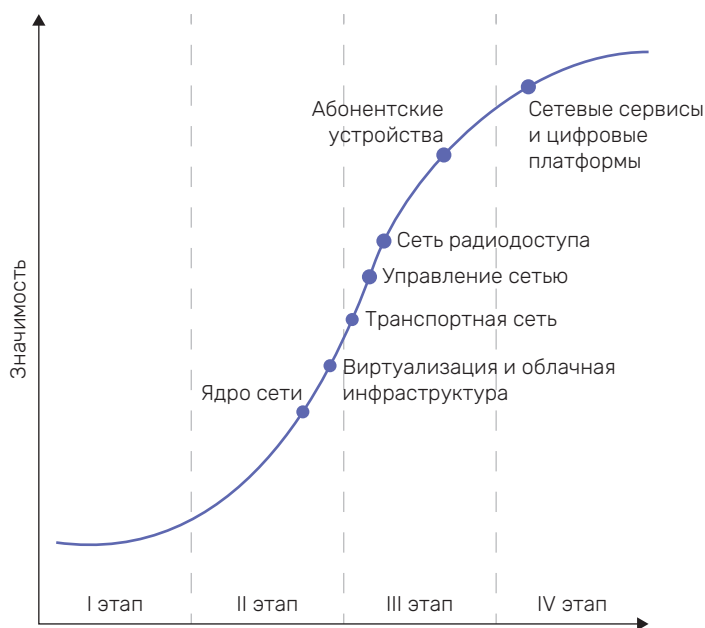
технологии и методы планирования радиоресурсов, включая методы «нарезки» и динамического выбора параметров радиоресурсов, технологии и методы многоантенной передачи данных (включая алгоритмы и методы формирования луча, пространственного кодирования и мультиплексирования сигналов, технологии создания активной антенной системы с решеткой излучателей и др.), технологии и методы обеспечения сверхнадежной связи с малой задержкой.

Развитие облачных приложений AR/VR, видеоприложений и многих других приложений, оперирующих большими объемами пользовательского трафика (eMBB-трафика), будет способствовать появлению новых реше-

ний в рамках технологических направлений, указанных выше, а также для других групп технологий, которые предназначены для работы с большими объемами трафика (оптимизация, сжатие, методы снижения времени отклика и др.). Ключевым условием для внедрения данных технологий является распределение спектра частот и выделение широких сантиметровых и миллиметровых диапазонов.

Для разработки промышленных решений критическое значение имеет доступность сверхнадежной связи с малой задержкой (URLLC), массового межмашинного взаимодействия (mMTC), сетевого слайсинга и граничных вычислений на базе технологии 5G.

Рис. 4. Кривая технологической зрелости



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Методические пояснения. Значимость характеризует уровень зрелости технологии и отражает нормализованную упоминаемость технологии в данный период времени в публикациях соответствующего типа (научные статьи, патенты, рыночная аналитика). С учетом интенсивности исследований и разработок выделены четыре этапа:

I этап – зарождение технологии (высокая публикационная активность);

II этап – расцвет технологии (рост патентования и объема рыночной аналитики);

III этап – зрелость технологии (преобладание рыночной аналитики);

IV этап – плато (снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике).

Ввиду тесной взаимосвязи между всеми группами технологий 5G вслед за рынком абонентских устройств активно развиваются прочие технологии. При этом процессы стандартизации и патентования фактически завершены, поэтому объем инвестиций в такие направления, как ядро сети, сеть радиодоступа, транспортная сеть, управление сетью, будут постепенно снижаться, в то время как объем выпускаемой продукции, основанной на данных технологиях, будет расти и замещать оборудование для предыдущих поколений связи.

По числу патентных заявок в мире абонентские устройства значительно опережают остальные группы технологий (рис. 5). Их количество в 2019 г. сопоставимо с суммарным числом заявок по другим направлениям. В то же время по мере роста уровня готовности инфраструктурных решений и компонентов сети интерес бизнеса смещается в сторону разработки и коммерциализации сетевых сервисов и цифровых платформ. Именно в этой области наиболее динамично нарастает уровень патентной активности: в 2019 г. число патентных

Рис. 5. Основные показатели публикационной и патентной активности по группам технологий

	Научные публикации			Патентные заявки				
	Мир	Россия	Доля России, %	Мир	Россия	Доля России, %		
Абонентские устройства	2020	2441	47	1,9	2019	2703	2	0,1
	2015	437	0	↑	2015	419	0	↑
	2010	92	0	0	2010	48	0	0
Сеть радиодоступа	2020	3908	72	1,8	2019	486	0	0
	2015	689	6	↑	2015	101	0	↑
	2010	44	0	0	2010	8	1	12,5
Транспортная сеть	2020	641	10	1,6	2019	105	1	1,0
	2015	146	0	↑	2015	12	0	↑
	2010	3	0	0	2010	0	0	0
Виртуализация и облачная инфраструктура	2020	1016	24	2,4	2019	34	0	
	2015	212	1	↑	2015	5	0	
	2010	4	0	0	2010	0	0	
Ядро сети	2020	1260	20	1,6	2019	527	0	
	2015	213	2	↑	2015	76	0	
	2010	43	1	2,3	2010	15	0	
Сетевые сервисы и цифровые платформы	2020	1342	38	2,8	2019	776	0	
	2015	68	0	↑	2015	14	0	
	2010	21	0	0	2010	5	0	
Управление сетью	2020	1468	34	2,3	2019	414	0	
	2015	307	3	↑	2015	83	0	
	2010	31	0	0	2010	5	0	

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

заявок увеличилось почти в 4 раза по сравнению с предыдущим годом. В области исследований как в России, так и в мире особое внимание уделяется непосредственно сетям радиодоступа, что говорит о продолжении научных дискуссий по вопросам их дальнейшего развития, в том числе в контексте перехода к шестому поколению технологий мобильной связи – 6G.

Текущий уровень развития инфраструктуры 5G, а также проникновения сервисов

на их основе в отраслях довольно сильно различаются в России и странах-лидерах (табл. 1). Уже сейчас наблюдается существенный разрыв: уровень проникновения 5G в США, Китае и Республике Корея составляет 15–20%, в то время как в России эти технологии реализованы только в рамках пилотных зон. В пятилетней перспективе более половины населения ведущих стран будет иметь доступ к сетям связи 5G.

Табл. 1. Сопоставление текущей ситуации и планов по внедрению мобильных сетей связи пятого поколения в России и ведущих странах

Показатель	Период планирования	США	Китай	Великобритания	Республика Корея	Россия
Выделение радиочастотного ресурса для коммерческого запуска	На сегодня	Выделен спектр во всех диапазонах	Выделен спектр в нижних и средних диапазонах	Выделен спектр во всех диапазонах	Выделен спектр во всех диапазонах	Выделен спектр в диапазоне 24,25–24,65 ГГц, однако создание сетей невозможно
	На 2024–2025 гг.	Рассматриваются меры для расширения спектра в среднем диапазоне				К 2024 г. выделение спектра для 5G
Оценочное количество базовых станций (БС) 5G на 1 тыс. чел.	На сегодня	0,226	0,635	0,059	3,24	0
	На 2024–2025 гг.	н/д	3,47	0,736	16,96	Менее 0,071
	На 2030 г.	н/д	н/д	н/д	н/д	2,85
Проникновение 5G среди населения	На сегодня	15%	26%	8%	24%	0
	На 2024–2025 гг.	51%	48%	35%	53%	11%
Географический охват сетей	На сегодня	Порядка 280 городов	Порядка 340 городов	Порядка 55 городов	Порядка 85 городов	Отдельные пилотные зоны
	На 2024–2025 гг.	н/д	н/д	н/д	н/д	10 городов-миллионников
	На 2030 г.	н/д	н/д	н/д	н/д	15 городов-миллионников и прилегающие города-спутники (30–60)
Степень внедрения отраслевых сервисов	На сегодня	Большое число тестовых проектов и проектов в стадии реализации	Большое число проектов уже реализовано, большое число реализуемых проектов	Большое число тестовых проектов	Большое число тестовых проектов и проектов в стадии реализации	Ограниченное число тестовых полигонов

(окончание)

Показатель	Период планирования	США	Китай	Великобритания	Республика Корея	Россия
	На 2024–2025 гг.	Значительная часть экономики использует возможности 5G	Значительная часть экономики использует возможности 5G	Большое число проектов уже реализовано, большое число реализуемых проектов	Значительная часть экономики использует возможности 5G	Расширение тестовых полигонов и начало реализации полномасштабных проектов
	На 2030 г.	Завершение цифровизации экономики	Завершение цифровизации экономики	Значительная часть экономики использует возможности 5G	Завершение цифровизации экономики	Большое число проектов уже внедрено, большое число реализуемых проектов
Вклад 5G в национальную экономику (рост ВВП)	На 2024–2025 гг.	н/д	н/д	20 млрд долл.	30,3 млрд долл.	Минимальный в силу отложенного запуска
	На 2030 г.	400–500 млрд долл.	220 млрд долл.	60 млрд долл.	47,8 млрд долл.	Порядка 1 трлн руб. при потенциально возможном 2,4 трлн руб. при более раннем старте

Источники: Сколковский институт науки и технологий; ПАО «Ростелеком».

Различия в охвате и уровне распространения технологий 5G во многом определяются объемами выделяемого финансирования и реализуемыми ведущими странами мерами политики. В среднесрочном периоде траекторию развития 5G в мире определяют три ключевые вехи:

- достижение доминирующего положения Китая на мировом рынке 5G. Этому в значительной мере способствовали государственные меры поддержки: утверждение 5G ключевым технологическим направлением в 13-м пятилетнем плане развития Китая (2016–2020 гг.), а также ускоренное

развертывание сетей 5G в соответствии с отраслевыми трехлетними дорожными картами на 2021–2023 гг.;

- старт международного проекта OpenRAN, получившего поддержку в странах, отказавшихся от китайского оборудования (США, Великобритании, Японии и др.);
- обособление двух крупнейших по численности мобильных рынков мира – Китая и Индии, доступ к которым для иностранных производителей жестко контролируется государственными органами, а также внутренними регламентами и стандартами.

Продукты и рынки

Объем уже осуществленных вложений в исследования и разработки ведущих компаний по ключевым группам флагманских продуктов оценивается более чем в 200 млрд долл. Согласно прогнозам, соответствующие рынки продолжают расти высокими темпами по крайней мере до 2026 г. После этого возможно некоторое замедление темпов роста, поскольку на рубеже 2026–2028 гг. будут совершенствоваться подходы к построению сетей 5G+/6G, а вместе с ними эволюционировать и флагманские продукты.

Рынки большинства флагманских продуктов отличаются высокой концентрацией – зачастую доля двух-трех крупных компаний составляет более 70%. Так, компания Apple занимает более половины рынка абонентских устройств (52%). Huawei, Nokia, ZTE, Ericsson доминируют в таких сегментах, как сети радиодоступа и ядро сети, сетевые сервисы и цифровые платформы (табл. 2).

Табл. 2. Примеры флагманских продуктов и мировых компаний-лидеров

Группа продуктов	Мировые компании-лидеры	Доля рынка в группе продуктов (по выручке), %	Вложения в исследования и разработки, млрд долл.
Абонентские устройства	Xiaomi, Китай	6	17
	Samsung Electronics Co., Республика Корея	14	18,8
	BBK Electronics Corporation (бренд OnePlus, OPPO), Китай	7	7
	Apple, США	52	20
	Vivo Corporation, Китай	7	–
	Другие	14	–
Сеть радиодоступа	Huawei Technologies Co., Китай	33,9	20
	Telefonaktiebolaget L. M. Ericsson, Швеция	27	4,5
	Nokia Corporation, Финляндия	17	5
	ZTE Corporation, Китай	15,4	2
	Samsung Electronics Co., Республика Корея	4,3	18,8
	Другие	2,4	–
Ядро сети	Huawei Technologies Co., Китай	25	20
	Cisco Systems, США	7	6
	Nokia Corporation, Финляндия	15	5
	ZTE Corporation, Китай	10	2
	Другие	17	–
Транспортная сеть	Cisco Systems, США	34	6
	Nokia Corporation, Финляндия	17,4	–
	Juniper Networks, США	14,3	1

(окончание)

Группа продуктов	Мировые компании-лидеры	Доля рынка в группе продуктов (по выручке), %	Вложения в исследования и разработки, млрд долл.
	Huawei Technologies Co., Китай	8,9	20
	Telefonaktiebolaget L. M. Ericsson, Швеция	21,4	4,5
	Другие	4	–
Сетевые сервисы и цифровые платформы	Motorola Solutions, США	17	0,7
	Telefonaktiebolaget L. M. Ericsson, Швеция	19	4,5
	Huawei Technologies Co., Китай	39	20
	AT&T, США	7	1,3
	Thales Group, США	14	0,2
	Mavenir Systems, США	4	–

Источник: Сколковский институт науки и технологий.

В последние несколько лет развитие сетей связи 5G в мире перешло от тестовых и пилотных запусков к полномасштабному развертыванию инфраструктуры в крупных городах. К концу 2020 г. в зоне покрытия сетей 5G уже жили свыше 1 млрд чел. (около 15% мирового населения). По прогнозам Ericsson, к 2026 г. этот показатель достигнет 60%⁹.

Ожидается, что к 2026 г. объем мирового рынка услуг 5G вырастет приблизительно

до 250 млрд долл. при среднегодовом темпе роста около 30% в течение прогнозируемого периода¹⁰. Динамика продуктовых рынков в целом соответствует тенденциям развития направления и тесно связана с их технологической составляющей. Продуктовые группы и соответствующие флагманские продукты формируются на основе каждой из выделенных групп технологий (табл. 3).

Табл. 3. Флагманские продукты на основе технологий мобильных сетей связи пятого поколения

Группа продуктов	Флагманские продукты
Абонентские устройства	Пользовательские абонентские терминалы (смартфоны, планшеты, ноутбуки, стационарные оконечные устройства и др.)
	Специализированные абонентские терминалы (встраиваемые модемы 5G, сенсоры и измерительные модули с поддержкой 5G и пр.)
Сеть радиодоступа	Приемопередающий модуль базовой станции
	Активная антенная система базовой станции
	Пассивная антенная система
	Распределенный модуль базовой станции
	Централизованный модуль базовой станции
	Малые базовые станции (микросоты, фемтосоты)

⁹ <https://www.ericsson.com/4a03c2/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2021/june-2021-ericsson-mobility-report.pdf>

¹⁰ https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/5g-services-market-226908556.html?gclid=EAlaIqObChMI36fHk-K88glVBWEYCh2FMQ11EAAAYiAAEgJ83_D_BwE0

Группа продуктов	Флагманские продукты
Ядро сети	Программное и аппаратное обеспечение модулей ядра сети 5G
	Программное и аппаратное обеспечение сервисов поддержки услуг IMS
Транспортная сеть	Сетевое и коммутационное оборудование уровня доступа
	Сетевое и коммутационное оборудование уровня агрегации
	Сетевое и коммутационное оборудование уровня ядра сети
	Сетевое и коммутационное оборудование с уплотнением оптических каналов (DWDM, CWDM)
Сетевые сервисы и цифровые платформы	Программное обеспечение (ПО) для обеспечения работы платформы для критически важных применений
	ПО для работы платформы для транспортных средств
	Программное и аппаратное обеспечение для построения вертикально интегрированных сетей и приложений
	ПО для обеспечения работы сервисов расширенной реальности (Extended Reality, XR)
	Программное и аппаратное обеспечение MEC

Источники: Сколковский институт науки и технологий; ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Сегодня в мире 72 страны уже запустили сервисы 5G¹¹, более 460 операторов из 137 стран инвестируют в пилотные разработки и проводят тестовые запуски¹². При этом растет и число применений сетей 4G и 5G в отраслях экономики и социальной сферы. По мере повышения уровня зрелости технологий 5G все более активно ведутся исследования и разработки в этой области. Во многих странах открыты или открываются научно-исследовательские центры и индустриальные полигоны для развития сервисов и услуг на базе сетей связи 5G.

В нашей стране создание опытных образцов и внедрение конкретных продуктов на основе технологий 5G в настоящее время идет медленнее, чем в ведущих странах. Тем не менее есть ряд отечественных решений, которые можно считать успешными. В первую очередь это разработки программного обеспечения для телеком-операторов (системы управления и балансировки трафика, биллинговые системы и прочие служебные цифровые сервисы и платформы).

В 2021 г. в рамках реализации дорожной карты ПАО «Ростелеком» и Правительство Москвы подписали соглашение о сотрудничестве для развития технологий 5G. В ходе его исполнения

на базе ГКБ им. С.П. Боткина открылся первый в России полигон для пилотирования цифровых проектов в сфере здравоохранения с инфраструктурой сетей связи пятого поколения. Здесь будут проводиться прикладные исследования, испытания прототипов и опытных образцов инновационных медицинских решений, работающих на основе сетей 5G. Это позволит стартапам тестировать разработки с применением технологий 5G в реальных клинических условиях.

Внедрение сетей связи пятого поколения и сервисов на их основе трансформировалось из технологической и инфраструктурной задачи в заметный фактор повышения конкурентоспособности национальной экономики. Страны, уже начавшие внедрять 5G, сформировали значительный задел в этой области и обладают существенным преимуществом как по доле на рынках флагманских продуктов, так и по уровню зрелости и степени проникновения технологий. С учетом отложенного запуска сетей 5G в России (до 2024 г.) образующийся к этому моменту разрыв может достичь критических значений как в отношении уровня развития инфраструктуры сетей 5G, так и степени готовности сервисов на их основе.

¹¹ <https://gsacom.com/paper/5g-market-update-member-report-august-2021>

¹² Там же.

Государственная поддержка

В зарубежной практике проекты государственной поддержки внедрения 5G в отраслях экономики и социальной сферы реализуются, как правило, до начала массовой коммерциализации новых сервисов. После этого момента уже начинают преобладать проекты с частным финансированием. Кроме того, по мере распространения сервисов 5G «включаются» меры стимулирования их внедрения в различные отрасли.

В Китае развитие сетей 5G было закреплено в качестве ключевого направления в 14-м пятилетнем плане социально-экономического развития (2021–2025 гг.). При этом вокруг инфраструктуры сетей 5G сформировано сразу несколько национальных программ, в частности, по развитию промышленного Интернета вещей, искусственного интеллекта, интеллектуального транспорта и др. До конца 2023 г. установлены следующие целевые ориентиры: уровень проникновения мобильной связи 5G – 40%, доля мобильного трафика в сетях 5G – 50%, доля крупных промышленных предприятий, использующих 5G, – 35%, годовой темп роста числа пользователей устройств Интернета вещей 5G – 200%, число базовых станций 5G на 10 тыс. человек – 18 (т. е. общее количество базовых станций 5G в Китае к концу 2023 г. должно превысить 2 млн).

Вклад 5G в высокотехнологичный производственный сектор Китая вырос более чем на 47% в годовом исчислении. В стране насчитывается более 10 тыс. примеров применения технологии 5G в 22 отраслях экономики, таких как электроэнергетика, горнодобывающая промышленность, транспорт, здравоохранение и образование. Объем инвестиций в развитие сетей 5G и отраслевых сервисов на их основе до 2025 г. составит до 215 млрд долл., за период 2020–2030 гг. – более 400 млрд долл. Для развития и внедрения сервисов 5G создана специальная Ассоциация (5G Applications Industry Array, 5GAIA).

В странах Европейского союза вопросы, связанные с внедрением сетей 5G и цифровых сервисов на их основе в различные сферы экономики, были вынесены в отдельный глобальный партнерский проект – 5G PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership). Общий объем финансирования проекта 5G PPP, который Еврокомиссия реализует совместно с ключевыми европейскими компаниями, составляет порядка 4,2 млрд евро. Для внедрения технологий 5G в промышленность создана отдельная европейская ассоциация 5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA), а также профильная ассоциация в автомобильной отрасли. Также предусмотрены стратегические программы ЕС, такие как Digital Europe Programme, Connecting Europe Facility (финансирование – 2 млрд евро¹³) и постковидная программа Recovery and Resilience Facility.

В области стандартизации сотовой связи лидирующую позицию занимает глобальный консорциум 3GPP и в меньшей степени Альянс O-RAN, который занимается разработкой открытых стандартов OpenRAN, дополняющих стандарты 3GPP. Все большее влияние на международной арене приобретает консорциум Telecom Infra Project (TIP) – организация, которая продвигает использование оборудования и программного обеспечения, поддерживающего открытые стандарты. В рамках TIP создан международный маркетплейс, где представлены сертифицированные OpenRAN-решения со всего мира.

В России 5G также является одним из приоритетных направлений поддержки в сфере технологического развития. Мероприятия дорожной карты по развитию высокотехнологичного направления «Мобильные сети связи пятого поколения» нацелены на решение следующих задач:

- осуществление комплексного проекта по разработке высокотехнологичной телекоммуникационной продукции для сетей связи 5G;

¹³ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_1109

- развитие отечественной продукции для сетей связи 5G, ее продвижение на российском и зарубежном рынках и регулирование отрасли;
- радиочастотное обеспечение внедрения сетей связи пятого поколения, включая проведение работ по конверсии и выделению радиочастот для внедрения 5G;
- развитие инфраструктуры сетей связи пятого поколения, включая стимулирование деятельности операторов связи и создание нормативной правовой среды для развития сетей 5G, реализацию пилотных зон сети связи стандарта 5G;
- создание эффективной системы управления развитием рынка сервисов и услуг, предоставляемых с использованием технологий 5G;
- оказание мер поддержки в целях стимулирования развития рынка цифровых сервисов и решений с использованием технологий 5G, включая пилотирование решений на базе 5G и создание отраслевых полигонов цифровых решений.

Сформированный системный подход поможет стимулировать развитие российского рынка

решений в области мобильной связи благодаря организации и проведению необходимых исследований и разработок, созданию новых образовательных программ, а также мерам по развитию кадрового потенциала. В ближайших планах – создание на базе ООО «Спектр» технико-производственной кооперации российских производителей оборудования в соответствии с разрабатываемым комплексным проектом по производству решений для сетей связи 5G. В ближайшее время компания определит потребность в производственных мощностях и будет принято решение о необходимости строительства новых мощностей в России.

Кроме того, в январе 2019 г. был сформирован консорциум отечественных предприятий – Консорциум 5G – для создания комплексных решений в области мобильных сетей связи пятого поколения. Работа ведется в том числе в рамках гранта на государственную поддержку программ деятельности лидирующих исследовательских центров (ЛИЦ) по тематике «Разработка базовой станции 5G в парадигме OpenRAN». Консорциум 5G ведет разработку отдельных элементов комплексного решения – базовой станции 4G/5G с открытой архитектурой OpenRAN.

Перспективы развития

Сегодня в мире многие разработки в области 5G достигли высокого уровня готовности, отлажено серийное производство всего спектра оборудования для сетей связи пятого поколения. В дальнейшем усилия ведущих компаний и исследовательских центров будут сконцентрированы в основном на создании цифровых платформ и отраслевых сервисов в области 5G, а также решений для следующих поколений сетей мобильной связи. При этом уже начавшиеся разработки технологий 5G+/6G основываются на заделах и компетенциях, накопленных в ходе работ по созданию сетей связи пятого поколения.

Ведущие страны (Китай, США, Республика Корея, Япония, страны ЕС, Индия и др.) активно ведут разработку собственного оборудования для критической информационной инфраструктуры 5G, развивают цифровые платформы и отраслевые сервисы для широкого круга приложений. Индустриальное применение технологий 5G дает импульс для распространения новых сценариев использования – в медицине, на высокоточном производстве, транспорте и др. Собственные разработки в этих областях требуются прежде всего из соображений национальной безопасности и стимулирования социально-экономического развития.

Сегодня на рынке оборудования мобильной связи доминируют пять компаний: Huawei, Ericsson, Nokia, ZTE и Samsung. Лидеры консолидируют передовые компетенции в области исследований и разработок 5G и имеют существенную долю рынка – более 95%. В результате политики последовательного «выдавливания» китайских компаний с рынков США и ряда других стран выбор поставщиков оборудования 5G для национальных операторов связи сузился еще больше. Это приводит к высокой зависимости от нескольких крупных производителей, повышению стоимости оборудования.

Снизить барьеры для появления новых игроков позволяют стандартизация и консолидация разработок в рамках коопераций – вокруг холдингов, предприятий либо отдельных, в том

числе международных, технологических экосистем. Объединение усилий компаний, формирование консорциумов позволит скоординировать существующие заделы участников рынка и обеспечит диверсификацию предлагаемых решений. Наиболее распространенными и перспективными формами кооперации на национальном и наднациональном уровне являются альянсы, совместные инициативы и консорциумы, которые объединяют промышленных заказчиков, производителей оборудования, телеком-операторов и других участников рынка.

Для стимулирования разработки оборудования и всего спектра решений в области цифровых платформ и сервисов на базе технологии 5G практически все развитые страны используют широкий набор организационных механизмов поддержки – от финансирования НИОКР до выделения необходимого радиочастотного ресурса и внедрения цифровых платформ и сервисов в отраслях экономики.

С точки зрения имеющегося задела в области фундаментальных и прикладных исследований Россию можно отнести к категории стран с достаточно высоким потенциалом в области 5G. В нашей стране уже есть инициативные и поддержанные государством наработки отдельных элементов комплексного решения 5G со сроком готовности в 2022–2023 гг., что позволяет несколько нивелировать проблему поздних сроков старта разработки. Тем не менее сегодня по уровню развития базовых технологий 5G Россия отстает от мировых лидеров на 3–5 лет, что проявляется в отсутствии достаточных мощностей по производству элементной базы, необходимой для телекоммуникационного оборудования.

Наметилось и определенное отставание в области коммерческого внедрения цифровых платформ и сервисов, а также в выделении необходимого радиочастотного ресурса и развертывании инфраструктуры сетей 5G. В этой связи целесообразно уже в краткосрочной перспективе приступить к финансированию и стимулированию создания полигонов на базе отраслевых

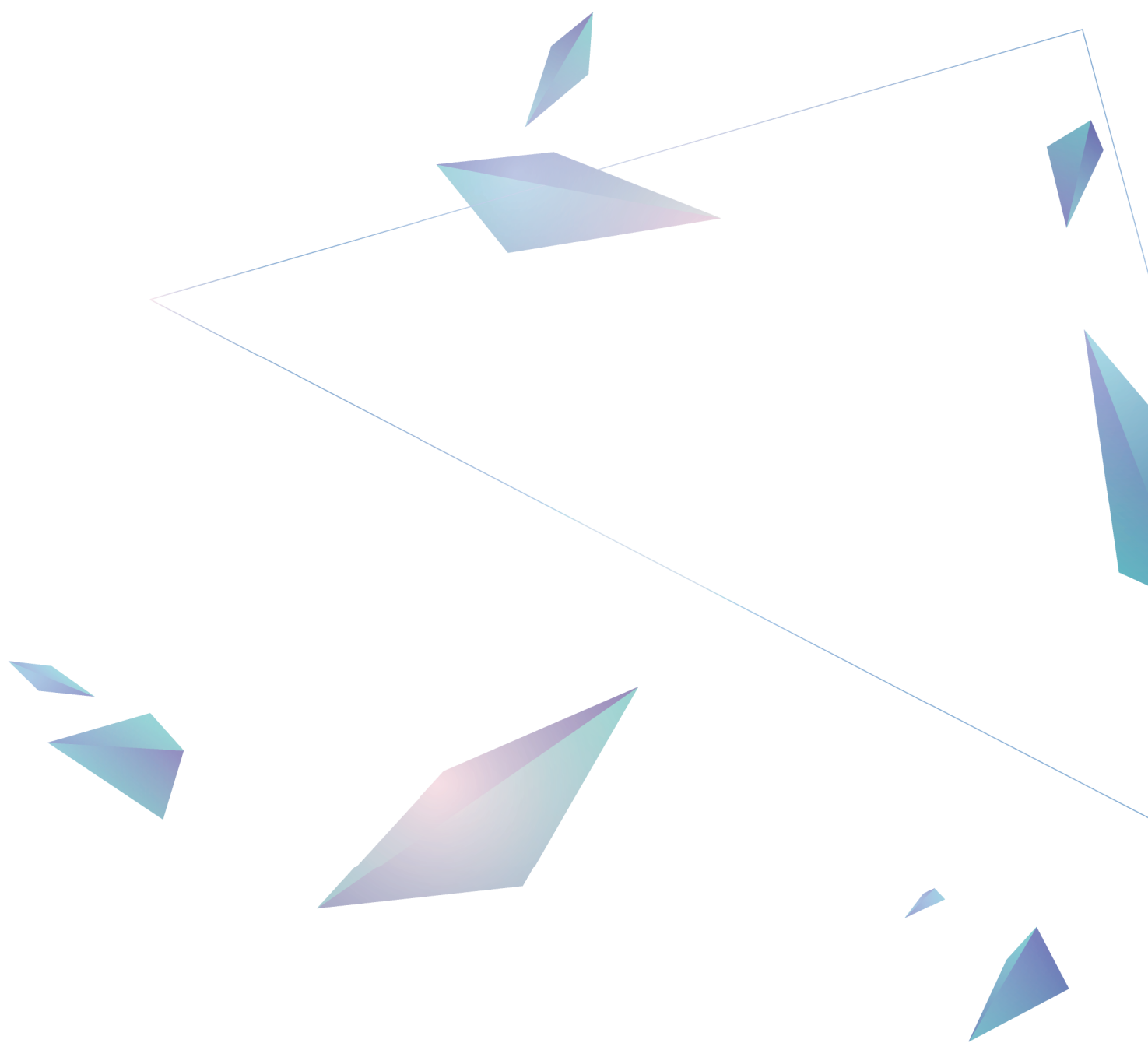
предприятий и даже мегаполисов. Данная мера позволит сформировать к моменту запуска 5G в России готовые отечественные цифровые платформы и отраслевые сервисы, необходимые для работы критически важной промышленной инфраструктуры, а также восполнить частотный дефицит для городов-миллионников – не менее 600 МГц в диапазоне до 6 ГГц.

Сложившаяся в России схема развития 5G с опорой на консорциумы, объединяющие усилия научных центров, производственных предприятий, финансовых структур и ведущих вузов, в целом соответствует мировой практике, однако целесообразно сфокусировать внима-

ние на повышении эффективности работы таких консорциумов.

Российский рынок телекоммуникационного оборудования мобильных сетей связи операторского класса является довольно крупным, что оправдывает усилия отечественных компаний по разработке собственных технологических решений. Тем не менее для коммерческого успеха разрабатываемой в России продукции для сетей связи 5G необходимо осуществлять экспортную экспансию. При этом развитие внутреннего производства на конкурентной основе может позволить достичь необходимого уровня эффективности для выхода на мировой рынок.

Квантовые вычисления



Сокращения

ИАиЭ СО РАН	Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН
ИПФ РАН	Институт прикладной физики РАН
ИСАН	Институт спектроскопии РАН
ИТ	информационные технологии
ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН	Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН
ИФМ РАН	Институт физики микроструктур РАН
ИФП СО РАН	Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН
ИФП РАН	Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН
ИФТТ РАН	Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна РАН
ЛИЦ	лидирующий исследовательский центр
МИАН	Математический институт им. В.А. Стеклова РАН
ПО	программное обеспечение
РКЦ	Российский квантовый центр (ООО «МЦКТ»)
ФИАН	Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН	Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
ФТИАН	Физико-технологический институт имени К.А. Валиева РАН
ЦКТ	Центр квантовых технологий МГУ им. М.В. Ломоносова
AQ	алгоритмический кубит

С конца XX в. мир находится на пороге «второй квантовой революции», которая может оказать существенное влияние на все сферы деятельности. Ее ключевое отличие от «первой квантовой революции», в которой технологии и приборы строились на управлении коллективными квантовыми явлениями, заключается в способности управлять сложными квантовыми системами на уровне отдельных частиц, например атомов и фотонов. Технологии, основанные на таком высоком уровне контроля над индивидуально квантовыми объектами, принято объединять термином «квантовые технологии».

Государство представляется главным потенциальным потребителем данных технологий ввиду их стратегической важности как для обеспечения национальной безопасности, так и для достижения «цифровой зрелости» ключевых отраслей экономики и социальной сферы, в том числе здравоохранения, государственного управления и информационных технологий.

Конкурентоспособность и безопасность государства в XXI в. во многом будет определяться уровнем владения технологиями квантовых вычислений. На прогнозируемом горизонте 2025–2030 гг., в эпоху массового внедрения квантовых компьютеров, внеквантовое технологическое лидерство государства станет невозможным.

Госкорпорация «Росатом» и Правительство Российской Федерации заключили соглашение о намерениях в целях развития в России высокотехнологичного направления «Квантовые вычисления». В рамках соглашения разработана дорожная карта¹, мероприятия которой в перспективе до 2024 г. позволят создать благоприятные условия для проведения исследований и реализации проектов в области квантовых вычислений, сформировать необходимую научно-технологическую экосистему, а также обеспечить квантовую отрасль квалифицированными кадрами.

Что такое квантовые вычисления?

Квантовые вычисления – одно из направлений квантовых технологий, использующее новый класс вычислительных устройств, которые основаны на принципах квантовой механики. Согласно прогнозам, компьютеры, построенные на квантовых принципах, во многих сферах будут эффективнее классических компьютеров за счет многократного увеличения скорости вычислений и применения недоступных ранее явлений квантовой механики для решения некоторых классов вычислительных задач.

Интерес к квантовым вычислениям неуклонно растет. Активные исследования в этой области начались около 20 лет назад, спустя несколько лет значительно возросло количество

поданных патентных заявок. С 2015 г. их число ежегодно увеличивалось на 15–20%, в первую очередь за счет Китая и США. В 2016–2017 гг. выросли количество и объемы сделок на венчурном рынке, а в 2018–2020 гг. правительства многих стран запустили специальные финансовые инициативы и приняли законы, направленные на развитие квантовой отрасли. Сейчас инвестиции развитых стран в разработку квантовых технологий составляют миллиарды долларов.

В настоящее время наиболее перспективными в мире платформами реализации квантовых вычислений считаются следующие: сверхпроводящие кубиты, нейтральные атомы, ионы

¹ Дорожная карта развития высокотехнологичной области «Квантовые вычисления», утвержденная протоколом заседания президиума Правительственной комиссии по цифровому развитию, использования информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности от 31 июля 2020 г. № 14 и от 20 июля 2021 г. № 24 (актуализированная редакция – 2021 г.). Является основным механизмом реализации соглашения о намерениях между Правительством Российской Федерации и Госкорпорацией «Росатом» от 10 июля 2019 г., заключенного в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 июля 2019 г. № 1484-р в целях развития квантовых вычислений.

в ловушках, фотонные чипы. Эксперты дают неоднозначные оценки разным технологическим решениям, поэтому на сегодняшний день невозможно определить наиболее перспективную технологию.

Развитию квантовой отрасли способствуют как государственные программы, так и инвестиции со стороны крупнейших мировых корпораций, таких как Google, IBM, Microsoft, Honeywell. Аналитики отмечают существенный рост частных инвестиций, две трети их объема осуществлены после 2018 г. В 2021 г. первые два квантовых стартапа стали публичными компаниями с рыночной капитализацией, превышающей 1 млрд долл. Первым «квантовым единорогом» стал американский стартап IonQ, выпускающий квантовые процессоры на ионной платформе. Общая стоимость акционерного капитала этой компании оценивается в 2 млрд долл. Британский стартап Arqit, разрабатывающий системы защищенной спутниковой связи, достиг капитализации в 1,4 млрд долл.

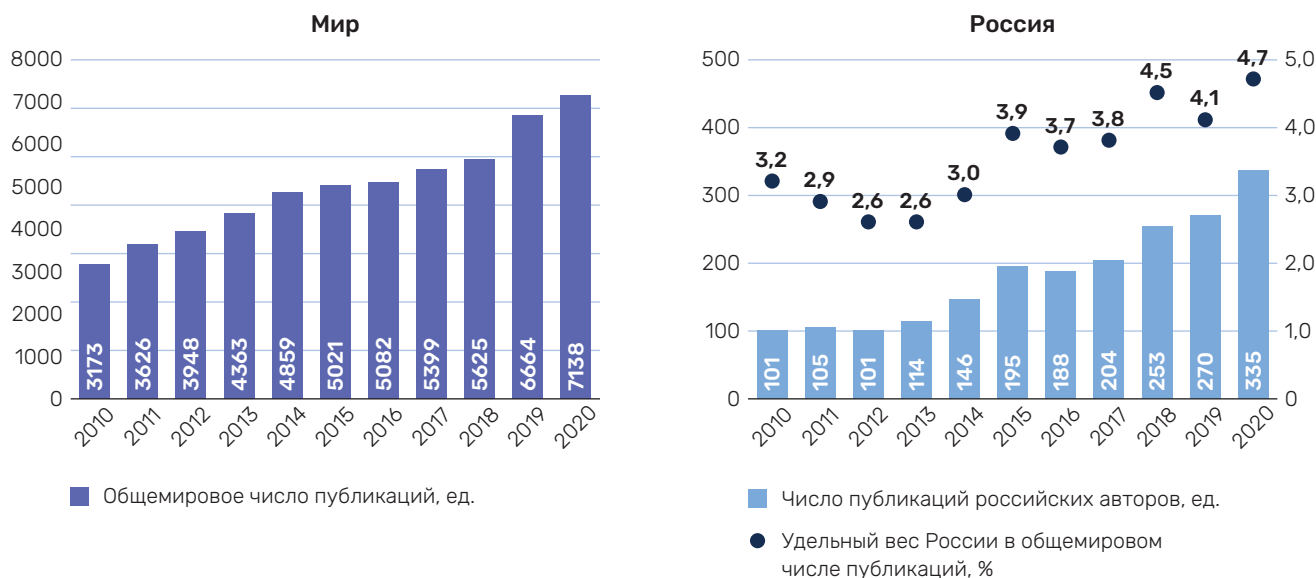
По данным за 2020 г., 4% крупных компаний, представленных в списке Fortune, уже начали

пилотные исследования в области квантовых вычислений, а 35% изучают такую возможность. В течение ближайших трех лет эти доли вырастут до 13 и 68% соответственно². При этом 28% экспериментальных проектов в области квантовых вычислений относятся к сфере финансов и инвестиций, 16% приходится на энергетику и сферу новых материалов, 9% реализуются в химической и фармацевтической промышленности.

Мировой рынок квантовых вычислений находится в стадии формирования. Оценки объемов рынка в 2020 г. варьируют от 38 млн³ до 320 млн долл.⁴ По прогнозам, в ближайшие 5 лет рынок квантовых вычислений достигнет 1–2 млрд долл.⁵ с потенциалом роста до 450–850 млрд долл. в следующие 15–30 лет⁶.

Этап наиболее быстрого роста популярности квантовых вычислений начался в 2015–2016 гг., когда к исследованиям подключились крупные технологические компании. С 2013 г. количество публикаций в области квантовых компьютеров и вычислений ежегодно увеличивается в среднем на 10% (рис. 1).

Рис. 1. Ключевые показатели публикационной активности



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

² https://www.dwavesys.com/sites/default/files/10962_Advisory_BW_D-wave%20R2.pdf

³ http://www.yole.fr/Quantum_Technologies_Market_Update_2021.aspx

⁴ <https://hyperionresearch.com/product/key-takeaways-from-qc-market-study-global-quantum-computing-market-projected-to-grow-to-over-800-million-by-2024/>

⁵ <https://www.reportlinker.com/p05064748/Quantum-Computing-Market-by-Revenue-Source-Application-Simulation-Optimization-and-Sampling-Industry-Defense-Banking-Finance-Energy-Power-Chemicals-and-Healthcare-Pharmaceuticals-and-Geography-Global-Forecast-to.html>

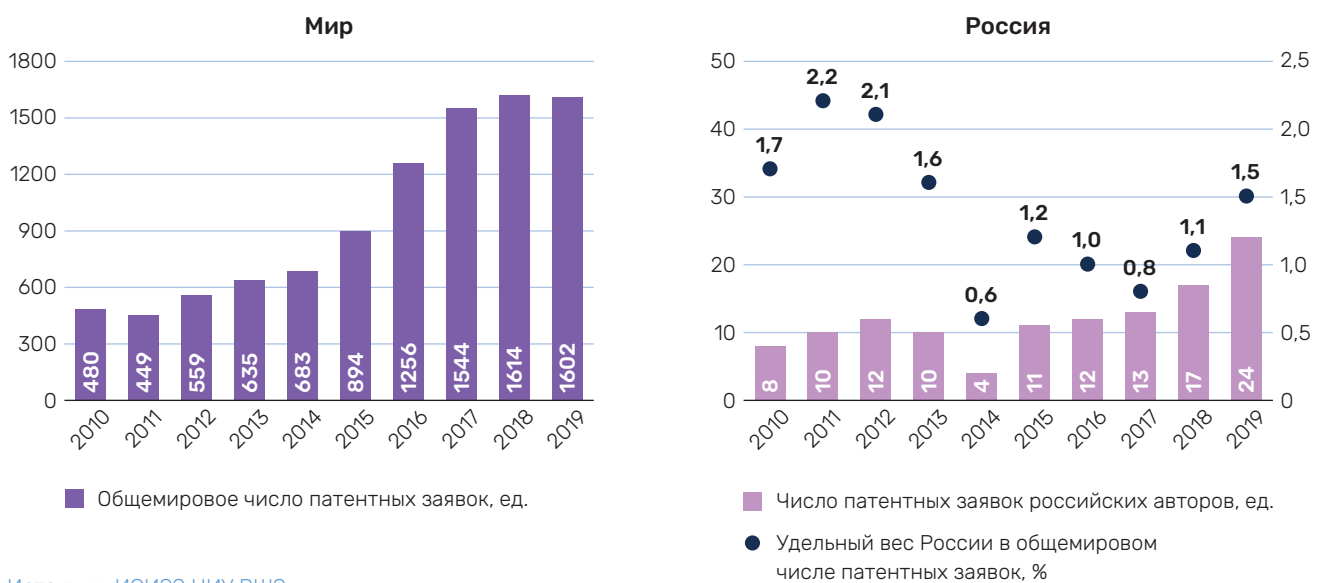
⁶ <https://www.bcg.com/publications/2021/building-quantum-advantage>

Китай, США и Германия занимают лидирующее положение в мире по числу проведенных исследований (обеспечивая почти две трети публикаций) и суммарному цитированию своих работ (более 80% от общемирового уровня). За 2000–2020 гг. в мире опубликовано в общей сложности более ста тысяч научных работ (статей, монографий, тезисов конференций) в обла-

сти квантовых систем, компьютеров и вычислений. Ежегодное число публикаций увеличилось с 1300 в 2000 г. до более 7000 в 2020 г., причем на долю России приходится свыше 4% научных работ по данной тематике.

За последние 10 лет в мире было подано порядка 10 тыс. патентных заявок в области квантовых компьютеров и вычислений (рис. 2).

Рис. 2. Ключевые показатели патентной активности



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Интенсивность патентования резко увеличилась в 2015–2016 гг. (более 30% ежегодно). В 2017–2019 гг. в странах-лидерах – Китае и США – зарегистрировано около 80% общемирового числа заявок на патенты. Россия входит в топ-10 стран по уровню патентной активности за 2017–2019 гг. (8-е место), опережая, например, Францию и Швейцарию.

Развитие квантовых технологий возможно лишь при наличии соответствующей лабораторной инфраструктуры (чистые помещения, криогенные и вакуумные участки, литографические установки и др.). Необходимым условием является создание и использование специали-

зированных научно-технологических центров, обеспечивающих возможность проведения всего спектра научно-изыскательских и технологических работ по созданию квантовых устройств.

В большинстве технологически развитых стран созданы квантовые центры и консорциумы. В 2020 г. в России подписано соглашение о создании научно-технологического консорциума «Национальная квантовая лаборатория». Новое объединение консолидирует усилия университетов, научных центров, команд-разработчиков, стартапов, технологических компаний и финансовых организаций и станет основой отечественной квантовой экосистемы.

Технологии

Технически квантовые компьютеры, как и квантовые симуляторы, могут быть построены на основе различных физических платформ (рис. 3), каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки. Наиболее распространенные платформы – сверхпроводниковая, на основе нейтральных атомов, на основе ионов и на основе фотонных чипов. Кроме них развиваются альтернативные платформы на основе спинов в полупроводниках, ядерного магнитного ре-

зонанса, магнонов, поляритонов и гибридных систем.

Отдельно следует выделить технологии разработки полного стека ПО для квантовых вычислений (операционные системы, компиляторы, библиотеки прикладных алгоритмов). Поскольку квантовые процессоры работают принципиально иначе, чем классические, подходы к программированию квантовых вычислений также иные.

Рис. 3. Структура высокотехнологичного направления



Источники: Госкорпорация «Росатом»; ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Квантовые процессоры на сверхпроводниковой платформе разрабатывают IBM, Google, Rigetti, Intel, Alibaba. Ее достоинства – хорошая масштабируемость, стабильность во времени и относительная легкость в управлении, к недостаткам относятся необходимость использования сверхнизких температур и низкая когерентность.

Ионная платформа используется компаниями Honeywell, IonQ, AQT. Ее достоинства – наилучшие на сегодняшний день показатели стабильности и точности операций. Недостатком считается технологическое ограничение максимального размера квантового регистра.

Атомная платформа развивается французской компанией Pasqal, Гарвардским универси-

тетом и Университетом Париж-Сакле. Платформа допускает легкое масштабирование, однако отличается высокой сложностью управления кубитами.

Фотонная платформа используется компаниями Xanadu, Quix, Psi Quantum. Она имеет малый размер, допускает возможность работы при комнатных температурах и легкое сопряжение с волоконно-оптическими линиями. Вместе с тем в ней сложно реализовать логические цепи из-за слабого взаимодействия фотонов.

За последние несколько лет ведущие компании реализовали ряд прорывных проектов в области квантовых вычислений.

IBM и Google анонсировали планы развития своих процессоров на сверхпроводниковой

платформе, к 2029–2030 гг. они предполагают появление квантовых систем размером в миллионы физических кубитов. До недавнего времени наиболее мощным квантовым процессором IBM был 65-кубитный Quantum Hummingbird, представленный в 2020 г. Но уже в ноябре 2021 г. IBM представила мощнейший квантовый процессор Quantum Eagle на 127 физических кубитах⁷. В 2022 г. должен появиться 433-кубитный компьютер IBM Osprey, а в 2023 г. – 1121-кубитный процессор Condor⁸.

Компания Google в 2019 г. представила 53-кубитный квантовый процессор Sycamore и анонсировала выпуск нового 100-кубитного процессора. На 2025 г. запланирован выпуск модуля из 10 тыс. кубитов, на основе которого в 2029 г. будет запущен квантовый компьютер, состоящий из миллиона физических кубитов⁹.

IonQ, которая изготавливает процессоры на ионной платформе, рассчитывает производительность собственных систем на основе метрики, названной алгоритмическим кубитом (AQ). Наиболее мощный ионный процессор на основе 32 физических кубитов обладает AQ = 22. К 2024 г. компания обещает создать систему с AQ = 35, а с 2026 г. начнется масштабирование системы до AQ = 1024 (2028 г.)¹⁰.

Наиболее масштабная система на основе нейтральных атомов создана французской компанией Pasqal. В самое ближайшее время ожидается ее масштабирование от текущего уровня в 100 атомов до 200 атомов. В лабораториях Университета Париж-Сакле и Гарвардского университета уже функционируют более мощные системы, состоящие из 196 и 256 атомов соответственно.

В части фотонных компьютеров наиболее мощными являются системы, эквивалентные 12 кубитам, разработанные канадским стартапом Xanadu и голландским Quix. В их ближай-

ших планах – выпуск 20-кубитных процессоров.

Существующие квантовые вычислительные устройства, построенные с использованием различных групп технологий, принципиально не отличаются друг от друга по производительности и находятся практически на одной стадии развития (рис. 4). Например, большее количество кубитов в сверхпроводниковых процессорах компенсируется лучшим качеством (низким уровнем ошибок) в ионных. Из-за невозможности предсказать, в каких областях произойдут технологические прорывы, во многих странах исследования и разработки ведутся параллельно по всем группам технологий. В то же время большая часть крупнейших ИТ-компаний фокусируются на создании сверхпроводниковых процессоров.

По венчурным инвестициям лидером пока является фотонная платформа (36%), далее идут сверхпроводниковая (24%), ионная и атомная (9 и 1% соответственно)¹¹. Фотонная платформа также лидирует по числу публикаций (10% от общего числа в 2020 г.) и поданных патентных заявок (20% от общего числа в 2019 г.).

Ни одна из перечисленных групп технологий пока не вышла на уровень, необходимый для достижения гарантированного превосходства над классическими вычислительными системами. По оценкам экспертов, все технологии квантового процессора находятся на начальном этапе развития («зарождение технологии» – нижняя часть кривой технологической зрелости), который характеризуется значительными затратами на исследования и разработки при невысокой практической отдаче. Это период исследований и разработок, освоения новой технологии и внедрения ее в производство. По мере развития различных групп технологий, вероятно, определяются лидеры среди платформ и станет целесообразным перераспределение

⁷ <https://research.ibm.com/blog/127-qubit-quantum-processor-eagle>

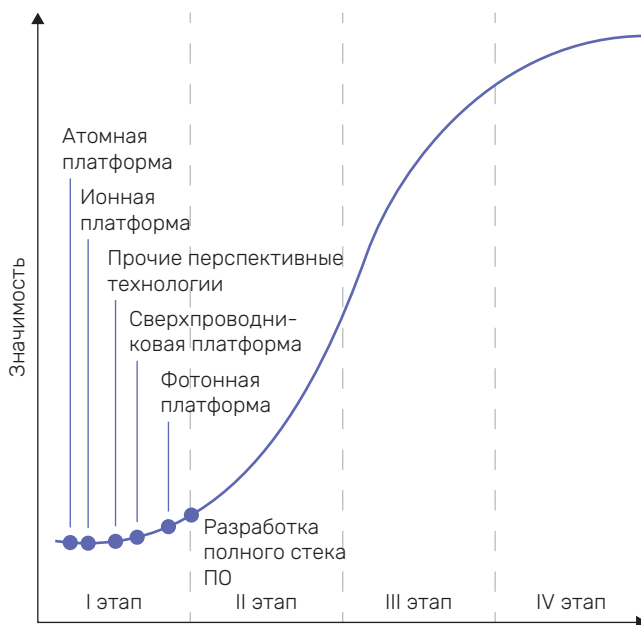
⁸ <https://www.ibm.com/blogs/research/2020/09/ibm-quantum-roadmap/>

⁹ <https://www.cnet.com/news/quantum-computer-makers-like-their-odds-for-big-progress-soon/>

¹⁰ <https://static1.squarespace.com/static/5e33152a051d2e7588f7571c/t/60459578b8c075444a656357/1615173012167/IonQ+Investor+Presentation+030721+vFF.pdf>

¹¹ https://www.researchgate.net/publication/350453567_Quantum_Technologies_Patents_Publications_Investissements_Landscape

Рис. 4. Кривая технологической зрелости



Источники: Госкорпорация «Росатом»; ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Методические пояснения. Значимость характеризует уровень зрелости технологии и отражает нормализованную упоминаемость технологии в данный период времени в публикациях соответствующего типа (научные статьи, патенты, рыночная аналитика). С учетом интенсивности исследований и разработок выделены четыре этапа:

I этап – зарождение технологии (высокая публикационная активность);

II этап – расцвет технологии (рост патентования и объема рыночной аналитики);

III этап – зрелость технологии (преобладание рыночной аналитики);

IV этап – плато (снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике).

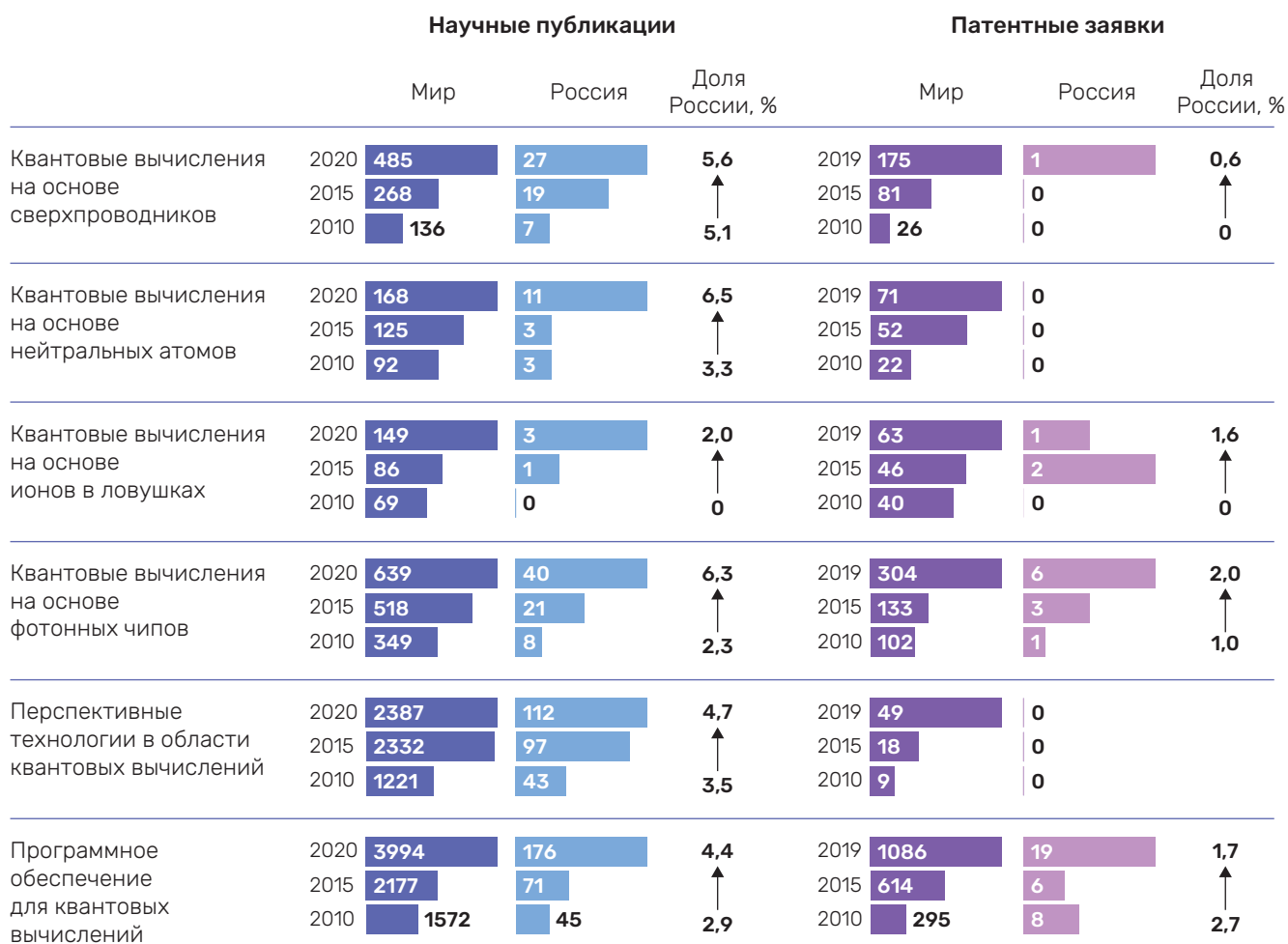
ресурсов в пользу наиболее перспективных решений. Такого рода коррекция может быть осуществлена в последующие годы и в России в рамках дорожной карты.

Те же выводы можно сделать на основе анализа патентной и публикационной активности по группам технологий (рис. 5). Фундаментальные и прикладные исследования по всем четырем платформам ведутся почти одинаково интенсивно. При этом фотонные платформы несколько опережают остальные технологии по числу публикаций и патентной активности как в мире,

так и в России. Число заявок на патенты в этой области в 2019 г. практически равно их общему количеству по трем остальным платформам. Наряду с этим объем патентования довольно активно нарастает по всем группам технологий (с 2015 по 2019 г. – в 1,5–2 раза).

Технологическое отставание России от мировых лидеров в области квантовых вычислений оценивается в 7–10 лет. В то же время глобальный рынок развивается неравномерно по отдельным группам технологий, предсказать их относительную динамику сейчас

Рис. 5. Основные показатели публикационной и патентной активности по группам технологий



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

крайне сложно, что в перспективе может дать возможность компенсировать разрыв. В России предпринимаются значительные усилия по интенсификации исследований и разработок в области квантовых технологий. Работы ведутся по всем группам технологий и широко представлены в деятельности исследовательских организаций Российской академии наук. Среди ключевых отечественных центров компетенций по квантовым вычислениям следует отметить Российский квантовый центр (ООО «МЦКТ»), Центр квантовых технологий (ЦКТ) МГУ им. М.В. Ломоносова и центр НТИ на базе ЦКТ МГУ, ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духо-

ва», МИЭТ, МИАН, ФИАН, ФТИАН, ИАиЭ СО РАН, ИПФ РАН (и его филиал – ИФМ РАН), ИСАН, ИТФ им. Л.Д. Ландау, ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН, ИФП им. П.Л. Капицы, ИФТТ, КНИТУ–КАИ, КФТИ, КФУ, МПГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МФТИ, МИСиС, НГТУ, Сколтех, Университет ИТМО, ФТИ им. А.Ф. Иоффе и др.

План мероприятий дорожной карты разработан с участием российского научного и делового сообщества, а также с учетом лучших мировых практик. Конкурентным преимуществом создаваемой российской квантовой вычислительной архитектуры является диверсификация – предусматриваются разработки кван-

товых процессоров на основе всех ключевых технологических платформ. Они будут созданы в рамках единой концепции, что обеспечит совместимость с пакетом средств для разработки квантовых приложений и решения проблем оптимизации. Тем самым дорожная карта формирует основу для развития квантовых вычислений в России, способствует созданию благоприятных условий для проведения исследований и позволяет выбрать оптимальный сценарий технологического развития на ближайшее десятилетие.

В 2021 г. в рамках реализуемой Госкорпорацией «Росатом» дорожной карты учеными из Российского квантового центра и Физического института имени П.Н. Лебедева РАН разработан прототип четырехкубитного квантового процессора на основе ионов в ловушках. Впервые в России продемонстрировано выполнение квантовых операций на процессоре из четырех

ионных кубитов с использованием кудитных состояний: разработана система из четырех кубитов без наращивания числа ионов с применением оригинальной технологии масштабирования квантовых процессоров с использованием многоуровневых носителей информации – кудитов¹². Российскими физиками построена система из двух куквартов, что полностью эквивалентно четырем кубитам. В ходе эксперимента исследователи захватили в вакуумной камере два иона и с помощью лазера провели над ними набор однокудитных операций, двухкубитную операцию внутри кудита, а также операцию по перепутыванию частиц (Мельмера-Соренсона). При этом удалось показать, что операции между кубитами, связанными в кукварт, превосходят по качеству операции над независимыми частицами, что в будущем обеспечит большую эффективность реализации квантовых алгоритмов.

¹² Расширенные версии кубитов, способные одновременно находиться в нескольких состояниях, например, в трех (кутриты) или в четырех (кукварты).

Продукты и рынки

В зависимости от роли на рынках продуктов и сервисов на основе квантовых вычислений всех участников можно условно разделить на четыре категории:

- разработчики аппаратных решений (Intel, а также стартапы и небольшие компании IonQ, QuTech, PsiQuantum, AQT, Pasqal и др.);
- сервисные компании (Silicon Quantum Computing, PsiQ, QuantikaQ-TRL, Qindom и др.), предоставляющие широкий спектр услуг – от консалтинга до разработки специализированных аппаратно-программных комплексов;
- платформенные компании (ИТ-гиганты IBM, Google, Alibaba, Honeywell, Microsoft, Amazon, а также стартапы Rigetti, Xanadu, D-Wave, которым удалось привлечь крупное финансирование, и др.);
- разработчики программных решений (Zapata Computing, Cambridge Quantum Computing, QC Ware, 1Qbit и др.).

Ввиду невысокого уровня технологической зрелости квантовых вычислений соответствующие рынки пока находятся в стадии формирования, а границы между продуктами и технологиями несколько размыты. К флагманским продуктам относятся квантовые компьютеры, разработанные на основе каждой из технологических платформ, системы облачного доступа к ним, а также прикладное программное обеспечение.

Конечные квантовые устройства. Квантовые компьютеры представляют собой технически сложные системы, которые пока чаще всего функционируют в лабораторных условиях (при низких температурах, в условиях сверхвысокого вакуума и пр.). Поэтому сейчас осуществляются продажи достаточно простых устройств. Например, нидерландские стартапы Quix и QuantWare продают относительно несложные квантовые процессоры, а китайская компания SpinQ предлагает простой учебный квантовый компьютер на основе двух кубитов.

Ожидается, что дальнейшее развитие технологий в скором времени приведет к появлению коммерчески доступных систем, а рынок конечных квантовых устройств составит к 2030 г. 1–2 млрд долл., в следующее десятилетие – 15–30 млрд долл., после 2040 г. – 90–170 млрд долл. (оценка Boston Consulting Group).

Квантовые облачные вычисления как сервис. В ближайшем будущем объемы продаж конечных устройств для квантовых вычислений останутся сравнительно незначительными. Существенную долю рынка будут удерживать услуги облачного доступа к вычислительным системам. Провайдером квантовых облачных сервисов в настоящее время выступают около полутора десятков различных компаний, среди которых IBM, Amazon и Microsoft. Сегодня рынок находится на стадии становления: в 2020 г. его объем не превышал 50 млн долл. с учетом услуг по консультированию, во многих случаях тестовый доступ к сервисам предоставляется бесплатно. По оценкам The Quantum Insider, возрастающий спрос на квантовые вычисления среди крупных компаний уже в ближайшие 1,5 года обеспечит ежегодный прирост рынка в 80%. Аналитики предполагают, что к концу десятилетия объем рынка достигнет 26 млрд долл.¹³ Среди мировых лидеров компании из США – IBM (платформа IBM Q Experience), Amazon (платформа Amazon Braket), Microsoft (Microsoft Azure), Rigetti (Rigetti Forest), Google (Google Quantum Playground), а также Канады – D-Wave (D-Wave Leap) и Xanadu. Свои платформенные решения созданы в Китае (Baidu Quantum Leaf) и Нидерландах (QuTech Quantum Inspire). В России в 2021 г. было открыто два экспериментальных облачных сервиса квантовых вычислений – в Российском квантовом центре (РКЦ) и МГУ им. М.В. Ломоносова.

Квантовое программное обеспечение (ПО). Количество компаний – разработчиков квантовых программных платформ продолжает расти быстрыми темпами (Zapata Computing,

¹³ <https://thequantuminsider.com/2021/08/12/report-quantum-computing-as-a-service-market-to-hit-26-billion-by-end-of-decade/>

Cambridge Quantum Computing, QC Ware, 1Qbit). Эти компании помогают исследователям использовать реальные и моделируемые квантовые устройства или же предоставляют возможности решения специализированных задач, например в финансовой сфере. По оценкам Hyperion, рынок системного и прикладного квантового ПО составляет около 90 млн долл., а к 2024 г. достигнет примерно 140 млн долл. Платформенные компании зачастую предоставляют собственные компиляторы и ПО для квантовых вычислений общего назначения (например, pyQuil от Rigetti, QISKit от IBM).

Исследования в области квантовых вычислений в большинстве стран финансируются преимущественно государством. Однако с учетом значительных перспектив коммерциализации крупные частные ИТ-компании (Google, Intel, Microsoft, IBM, Honeywell, Amazon, Alibaba, Baidu и др.) также осуществляют масштабные вложения в программы исследований и разработок в области квантовых вычислений. Суммы инвестиций сравнимы с объемом средств, выделяемых в рамках государственных программ, или даже превышают их. Так, в 2014 г. IBM инвестировала 3 млрд долл. в пятилетний проект по развитию перспективных вычислительных систем. Значительная часть ресурсов направлена на квантовые вычисления. После принятия в США в 2020 г. Национальной квантовой инициативы стало известно, что крупнейшие ИТ-компании запланировали в течение 5 лет дополнительно инвестировать в этот проект 300 млн долл.

В то же время растет и интерес венчурных инвесторов к стартапам. По данным Crunchbase, в мире сейчас функционируют около 200 таких компаний в области квантовых вычислений с совокупными инвестициями около 1,5 млрд долл., две трети из которых были направлены на проекты в области аппаратных платформ. Средства вкладывались преимущественно в фотонную и сверхпроводниковую платформы.

Параллельно усиливается заинтересованность в применении флагманских продуктов

в отраслях экономики и социальной сферы. В финансовом секторе к середине 2020 г. 21 крупный международный банк (JP Morgan Chase, Goldman Sachs, Wells Fargo, Barclays и др.) запустил пилотные исследовательские проекты в различных областях финансового анализа, в том числе по оценке рисков, оптимизации портфелей и предсказанию стоимости финансовых инструментов.

В рамках проекта Ок-Риджской национальной лаборатории (США) выполняются такие задачи, как оптимизация распределения электроэнергии, получаемой из различных источников, анализ переходных процессов, прогнозная аналитика потребления энергии и планирования новых архитектур национальной энергосистемы для повышения ее устойчивости и надежности¹⁴. В свою очередь, Dubai Electricity and Water Authority, используя облачный сервис квантовых вычислений от Microsoft, работает над оптимизацией управления равномерным потреблением электроэнергии, поступающей из различных источников¹⁵.

Ряд пилотных разработок реализован в сфере транспорта и логистики. В 2020 г. Toyota провела эксперимент по оптимизации крупномасштабной логистической сети с более чем 3 млн возможных маршрутов. Квантовый вычислитель Fujitsu Digital Annealer позволил определить оптимальный маршрут из миллионов потенциальных вариантов с учетом возможности закупки деталей у сотен поставщиков и их доставки через несколько транзитных складов на десятки заводов. Ford вместе со специалистами из NASA проводит эксперименты с компьютером D-Wave¹⁶. На примере Сиэтла проведена оптимизация движения 5 тыс. автомобилей: за 20 секунд для всех машин были рассчитаны индивидуальные маршруты, что привело к уменьшению общего времени движения на 73%.

Тем не менее для реализации практических задач существующие рабочие квантовые устройства пока не превосходят классические суперкомпьютеры (квантовое преимущество подразумевает возможность квантового компьютера решать некоторые специальные задачи

¹⁴ <https://www.ornl.gov/project/modeling-power-grid-dynamics-using-quantum-computing>

¹⁵ <https://news.microsoft.com/2018/06/28/microsoft-and-dewa-bringing-quantum-computing-to-dubai/>

¹⁶ <https://www.cnet.com/roadshow/news/ford-quantum-computing-experiment-cuts-traffic-commute-times/>

на порядки быстрее, чем классическая вычислительная система). Согласно оценкам, для решения задач разного уровня сложности в реальной индустриальной среде могут потребоваться системы квантовых вычислений, состоящие из тысяч кубитов:

- около 1000 логических кубитов – для точного моделирования средних по размеру органических молекул и ряда химических реакций (BASF);
- 7500 логических кубитов – для предсказания стоимости финансовых деривативов в реальном времени (не более 1 с) (Goldman Sachs, IBM);
- 7500 физических кубитов – для моделирования задач, связанных с высокотемпературной сверхпроводимостью с помощью модели Хаббарда (Университет Оксфорда);
- 20 млн физических кубитов – для взлома стандарта шифрования RSA-2048 в течение восьми часов (Google).

Вместе с тем создание квантовых компьютеров никоим образом не умаляет необходимости развития классических компьютеров и суперкомпьютеров. Квантовые процессоры должны, прежде всего, использоваться для решения определенных важных и сверхсложных задач, таких как моделирование сложных молекул, создание новых лекарств, материалов и пр.

В России для развития квантовых вычислений на основе сверхпроводящих кубитов реализован проект «Лиман» – совместная работа Фонда перспективных исследований и ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» при поддержке Минобрнауки России и Госкорпорации «Росатом». Исполнителем проекта выступил научный консорциум, объединяющий ведущие российские вузы (МФТИ, МИСиС, НГТУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана), ИФТТ РАН, Российский квантовый центр и ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», являющееся головной организацией консорциума. В рамках проекта отлажена технология изготовления сверхпроводниковых двухкубитных схем¹⁷.

По направлению квантовых симуляторов на основе сверхпроводников также сформирован

существенный задел – в основном усилиями лаборатории «Сверхпроводящие метаматериалы» МИСиС. В частности, был разработан квантовый метаматериал с 20 потоковыми кубитами¹⁸.

Отдельный проект по созданию сверхпроводящих кубитов реализуется в МФТИ. В 2021 г. здесь впервые в России была создана квантовая интегральная схема на основе пяти сверхпроводниковых кубитов¹⁹. В настоящее время МФТИ обладает уникальной возможностью самостоятельно разрабатывать, изготавливать и тестировать квантовые устройства.

В России существует несколько научных центров, активно занимающихся разработкой универсальных квантовых вычислителей на нейтральных атомах. В Центре квантовых технологий МГУ им. М.В. Ломоносова были продемонстрированы голографические массивы микроловушек, обеспечивающие в перспективе захват до 50 одиночных атомов, а в ИФП им. А.В. Ржанова СО РАН имеется большой опыт работы с ридберговскими атомами в ансамблях.

Группами РКЦ были предложены новые типы квантовых симуляторов на основе ультрахолодных газов, бозонных и фермионных диполей, а также новые системы для топологически защищенной квантовой обработки информации.

Лабораторией спектроскопии наноструктур ИСАН выполнен ряд исследований в области физики ультрахолодных атомных газов. Научная группа лаборатории входит в число мировых лидеров в области моделирования многочастичных квантовых систем.

Задача квантовых вычислений на ионах в России реализуется в рамках программы лидирующих исследовательских центров (ЛИЦ), которую осуществляют РКЦ, ФИАН, Сколтех и ФТИАН. В процессе реализации этого проекта получены первые результаты в области исследования потенциала вероятностного представления квантовых состояний для анализа возможностей квантовых устройств промежуточного масштаба.

¹⁷ <https://fpi.gov.ru/projects/informatsionnye-issledovaniya/iliman/>

¹⁸ <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02608-8>

¹⁹ https://mipt.ru/news/fiziki_mfti_priblizili_sozdanie_kvantovogo_kompyutera_v_rossii

Исследователи из РКЦ и МПГУ совместно разрабатывают квантовый вычислитель на холодных ионах кальция. Изготовлены первые образцы поверхностной ионной ловушки, спроектирована гибридная система вакуумной камеры и ионной ловушки.

РКЦ впервые в России зарегистрирован патент на поляритонный кубит. Активно ведутся исследования по созданию магнонного кубита, удалось образовать локализованную область магнонного Бозе-Эйнштейновского конденсата на большом расстоянии (более 1 мм) от источника магнонов.

В рамках разработки ПО для квантовых вычислений ФТИАН проводит работы по высокоточному моделированию и контролю квантовых информационных технологий. Также МГУ им. М.В. Ломоносова и РКЦ запущены два экспериментальных прототипа облачных платформ для проведения квантовых вычислений.

Таким образом, в России имеется определенный задел по основным технологиям кубитов и созданию прототипов флагманских продуктов (в том числе квантовых процессоров) на их основе.

Государственная поддержка

Правительства многих стран иницируют программы развития и поддержки квантовой отрасли.

В 2016 г. в рамках 13-го пятилетнего плана Китай запустил национальный мегапроект по развитию квантовой связи и вычислений, который предполагает достижение основных результатов в этих направлениях к 2030 г. За последние 15 лет бюджет составил около 1 млрд долл. В 2017 г. китайское правительство выделило 10 млрд долл. на создание крупнейшей в мире квантовой лаборатории в г. Хэфэй.

В 2018 г. в США принят закон о Национальной квантовой инициативе, предусматривающий сотрудничество федеральных центров с академическими учреждениями и частным сектором с первоначальным бюджетом в 1,2 млрд долл. на 5 лет.

В 2018 г. Европейская комиссия запустила программу Quantum Flagship с бюджетом 1 млрд евро, которая поддержала порядка 20 исследовательских проектов. Бюджет национальных программ развития квантовых технологий некоторых стран ЕС (например Германии и Франции) порой существенно превышает общеевропейский. По некоторым оценкам, ассигнования на квантовые технологии в ЕС уже превысили 7 млрд евро.

Помимо этого, в последние один-два года запускаются квантовые стратегии и программы и в ряде других стран:

- в Канаде в 2020 г. организован индустриальный консорциум, основателями которого стали 24 компании, в том числе лидеры квантовой отрасли (D-Wave, 1Qbit, Xanadu, Zapata, ISARA). Финансирование исследований осуществляется через грантовые фонды;
- во Франции в 2021 г. принята Национальная квантовая стратегия (2021–2025 гг.) с бюджетом в 1,8 млрд евро (из них 780 млн евро выделены непосредственно на развитие квантовых вычислений);
- Германия реализует Национальную квантовую программу (2021–2028 гг.), предусмотрено финансирование в размере 2 млрд евро;
- Великобритания осуществляет программу «Национальные квантовые технологии» (2014–2024 гг.) с бюджетом в 1 млрд фунтов;
- в Китае создается Национальная квантовая лаборатория с бюджетом в 10 млрд долл. (новый центр функционирует с декабря 2020 г. в г. Хэфэй на территории 37 га);
- в Индии действует программа развития квантовых технологий Initiative on Quantum Technology (2020–2024 гг.), бюджет – 1,12 млрд долл.;
- Япония осуществляет программу «Квантовый скачок» (2018–2027 гг.) с финансированием в 280 млн долл.;
- Тайвань реализует программу «Квантовый Тайвань» (2021–2025 гг.), бюджет – 282 млн долл.

Важными вехами в развитии квантовых технологий стали создание центров компетенций в крупных индустриальных компаниях и укрепление государственно-частных партнерств. Формируются национальные индустриальные объединения для оценки современного состояния отрасли и ее развития, защиты интересов национальных производителей, создания объектов интеллектуальной собственности, развития экосистемы, финансирования исследований и разработок и т. д.

Первый такой консорциум – Quantum Economic Development Consortium – создан в 2018 г. в США. Сегодня в составе его участников более 100 крупнейших компаний из различных отраслей (ИТ, машиностроение, страхование и финансы и пр.), около 40 университетов, а также национальные лаборатории и общественные организации. В 2020 г. аналогичный консорциум – Quantum Industry Canada – был организован в Канаде. В 2021 г. в Евросоюзе был создан консорциум квантовой индустрии, его постоянными участниками стали около 70 крупных компаний, в том числе Airbus, Atos, BASF,

KPN, E.ON, Thales и др. В 2021 г. аналогичное объединение с участием более 50 компаний, включая Toyota Motor, Toshiba, NEC, NTT, Fujitsu и Hitachi, было сформировано в Японии.

Одно из ключевых направлений государственной поддержки – обеспечение подготовки высококвалифицированных кадров. Уже сейчас в мире отмечается глобальный дефицит специалистов для квантовой отрасли. Критическим требованием является наличие квалификации и широких знаний в смежных областях, включая классическую и квантовую физику, электроинженерию и компьютерные науки. В 2020 г. в США выпущен манифест Quantum Frontiers, где среди неотложных задач, стоящих перед государством, обозначена необходимость подготовки кадров по новой специальности «квантовый инженер».

На сегодняшний день ряд университетов в различных странах уже предлагают сбалансированные образовательные программы в области квантовых информационных технологий. В большинстве случаев это программы для магистратуры продолжительностью от одного до двух лет, реже – для бакалавриата или программы дополнительного образования. Число студентов-магистрантов, ежегодно обучающихся по специальностям, относящимся к квантовой физике, в среднем в университетах составляет от 10 до 30 человек, а в некоторых – до 50–70. В апреле 2021 г. Гарвардским университетом была представлена первая в мире программа аспирантуры по квантовой науке и инженерии.

Поддержка развития квантовых вычислений в России осуществляется в рамках федерального проекта «Цифровые технологии» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». В частности, в 2019 г. на конкурсной основе с учетом установленных критериев институтами развития были отобраны проекты и предоставлены гранты из средств федерального бюджета.

Государственную поддержку по итогам конкурсного отбора получил один проект в области квантовых вычислений: ООО «МЦКТ» признан победителем конкурсного отбора лидирующих исследовательских центров по тематике «Квантовые вычисления, универсальные квантовые

компьютеры, квантовые компьютеры на основе ионов, квантовые алгоритмы и квантовое программное обеспечение». Индустриальным партнером указанной программы ЛИЦ выступает Госкорпорация «Росатом». Реализация проекта ведется с 2020 г.

В целях объединения и координации усилий, направленных на ускорение технологического развития и достижение Россией лидирующих позиций на глобальных технологических рынках в высокотехнологичной области «Квантовые вычисления», заключено соглашение о намерениях между Правительством Российской Федерации и Госкорпорацией «Росатом». Основным механизмом его реализации – дорожная карта, разработанная с целью координации деятельности Госкорпорации «Росатом», Правительства Российской Федерации и иных организаций, участвующих в реализации мероприятий, и получении в средне- и долгосрочной перспективе практически значимых научно-технических результатов мирового и опережающего уровня в области квантовых вычислений. Реализация дорожной карты осуществляется в рамках федерального проекта «Цифровые технологии» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации».

Дорожной картой определены целевые научно-технологические и экосистемные показатели развития, приоритетные технологии, мероприятия по достижению целевых показателей, а также объемы необходимого финансового обеспечения. Ключевыми задачами являются:

- разработка конкурентоспособных технологий квантовых вычислений путем создания квантовых процессоров и квантовых симуляторов, единой облачной платформы для использования квантовых вычислений в решении практических задач;
- формирование научно-технологической экосистемы для развития квантовых вычислений, включая развитие кадрового потенциала, создание образовательных программ, создание стартапов, взаимодействие с технологическими и финансовыми партнерами.

Основные целевые показатели дорожной карты – демонстрация в 2024 г. применения квантовых вычислений для решения реальных

задач, а в 2030 г. – коммерциализация технологии и выход на мировой рынок квантовых вычислений. Итогом реализации мероприятий дорожной карты в перспективе до 2024 г. станет создание полного стека квантовых вычислений – от аппаратных платформ до программных продуктов и алгоритмов.

Одно из ключевых направлений – консолидация заинтересованных образовательных и научных организаций, бизнес-сообщества, формирование научно-технологической экосистемы развития квантовых вычислений. С этой целью в ноябре 2020 г. создан консорциум «Национальная квантовая лаборатория».

Для обеспечения квантовой отрасли квалифицированными кадрами разработаны и успешно реализуются профильные образовательные программы по квантовым вычислениям на базе МФТИ, МИФИ, НИУ ВШЭ, МГУ им. М.В. Ломоно-

сова, МИСиС и МИЭТ. Проводятся мероприятия по развитию профессиональных сообществ (конференции, лекции, семинары и т. п.), включая VI Международную конференцию по квантовым технологиям ICQT 2021: Digital Edition, международный Форум «Открытые инновации» Nobel Vision Open Innovations 2.0, тематические выступления на Петербургском международном экономическом форуме (ПМЭФ), Восточном экономическом форуме (ВЭФ), Московском международном салоне образования (ММСО), Berlin Science Week. Аналогичная работа ведется и в сфере общего образования. Индустриальные партнеры формируют собственные центры компетенций.

В ходе реализации дорожной карты в 2021–2024 гг. должна быть заложена необходимая технологическая база и обеспечена подготовка высококвалифицированных кадров мирового уровня.

Перспективы развития

В ближайшие годы спрос на компьютеры, построенные на квантовых принципах, будет стремительно расти. Это связано со стратегической значимостью технологии для обеспечения национальной безопасности, повышения производительности в ключевых отраслях экономики и социальной сферы, а также развития смежных технологических направлений, в том числе искусственного интеллекта.

Согласно оценкам исследователей, квантовые процессоры на несколько тысяч кубитов и с достаточно низким уровнем ошибок позволят проводить вычисления для решения практических задач оптимизации, сценарного моделирования и машинного обучения, а более сложные системы (объемом в миллионы кубитов) – осуществлять разработку новых материалов и лекарств, поиск в неструктурированных базах данных и криптоанализ.

Рынок квантовых вычислений пока находится в стадии становления. К флагманским продуктам относятся квантовые компьютеры на каждой из развивающихся технологических платформ, системы облачного доступа к ним, а также прикладное программное обеспечение для квантовых вычислений. При этом в сегменте квантовых компьютеров в настоящее время осуществляются продажи только относительно простых устройств и процессоров. Большее распространение и практическое применение на текущем этапе получили облачные сервисы квантовых вычислений, которые позволяют уже сейчас получить доступ к наиболее современной вычислительной инфраструктуре.

Сегодня главным заказчиком квантовых технологий в большинстве стран выступает государство. Во многом это объясняется важностью квантовых технологий для защиты интересов государства, например, для обеспечения безопасности в информационной сфере. Тем не менее, что касается применения в отраслях, квантовые вычисления будут широко востребованы компаниями для обработки больших объемов данных или решения сложных расчетных задач.

Исследования последних десятилетий показывают, что компьютеры, построенные на принципах квантовых вычислений, могут быть во много раз эффективнее классических компьютеров в таких сферах, как квантовая химия и новые материалы, биомедицина, логистическая оптимизация, большие данные и машинное обучение, банки и страхование, финансовый сектор, энергетика, ритейл и др.

Для реализации потенциала квантовых вычислений необходима подготовка квалифицированных специалистов. В ряде ведущих университетов уже создаются сбалансированные образовательные программы в области квантовых информационных технологий.

С целью накопления знаний и обмена опытом на базе лидирующих компаний и крупных исследовательских организаций создаются центры компетенций и консорциумы, в задачи которых входят защита интересов национальных производителей, совместное создание инфраструктуры и интеллектуальной собственности, финансирование проектов и т. д.

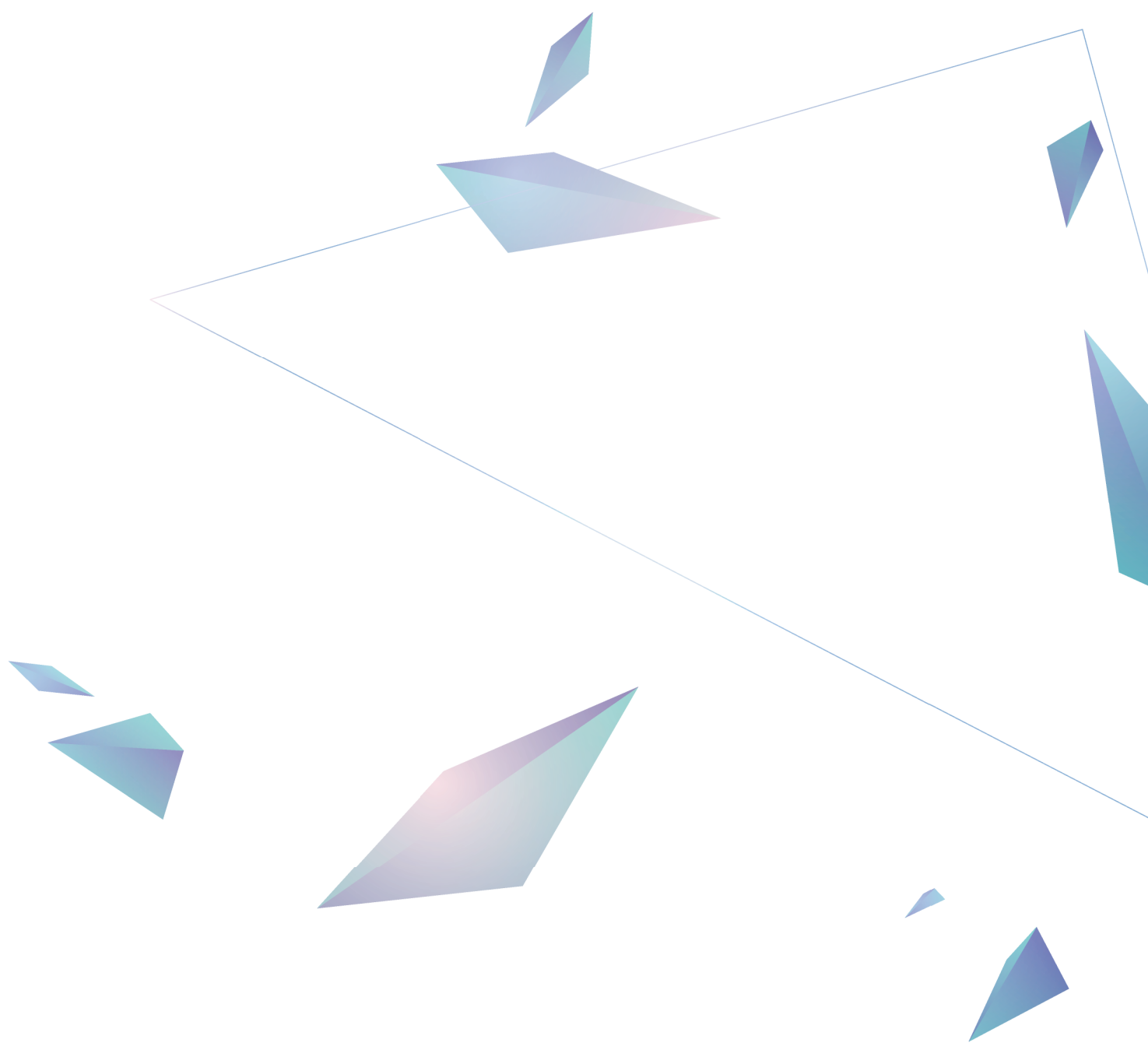
Эволюция будущих технологических решений будет определяться вектором развития квантового аппаратного обеспечения. Согласно прогнозам зарубежных аналитиков, в ближайшие 3–5 лет наиболее мощные квантовые вычислительные системы смогут решать практические оптимизационные задачи, такие как маршрутизация транспорта и логистика, оптимизация финансовых портфелей и торговых расчетов. Реализация более сложных задач займет от 5–7 (некоторые проблемы сценарного моделирования и машинного обучения и др.) до 10–20 лет (моделирование сложных молекул, поиск в неупорядоченных базах данных, криптоанализ и др.).

Создаваемые в нашей стране в рамках реализации дорожной карты технологии и сервисы в полной мере охватывают весь спектр базовых технологий и продуктов высокотехнологичной области «Квантовые вычисления». Однако квантовые компьютеры, разрабатываемые в настоящее время в России, являются эксперименталь-

ными и не предназначены для коммерческих продаж в качестве конечного продукта. Вместе с тем использование модели облачного сервиса квантовых вычислений позволит пользователям реализовывать ряд практических задач оптимизации и машинного обучения. Предполагается, что ежегодно на облачной вычислительной платформе будет выполняться не менее 10 тыс. экспериментов. Будут разработаны библиотеки практических алгоритмов, облегчающих пользователям взаимодействие с вычислительной системой. К 2025 г. в нашей стране будут реализованы полнофункциональные прототипы всех флагманских продуктов квантовых вычислений (квантовых компьютеров, облачных сервисов и прикладного ПО), которые в дальнейшем лягут в основу коммерческих решений. К 2024–2025 гг. в России будут запущены пилотные проекты по расчетам на квантовых компьютерах в интересах промышленных заказчиков. Коммерциализация таких бизнес-моделей и внедрение технологий, продуктов и услуг в отраслях предполагается в 2025–2030 гг.

В настоящее время российский сектор квантовых вычислений отстает от мировых лидеров на 7–10 лет. Предполагается, что выполнение всего комплекса работ, предусмотренных дорожной картой, позволит к 2025 г. сократить этот разрыв до 2–3 лет. В то же время стоит отметить значительное увеличение объемов исследований и разработок, осуществляемых в ведущих странах (в первую очередь США и Китае), а также существенное увеличение государственных и частных инвестиций в развитие квантовых вычислений. По этой причине прогнозы по срокам достижения паритета с мировыми лидерами в области разработки аппаратного обеспечения на сегодняшний день были бы сильно спекулятивными. Тем не менее в сегменте разработки квантового ПО российские технологии уже сейчас приближаются к мировому уровню, что подтверждается успешным опытом взаимодействия отечественных разработчиков с ведущими мировыми корпорациями.

Квантовые коммуникации



Сокращения

ВОЛС	волоконно-оптическая линия связи
ИБ	информационная безопасность
ИТ	информационные технологии
КК	квантовые коммуникации
КРК	квантовое распределение ключей
КС	квантовые сети
СКРК	система квантового распределения ключей
PCT (Patent Cooperation Treaty)	договор о патентной кооперации, международная патентная система

Развитие высокотехнологичного направления «Квантовые коммуникации» имеет критически важное значение для создания комплексной защищенной инфраструктуры цифровой экономики, в том числе для системы государственного управления, особенно с учетом возрастающих угроз в области информационной безопасности.

В России создан значительный научно-технологический задел в области технологий и оборудования квантовых коммуникаций (КК). Задача ОАО «РЖД» как компании-лидера и организаций экосистемы квантовых коммуникаций – трансформировать этот задел в крупные инфраструктурные проекты, обеспечить дальнейшую

разработку технологий и решений, содействовать развитию экосистемы и рынка КК, что выведет Российскую Федерацию на лидирующие позиции по данному направлению в мире.

Для достижения этих целей ОАО «РЖД» и Правительство Российской Федерации заключили соглашение о намерениях по развитию в России высокотехнологичного направления «Квантовые коммуникации». В рамках соглашения разработана дорожная карта¹, реализация мероприятий которой в перспективе до 2024 г. позволит в том числе консолидировать профессиональное сообщество исследователей и инженеров, развить отечественную экосистему КК и сформировать соответствующие рынки.

Что такое квантовые коммуникации?

Квантовые коммуникации – область знаний и технологий, связанных с передачей квантовых состояний в пространстве. Одним из направлений КК является создание защищенных каналов связи на основе квантового распределения ключей (КРК) – метода защиты передаваемой информации с использованием технологий КК, позволяющего гарантированно защитить данные от компрометации и несанкционированного доступа.

За последние пять лет технологии КК в своем развитии перешагнули рубеж от фундаментальных исследований к прикладным разработкам и первым стадиям практического внедрения в отдельных странах. Высокий интерес и инвестиции в данное направление объясняются стратегической важностью КК для обеспечения цифрового суверенитета государств.

По данным Канадского института перспективных исследований на январь 2021 г., 17 стран, включая Китай, США и Россию, имеют действующие национальные программы и инициативы по поддержке исследований и разработок

в области КК. В 12 странах, в том числе в Испании, Дании, ОАЭ, программы, поддерживаемые государством, находятся на начальных этапах реализации. Кроме того, 14 стран участвуют в ряде общеевропейских инициатив. Бюджет каждой программы составляет от нескольких десятков миллионов до 1 млрд долл. В основном финансирование проектов ведется за счет государственных средств. По мере трансфера результатов фундаментальных исследований в практические проекты растет доля частных инвестиций со стороны высокотехнологичных компаний, венчурных инвесторов. Суммарные вложения в развитие области квантовых технологий в мире составляют более 25 млрд долл.² При этом проекты в области КК занимают порядка 20–40% в общем объеме программ и работ по квантовым технологиям.

Ключевым триггером для старта мировой «квантовой гонки» по развитию инфраструктуры КК послужил качественный технологический переход от разработок и пилотного

¹ Дорожная карта развития высокотехнологичной области «Квантовые коммуникации», утвержденная протоколом президиума Правительственной комиссии по цифровому развитию, использованию информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности от 27 августа 2020 г. № 17. Является основным механизмом реализации соглашения о намерениях между Правительством Российской Федерации и ОАО «РЖД» от 10 июля 2019 г. №88, заключенного в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 июля 2019 г. № 1484-р в целях развития квантовых коммуникаций.

² CIFAR. A Quantum Revolution: Report on Global Policies for Quantum Technology. <https://cifar.ca/wp-content/uploads/2021/04/quantum-report-EN-10-accessible.pdf>

тестирования отдельных линий, соединяющих несколько абонентов, к созданию полноценных коммуникационных сетей сложных топологий с большим количеством промежуточных и конечных узлов. В настоящее время многоузловые магистральные и городские оптоволоконные КС развертываются в США, Европе, Великобритании, Японии, Китае, России.

Высокая актуальность и динамичное развитие КК подтверждает устойчивый рост публикационной и патентной активности как в России, так и в мире. С 2010 г. стабильно растет количество научных статей (рис. 1). В последние несколько лет в мире публикуется порядка 2,5 тыс. работ ежегодно. В топ-5 организаций по числу публикаций в 2018–2020 гг. входят научные институты и университеты ведущих стран (три из них расположены в Китае).

Лидируют по уровню фундаментальных и прикладных исследований в области квантовых коммуникаций Китай, США, Германия, Великобритания, Япония, Канада, Швейцария, Республика Корея и некоторые другие. Россия входит в топ-10 стран по уровню публикационной и патентной активности. Ее доля составляет более 4% в общемировом числе публикаций и около 1% – в объеме патентных заявок.

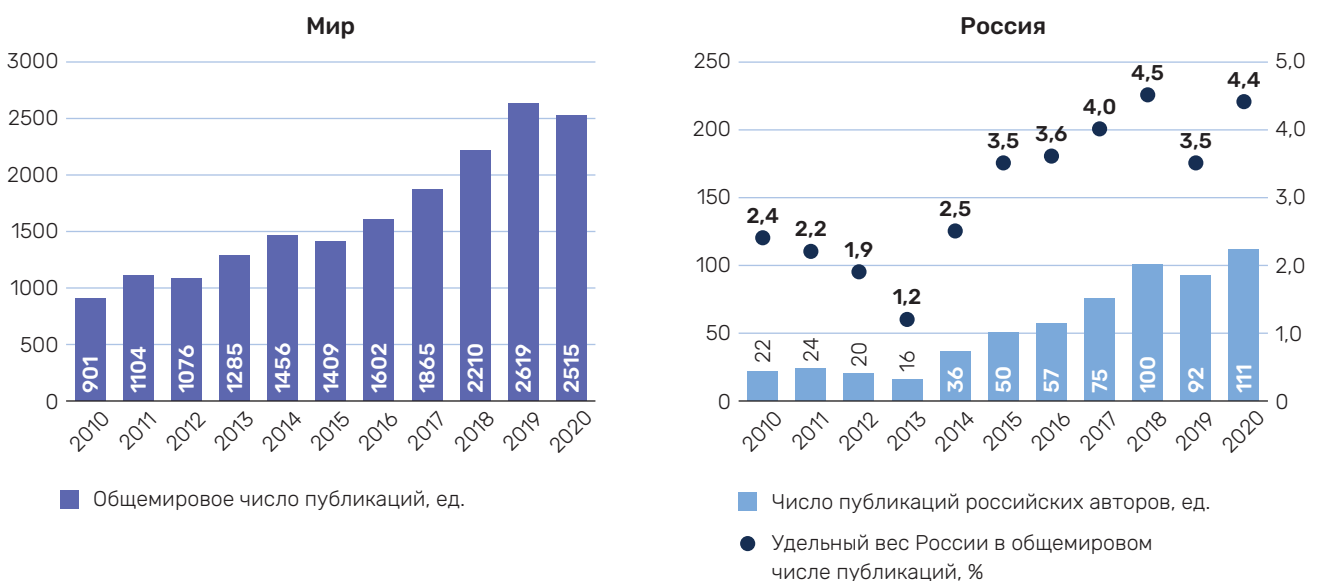
Общее количество патентных заявок в мире пока не столь велико – порядка 600–700

в год (рис. 2). Китай здесь лидирует с огромным отрывом: общее число его заявок за 2017–2019 гг. в 10 раз выше, чем у США, которые находятся на втором месте (1443 против 141).

В топ-5 организаций по числу патентных заявок в 2017–2019 гг. помимо научных организаций также входит одна компания-разработчик – QuantumCTek (Китай). Это подтверждает рост коммерческого интереса к разработкам в сфере КК со стороны бизнеса.

В России наблюдается аналогичная тенденция. Лидерами являются научные центры, которые формируют основной вклад в публикационную активность: МГУ им. М.В. Ломоносова, Университет ИТМО, НИТУ МИСиС, КФТИ, КНИТУ-КАИ, НИУ ВШЭ. Работы ведутся рядом коммерческих предприятий, создающих продукцию и сервисы в области КК. Сформированы центры компетенций Национальной технологической инициативы (Центр компетенций НТИ «Квантовые коммуникации» на базе НИТУ МИСиС, Центр квантовых технологий физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова), а также лидирующий исследовательский центр – Национальный центр квантового интернета на базе ИТМО – в рамках федерального проекта «Цифровые технологии» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации».

Рис. 1. Ключевые показатели публикационной активности



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

По мере развития информационных технологий всё большую значимость приобретают угрозы кибератак, направленных в первую очередь на государственные и медицинские учреждения, промышленные предприятия. Кроме того, ряд ведущих научных организаций и компаний (Google, IBM и др.) проводят исследования по созданию квантового компьютера и демонстрируют достижение «квантового превосходства», которое потенциально позволяет значительно увеличить скорость решения вычислительных задач. Другие исследовательские группы работают в направлении увеличения надежности защиты данных. С этой точки зрения квантовые коммуникации имеют большое значение для индустрии, поскольку технологии этого направления позволяют обеспечить защиту цифровых данных за счет фундаментальных законов квантовой физики.

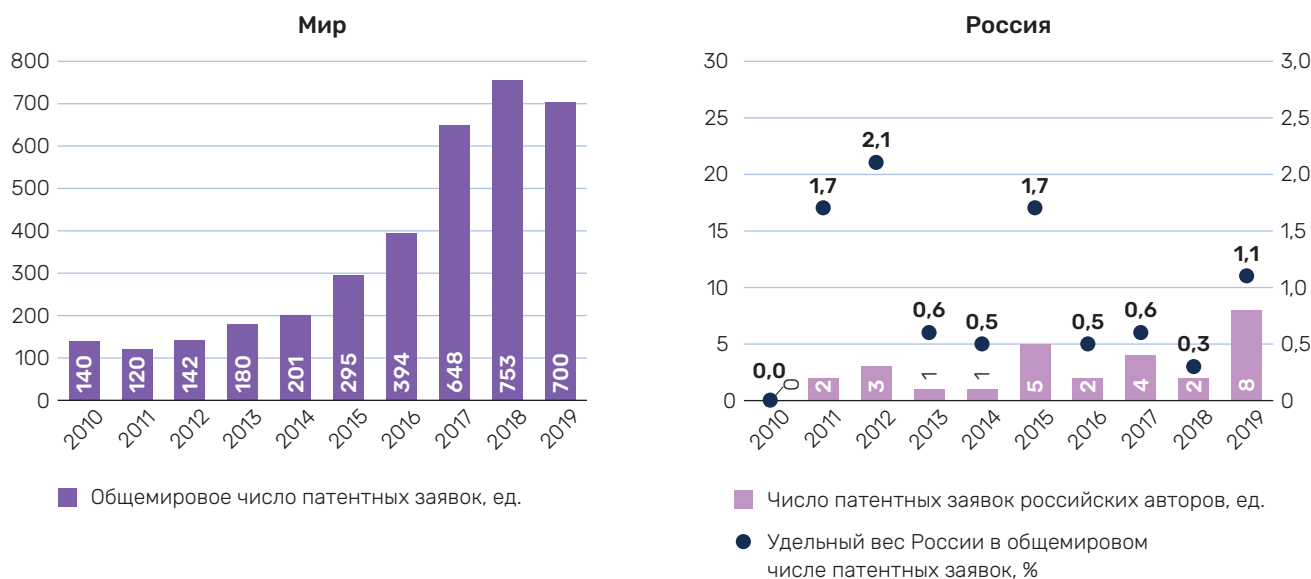
Также возрастает активность в области венчурных инвестиций. В 2018 г. состоялась сделка по приобретению компании ID Quantique корейским телекоммуникационным оператором SK Telecom. С учетом стратегического значения квантовых технологий для развития сетей связи, в том числе 5G, в рамках сделки компания была оценена в 130 млн долл. В 2020 г. китайская

компания QuantumCTek, занимающаяся разработками оборудования для квантовых сетей (КС), вышла на IPO³ и стала первым квантовым «единорогом». Сейчас ее стоимость составляет более 2 млрд долл. В 2021 г. стартап Quantum Xchange привлек 13 млн долл.

Распространение КК тесно связано с развитием смежных технологических направлений. В отдельных странах (Китай, Канада, Республика Корея и др.) при активной поддержке правительств ведутся работы по интеграции наземных оптоволоконных КС с космическим сегментом для создания единого защищенного национального и международного информационного пространства.

В рамках национальных программ и исследовательских инициатив по развитию квантовых технологий значительное внимание уделяется изучению возможности использования новых материалов, таких как сверхпроводники, топологические материалы и материалы с определенными примесями или дефектами, которые перспективны для использования в качестве квантовых датчиков, кубитов, источников фотонов и других компонентов устройств, вычислительных и коммуникационных систем.

Рис. 2. Ключевые показатели патентной активности



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

³ <https://fortune.com/2020/07/09/chinese-stocks-quantumctek-co-ipo>

Технологии

В структуре высокотехнологичного направления можно выделить четыре группы технологий, которые определяют будущий облик флагманских продуктов и сервисов на основе КК: квантовые коммуникационные сети, недоверенные промежуточные узлы связи, атмосферные и космические линии связи и клиентские устройства квантовых коммуникаций (рис. 3).

Квантовые коммуникационные сети позволяют предоставлять широкий спектр сервисов и услуг защиты информации. При построении таких сетей применяются различные уровни топологии. Наиболее распространенным является базовое решение, реализующее простейшую геометрию «точка–точка», предназначенное для применения в инфраструктуре государственных организаций и коммерческих компаний в части аутентификации, а также защиты хранения и передачи данных.

Более сотни компаний в Китае уже используют национальную квантовую сеть в коммерческих целях. В августе 2021 г. в рамках европейской программы EuroQCI состоялись первые межправительственные переговоры

с использованием технологий КК на саммите G20 между Италией, Словенией и Хорватией. Сеанс видео-конференц-связи по квантовым каналам осуществлялся между городами Триест, Любляна и Риека.

За рубежом целый ряд научных групп и компаний ведут работы по созданию и совершенствованию сетей КК: ID Quantique (Швейцария – Республика Корея), QuantumCTek, Huawei (Китай), Toshiba (Япония), SecureNet (Франция) и др. В 2022–2023 гг. наиболее актуальным для России представляется формирование полного набора решений, соответствующих международному уровню, в том числе по техническим характеристикам, таким как дальность линий связи (до 200–220 км на один пролет), скорость генерации квантовых ключей (порядка 50–200 кбит/с «просеянного» ключа), а также оптимизация стоимости оборудования за счет использования новых протоколов и совершенствования производства.

Недоверенные промежуточные узлы связи. Одно из приоритетных направлений развития КК в мире – создание устройств и систем на основе технологии квантовых повторителей,

Рис. 3. Структура высокотехнологичного направления



Источник: ОАО «РЖД».

разработка которых активно ведется, в том числе, в рамках различных государственных программ. Основная цель при этом – переход к режиму недоверенных промежуточных узлов связи, что позволит принципиально повысить качество, изменить режимы функционирования и эксплуатации квантовых коммуникационных сетей за счет отказа от требований по расположению промежуточных узлов сети в доверенных зонах. Ключевым технологическим барьером для дальнейшего развития направления является недостаточный уровень готовности технологии квантовой памяти. Преодоление соответствующих ограничений придаст новый стимул развитию КК.

Атмосферные и космические линии связи. Для масштабирования квантовых коммуникационных сетей, увеличения охвата абонентов и расширения сферы внедрения квантовых коммуникаций требуется создание квантово-защищенных атмосферных каналов связи, в том числе с использованием подвижных объектов, а также с интеграцией космического сегмента.

В связи с активным развитием космической отрасли в настоящее время ряд стран (Китай, Россия, США, Канада и др.) проводят разработки систем КРК (СКРК) с применением низкоорбитальных спутников. Реализуются или планируются к выполнению в 2022–2024 гг. эксперименты по функционированию доверенных промежуточных узлов квантово-защищенной связи на базе малых космических аппаратов на околоземной орбите, а также на базе модулей, устанавливаемых на Международной космической станции.

Клиентские устройства квантовых коммуникаций. Для подключения конечных потребителей к квантовым сетям необходимы разработка и создание оборудования КРК для абонентских устройств. Управление и мониторинг клиентских терминалов должны осуществляться приложениями и программными интерфейсами для абонентских систем.

Технологии создания клиентских устройств КК сейчас находятся на стадии активных разработок, что стимулируется широким спросом со стороны коммерческих структур (банков, крупных и средних компаний и др.),

правительств, социальной сферы (в том числе здравоохранения) и др.

Компании-лидеры, например ID Quantique и QuantumCTek, уже предлагают на рынке портативные устройства управления, хранения и выдачи квантовых ключей. Компания Quantum Xchange продвигает на рынке готовые решения для управления ключевым сервисом.

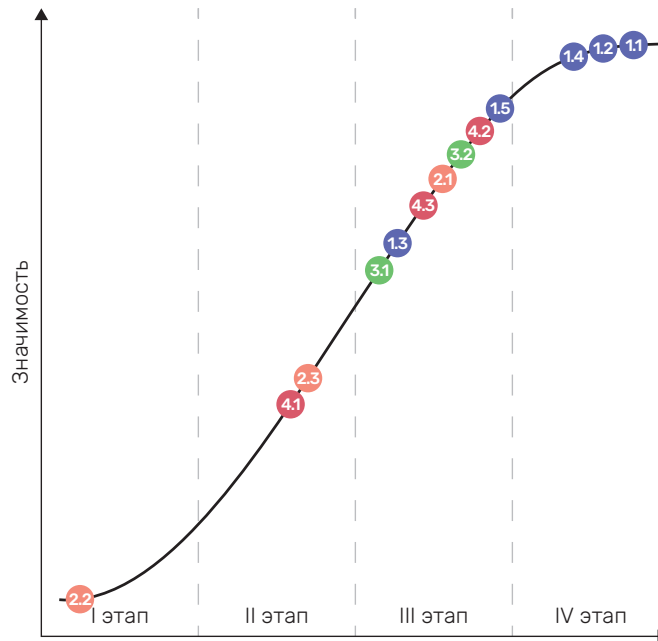
Группы технологий КК существенно различаются по уровню зрелости (рис. 4). На сегодня самым высоким уровнем готовности в России и мире характеризуются магистральные оптоволоконные квантовые коммуникационные сети, тогда как технологии недоверенных промежуточных узлов в сетях квантовой связи пока еще находятся на довольно раннем этапе развития.

Спектр технологий, развиваемых в России, в целом соответствует отмеченным глобальным трендам. По оценке ОАО «РЖД», перечень приоритетных технологий, определенный в дорожной карте развития высокотехнологичной области «Квантовые коммуникации», достаточен для создания необходимых флагманских продуктов и продуктовых линеек на горизонте 2024 г. Разрабатываемый план развития высокотехнологичного направления «Квантовые коммуникации» до 2030 г. позволит охватить всю область применения технологий КК – вплоть до интеграции с космическим сегментом.

Сфера квантовых коммуникаций не отличается высокой патентной и публикационной активностью, в том числе в силу стремления исследовательских центров и компаний сберечь ноу-хау и сохранить конфиденциальность коммерчески значимой информации о проводимых исследованиях и разработках. Порядка 55% научных статей и 80% заявок на патенты в рамках квантовых коммуникаций относятся к технологиям квантовых коммуникационных сетей, в том числе к развитию элементной базы и оборудования (рис. 5). Данные показатели коррелируют с объемами рынка флагманских продуктов.

На данный момент в нашей стране наиболее высокий уровень развития достигнут в области разработки изделий и технологий передачи квантовых ключей по оптоволоконным каналам. При создании систем квантового распределения ключей по волоконно-оптическим линиям связи

Рис. 4. Кривая технологической зрелости



Квантовые коммуникационные сети

- 1.1 Магистральные оптоволоконные квантовые сети
- 1.2 Технологии доверенных промежуточных узлов в сетях КРК
- 1.3 Мультиплексирование квантовых и классических (информационных) каналов
- 1.4 Технологии управления квантовыми сетями и предоставления сервисов на их основе
- 1.5 Протоколы и алгоритмы КРК

Атмосферные и космические линии связи

- 3.1 Атмосферные квантовые линии связи
- 3.2 Космические квантовые линии связи

Недоверенные промежуточные узлы связи

- 2.1 Технологии недоверенных промежуточных узлов в сетях КРК на основе несепарабельных состояний
- 2.2 Технологии недоверенных промежуточных узлов в сетях КРК на основе квантовых повторителей
- 2.3 Технологии аппаратно-независимых систем КРК

Клиентские устройства квантовых коммуникаций

- 4.1 Абонентские системы КРК
- 4.2 Приложения и программные интерфейсы для абонентских систем КРК
- 4.3 Постквантовая криптография

Источник: ОАО «РЖД».

Методические пояснения. Значимость характеризует уровень зрелости технологии и отражает нормализованную упоминаемость технологии в данный период времени в публикациях соответствующего типа (научные статьи, патенты, рыночная аналитика). С учетом интенсивности исследований и разработок выделены четыре этапа:

I этап – зарождение технологии (высокая публикационная активность);

II этап – расцвет технологии (рост патентования и объема рыночной аналитики);

III этап – зрелость технологии (преобладание рыночной аналитики);

IV этап – плато (снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике).

ключевой задачей является увеличение длины квантовых каналов связи и средней скорости генерации «просеянного» квантового ключа. Пилотные испытания решений проведены на полигонах ПАО «Ростелеком», ОАО «РЖД» и других компаний.

На базе российского оборудования реализован целый ряд квантовых коммуникационных сетей, в том числе при активном участии ведущих университетов, включая МГУ им. М.В. Ломоносова, КНИТУ, Университет ИТМО, НИТУ МИСиС, МТУСИ.

Рис. 5. Основные показатели публикационной и патентной активности по группам технологий

		Научные публикации			Патентные заявки			
		Мир	Россия	Доля России, %	Мир	Россия	Доля России, %	
Квантовые коммуникационные сети	2020	1530	81	5,3	2019	593	7	1,2
	2015	935	47	↑	2015	228	5	↑
	2010	678	21	3,1	2010	125	0	0
Недоверенные промежуточные узлы	2020	172	1	0,6	2019	19	1	5,3
	2015	66	0	↑	2015	0	0	↑
	2010	22	0	0	2010	0	0	0
Атмосферные и космические линии связи	2020	4	0	0	2019	2	1	50
	2015	0	0	↑	2015	0	0	↑
	2010	2	1	50	2010	0	0	0
Клиентские устройства квантовых коммуникаций	2020	1027	33	3,2	2019	113	0	
	2015	489	4	↑	2015	69	0	
	2010	224	0	0	2010	18	0	

Источники: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ; ОАО «РЖД».

Продукты и рынки

Сегодня на рынке представлены линейки оборудования для КК, обеспечивающие сервисы предоставления квантовых ключей и квантово-защищенных каналов передачи данных, а также сопутствующие услуги. Для обеспечения указанных сервисов с использованием волоконно-оптических и атмосферных оптических линий связи требуются такие флагманские продукты, как магистральные системы квантового распределения ключей, СКРК «точка-многоточка», СКРК через наземные атмосферные оптические каналы связи, высокоскоростные шифраторы с поддержкой квантового канала.

СКРК с подвижными объектами позволяют расширить области применения сервисов для управления беспилотным транспортом. Увеличение дальности распределения квантовых ключей до межконтинентальных расстояний, а также необходимость доставки ключей на удаленные локации без прокладки оптоволоконных линий требуют развития спутниковых СКРК.

Разработка разнообразных портативных устройств КРК для абонентских устройств обеспечит возможность подключения оконечных абонентов, расширения сферы применения и рынков КК. Управление и мониторинг производятся посредством систем управления КС со стационарными и мобильными абонентами с использованием серверов квантово-защищенных ключей. В части оборудования, применяемого при построении квантовых сетей связи, требуется разработка специализированных устройств формирования случайных последовательностей, устройств счета одиночных фотонов, а также мультиплексоров квантовых и информационных каналов (xWDM) для обеспечения совместной работы квантового канала с классическим.

Научно-исследовательские организации, крупные корпорации и стартапы во всем мире

все активнее вовлекаются в развитие технологий и рынка КК, разработку изделий, архитектурных решений и систем. Компания QuantumCTek производит полную линейку оборудования и предлагает решения для построения магистральных, городских и локальных сетей квантовых коммуникаций⁴. ID Quantique (Швейцария – Корея) специализируется на СКРК, системах квантового сетевого шифрования, а также на ключевой элементной базе – счетчиках одиночных фотонов и квантовых генераторах случайных чисел⁵. Quantum Xchange разрабатывает решения для передачи квантово-защищенной информации, сети доставки ключей с динамической маршрутизацией для обеспечения безопасности данных и сетей связи⁶. Toshiba развивает направление разработки мультиплексоров, детекторов одиночных фотонов и дальнепроблетных СКРК на их основе⁷.

Одним из наиболее перспективных направлений развития и потенциальным флагманским продуктом в области КК можно также считать сервис распределения ключей с использованием низкоорбитальных спутников в качестве доверенных узлов. Подобные системы способны радикально увеличить географический охват и область применения технологий. Безусловным лидером в этом направлении является Китай⁸.

Объем мирового рынка флагманских продуктов и сервисов в 2020 г. оценивался в 18 млн долл. При этом основную долю рынка составляют устройства счета одиночных фотонов (35%), магистральные СКРК (20%) и серверы квантово-защищенных ключей (20%)⁹. К 2024 г. прогнозируется рост объема мирового рынка до 4 млрд долл., где основную долю (более 50%) будут составлять сервисы и готовые решения (25%)¹⁰.

В мире уже реализован целый ряд коммерческих проектов с использованием квантовых сетей связи.

⁴ <http://www.quantum-info.com/English>

⁵ <https://www.idquantique.com>

⁶ <https://quantumxc.com>

⁷ <https://www.toshiba.co.jp/qkd/en/index.htm>

⁸ An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03093-8>

⁹ <https://digital.ac.gov.ru/upload/iblock/a28/Дорожная%20карта%20квантовые%20коммуникации.pdf>

¹⁰ <https://www.ptsecurity.com/ru-ru/research/analytics/cybersecurity-threatscape-2020>

В 2017 г. создана национальная магистральная квантовая сеть Пекин–Шанхай протяженностью более 2000 км. Также в 2017 г. осуществлен ввод в эксплуатацию низкоорбитального квантового спутника «Мо-цзы» и проведен первый сеанс связи между Пекином и Веной с использованием спутника в качестве доверенного узла. Продемонстрирована интеграция китайской магистральной квантовой сети со спутниковым сегментом связи¹¹.

Национальная квантовая сеть, реализуемая в Китае, – наиболее протяженная в мире. Сеть позволяет осуществлять обмен защищенной информацией на расстоянии до 4600 км посредством волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), интегрированных с двумя оптическими каналами связи «Земля–спутник», и эксплуатируется более чем 150 промышленными предприятиями по всей стране, включая государственные и местные банки, муниципальные электросети и веб-сайты электронного правительства¹².

В США первая открытая коммерческая квантовая сеть разрабатывается компанией Quantum Xchange. Она соединит города Бостон и Вашингтон. Протяженность сети (суммарная длина оптического волокна) составит около 800 км, в настоящее время в эксплуатацию введено порядка 400 км магистральной квантовой сети. В дальнейшем планируется ее расширение на территорию всей страны. Первый участок сети (Нью-Йорк–Нью-Джерси) уже запущен и функционирует на коммерческой основе¹³.

В феврале 2020 г. Департамент энергетики США анонсировал проект «национального квантового интернета», в разработке и эксплуатации которого будут участвовать 17 национальных лабораторий¹⁴. Первый участок сети протяженностью около 80 км, работающий на принципе передачи запутанных квантовых состояний, запущен в экспериментальном режиме в районе города Чикаго.

В Республике Корея в 2020 г. компания Samsung совместно с ведущим южнокорейским

оператором SK Telecom выпустила в продажу мобильный телефон с квантовым генератором случайных чисел, используемым для аутентификации и защиты чувствительных данных, включая финансовые транзакции¹⁵.

В Европейском союзе в качестве испытательного стенда для технологий, которые будут использоваться при построении кибербезопасной квантовой коммуникационной инфраструктуры в масштабах всего ЕС, сформирован проект OpenQKD¹⁶, который стартовал в рамках исследовательской программы EU Horizon 2020 («Горизонт 2020»)¹⁷. 25 стран – членов ЕС подписали декларацию о европейской инфраструктуре квантовых вычислений (EuroQCI), которая будет разработана при поддержке Европейского космического агентства.

В нашей стране достигнутый уровень зрелости технологий КК уже позволяет перейти к стадии производства и коммерциализации продуктов и сервисов на их основе. Наиболее высокий уровень готовности в России достигнут в области технологий передачи квантовых ключей по оптоволоконным каналам (8-й уровень готовности технологий, УГТ-8, по оценке ОАО «РЖД»), что соответствует передовому мировому уровню. По ряду решений проведены пилотные испытания на полигонах ПАО «Ростелеком», ОАО «РЖД» и других компаний.

В области разработки и производства сверхпроводниковых однофотонных детекторов достигнут максимальный уровень готовности технологии (УГТ-9, по оценке ОАО «РЖД»). Эти технологии наилучшим образом подходят для использования в оптоволоконных магистральных каналах для передачи квантовых ключей на большие расстояния благодаря своим уникальным характеристикам: высокая квантовая эффективность (более 90%), быстроедействие и низкий шум.

На базе российского оборудования проведен ряд экспериментальных исследований и испытаний на полигонах квантовых сетей,

¹¹ An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-03093-8>

¹² Там же

¹³ <https://quantumxc.com/what-are-quantum-networks-and-how-do-they-work>

¹⁴ National quantum initiative supplement to the president's fy 2021 budget. <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:Hu899rtEJTQJ:https://www.osti.gov/servlets/purl/1638794+&cd=3&hl=ru&ct=clnk&gl=ru>

¹⁵ https://sktelecom.com/en/press/press_detail.do?page.page=2&idx=1503&page.type=all&page.keyword=

¹⁶ <https://openqkd.eu>

¹⁷ <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/home>

созданных в Москве, Санкт-Петербурге, Казани, Самаре и других городах. На волоконно-оптической инфраструктуре ОАО «РЖД» создан пилотный участок магистральной квантовой сети Москва–Санкт-Петербург для соединения центров обработки данных Северо-Западного и Центрального федеральных округов. В окончательной конфигурации пилотный участок сети сопоставим или превосходит зарубежные аналоги, в том числе по таким характеристикам как протяженность, скорость передачи данных, количество промежуточных узлов, соединяемых по ВОЛС. Для дальнейшего развития технологий квантовых коммуникаций в России актуальной задачей является реализация комплекса мер по сертификации разрабатываемых изделий и комплексов.

В 2021 г. запускаются проекты по разработке технологий и устройств для магистральных линий большой протяженности, созданию СКРК с недоверенными узлами связи и с квантовым повторителем на основе оптической памяти, по реализации протоколов КРК на непрерывных переменных и протоколов квантовой связи с использованием запутанных состояний.

В рамках направления развития атмосферных и космических линий связи запланированы работы по созданию космических систем КК для мобильного развертывания сетей. Кроме того, будут созданы устройства КК на основе фотонных интегральных схем, а также клиентские устройства, такие как мультиплексор квантовых и информационных каналов, модуль СКРК для корпоративных сетей и центров обработки данных.

Государственная поддержка

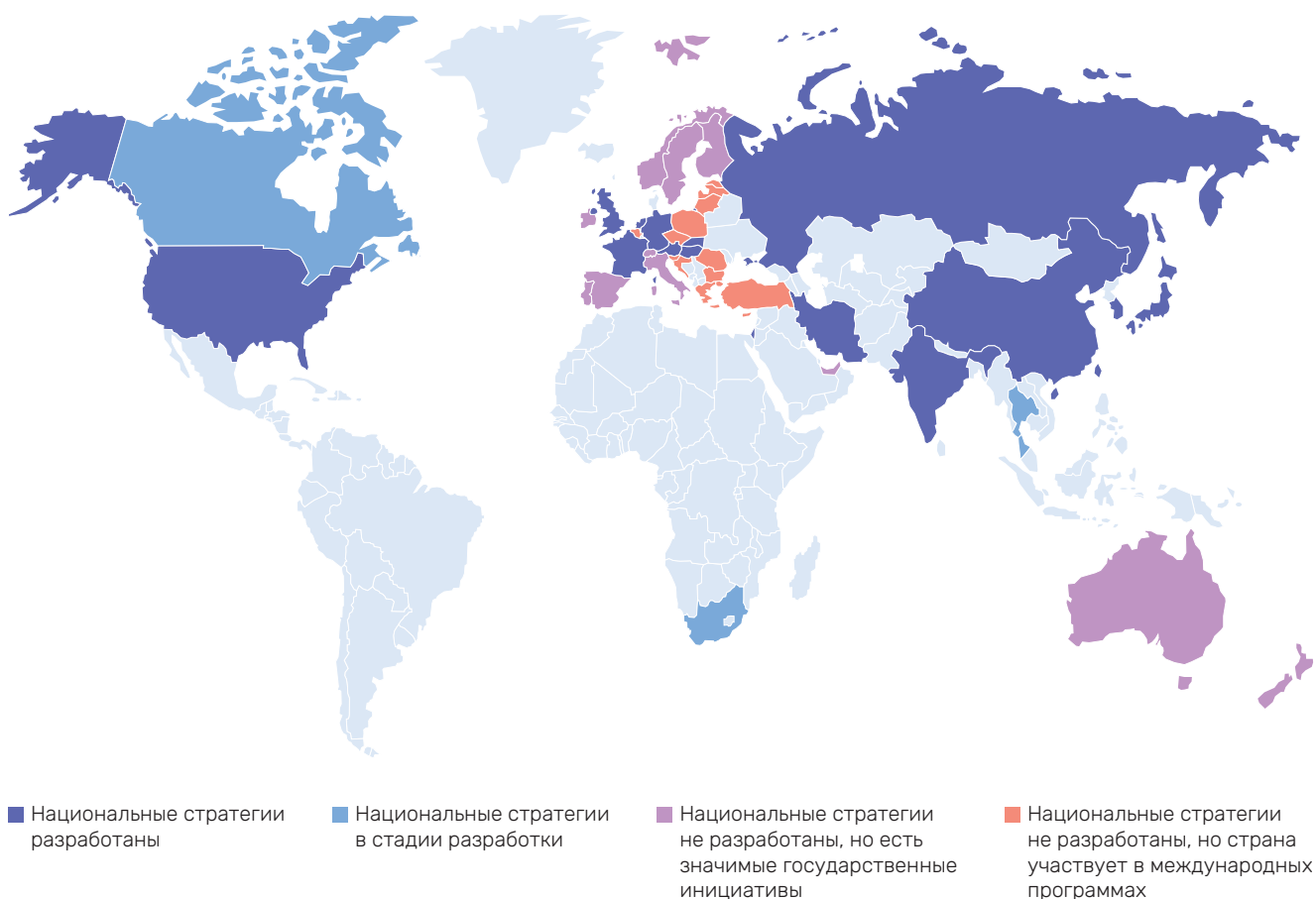
Для разработки прорывных технологий КК ведущие страны разрабатывают национальные квантовые программы и стратегии и выделяют существенное финансирование для их реализации (рис. 6). В большинстве стран, достигших успехов в области КК, были сформированы полноценные экосистемы, призванные поддержать развитие данного высокотехнологического направления. В такие экосистемы входят, в частности, кооперации и консорциумы, состоящие из научно-технических институтов, разработчиков и производителей оборудования, операторов связи, образовательных организаций, фондов поддержки исследований и разработок, государственных и частных компаний (потенциальных потребителей

технологии). Создаются территориальные кластеры организаций на базе полигонов внедрения магистральных КС.

Ключевой центр развития квантовых технологий в Китае – Национальная лаборатория квантовых информационных наук. В ее создание было вложено 10 млрд долл. С 2015 г. реализуется программа «Сделано в Китае 2025», где квантовые технологии выделены среди приоритетных направлений технологического развития. Ее основные цели – развитие экономики с опорой на отечественные инновации, уменьшение зависимости КНР от иностранных технологий и зарубежных инвестиций.

В США для координации и поддержки Национальной квантовой инициативы создано

Рис. 6. Национальные стратегии развития квантовых технологий в мире



Источник: по данным CIFAR.

Национальное квантовое бюро. Оно обеспечивает взаимодействие между консорциумами и исследовательскими центрами (всего порядка десяти организаций). Для поддержки квантовой промышленности США создан Консорциум квантового экономического развития, который состоит из более чем 100 организаций (Amazon, AT&T, Cisco и др.). В рамках Национальной квантовой инициативы выделено пять основных программ: сети, сенсоры и метрология, вычисления, фундаментальные исследования, базовые технологии. Общий бюджет указанных программ в 2021 г. составил 700 млн долл. Для продвижения образовательных программ и создания кадрового резерва было учреждено Национальное образовательное партнерство Q-12, которое связывает студентов с государственными и частными организациями для стажировок, трудоустройства и других форм взаимодействия.

В Канаде за ускорение инноваций и коммерциализацию квантовых технологий отвечает Институт квантовых алгоритмов. Для поддержки его программ правительство выделило 2,2 млн долл. Помимо этого ведущие канадские компании запускают программу «Квантовая индустрия Канады» (1QBit, AFT, CEW System Canada Inc, CogniFrame и др.). Канадское правительство выделило порядка 1,5 млн долл. Институту квантовых вычислений для проведения научно-исследовательской миссии Quantum Encryption and Science Satellite (QEYSSat), целью которой является увеличение защищенности линий передачи информации между космическими аппаратами и наземными станциями.

В ЕС помимо национальных программ поддержки и развития в 2018 г. организована крупнейшая инициатива в области КК (Quantum Flagship). Она поддерживает более 100 научных проектов, над которыми работают порядка 5 тыс. исследователей. В целях их координации создан консорциум QFlag, объединяющий исследовательские институты и коммерческие организации в области квантовых технологий из Франции, Германии, Италии, Нидерландов, Испании, Швейцарии и др. Данная программа рассчитана на 10 лет с бюджетом 1 млрд евро.

В 2021 г. Европейский союз запланировал выделить не менее 4,5 млрд евро на развитие квантовых технологий на период до 2027 г.

Средства будут распределены между несколькими проектами. Один из них – разработка будущей сети КК в рамках консорциума EuroQCI. К 2027 г. эта сеть должна обеспечить безопасность обмена критически важной информацией между странами ЕС.

В Европе сформирован консорциум OpenQKD, основные цели которого – создание тестовой квантовой коммуникационной инфраструктуры и повышение безопасности критически важных приложений в различных областях (от телекоммуникаций до электроснабжения и здравоохранения). В 2021 г. также создан европейский консорциум Quanteria II, финансирующий исследования по программе Quantum Flagship. Его основные цели – укрепление сотрудничества между странами, стимулирование междисциплинарных исследований и интеграция национальных и региональных исследовательских сообществ в Европе.

В Великобритании в 2013 г. утверждена Национальная программа развития квантовых технологий при участии правительства, исследовательских советов, Национальной физической лаборатории, Министерства обороны и Национального центра кибербезопасности. Цель программы – трансфер результатов фундаментальных теоретических работ на рынок продуктов и услуг. В рамках программы выделены четыре квантовых направления (коммуникации, сенсоры, моделирование и визуализация), за развитие которых отвечают соответствующие научные центры. За КК отвечает Центр квантовых коммуникаций – консорциум из университетов Великобритании, промышленных партнеров и заинтересованных организаций государственного сектора. В 2014–2019 гг. в развитие КК было инвестировано 24 млн ф. ст. (порядка 20% общего бюджета на развитие квантовых технологий).

В Германии тематику квантовых технологий курирует Федеральное министерство образования и науки совместно с Федеральным министерством экономики и энергетики, Федеральным министерством внутренних дел и Федеральным министерством обороны. Сформирована единая программа «Квантовые технологии – от основ к рынку». В ней выделены четыре приоритетные области исследований квантовых технологий: вычисления и моделирование, связь и криптография,

технологии измерения и зондирования, базовые технологии. Бюджет программы изначально составлял 650 млн евро с 2018 по 2022 г. В 2020 г. он был увеличен на 1,1 млрд евро. В перспективе программу могут продлить до 2028 г. Отдельно стоит отметить инициативу QuNET, направленную на стимулирование исследований фотонных технологий для квантовых коммуникационных сетей. На ее финансирование в 2019 г. выделен грант в размере 25 млн евро (общее финансирование до 2026 г. составит 125 млн евро).

В Швейцарии развитие квантовых технологий поддерживают Швейцарский национальный научный фонд и инновационное агентство Innosuisse. Под их началом разработана программа «Квантовая наука и технологии». Для координации программы создан Национальный центр компетенций, деятельность которого направлена на развитие криптографии, вычислений и исследований новых парадигм фундаментальной физики. Общий бюджет на 2019–2021 гг. оценивается в 50 млн швейцарских франков, из которых 30% предоставлено самим центром, остальное – научными и промышленными партнерами (ID Quantique, Zurich Instruments, Qnami, IBM и др.).

В нашей стране координация усилий, направленных на ускорение технологического развития и достижение лидерских позиций на глобальных технологических рынках в сфере квантовых коммуникаций, осуществляется в соответствии с дорожной картой развития высокотехнологичной области «Квантовые коммуникации», разработанной ОАО «РЖД» совместно с ведущими организациями и экспертным сообществом в рамках реализации соглашения о намерениях, заключенного между ОАО «РЖД» и Правительством Российской Федерации в целях развития данной области.

В соответствии с дорожной картой в 2021–2022 гг. должны быть инициированы порядка 30 мероприятий, по итогам выполнения которых планируется разработать и вывести на рынок более десяти продуктов и сервисов, созданных на основе девяти приоритетных технологий квантовых коммуникаций, определенных в дорожной карте.

Основная цель развития высокотехнологичной области «Квантовые коммуникации», установленная в дорожной карте, – выход России на лидирующие позиции в мире по технологиям, продуктам и сервисам в области квантовых коммуникаций. Для этого необходимо решить три ключевые задачи:

- повышение технического уровня разработок до мирового (скорость генерации и дальность распределения ключей, мультиплексирование квантовых и информационных каналов, развитие атмосферных и космических линий связи и др.);
- формирование инфраструктуры (магистральные сети, локальные сети, центры управления и мониторинга и др.);
- развитие экосистемы и формирование рынков товаров и услуг (подготовка кадров, национальная и международная стандартизация, информационное продвижение и профессиональные сообщества, развитие рынка, нормативное регулирование и др.).

Распространение квантовых коммуникаций позволит усовершенствовать защиту инфраструктуры цифровой экономики, что особенно важно с учетом современных угроз в области информационной безопасности, а также будет способствовать реализации Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

Перспективы развития

Развитие квантовых коммуникаций направлено на обеспечение гарантированной секретности вырабатываемых ключей для выбранного класса защиты, повышение надежности оборудования и др. Разрабатываемые флагманские продукты (квантовые коммуникационные сети, недоверенные промежуточные узлы связи, атмосферные и космические линии связи, а также клиентские устройства квантовых коммуникаций и др.) имеют широкие перспективы внедрения и коммерциализации в отраслях.

Основную долю рынка квантовых коммуникаций в настоящее время занимают устройства, которые обеспечивают функционирование квантовых коммуникационных сетей: оптоволоконные СКРК, серверы квантово-защищенных ключей, источники и детекторы фотонного излучения. Продукты и сервисы на основе КК наиболее востребованы в таких отраслях, как финансовые услуги, телекоммуникации, медицина, контроль критической инфраструктуры, транспорт, государственное управление и др.

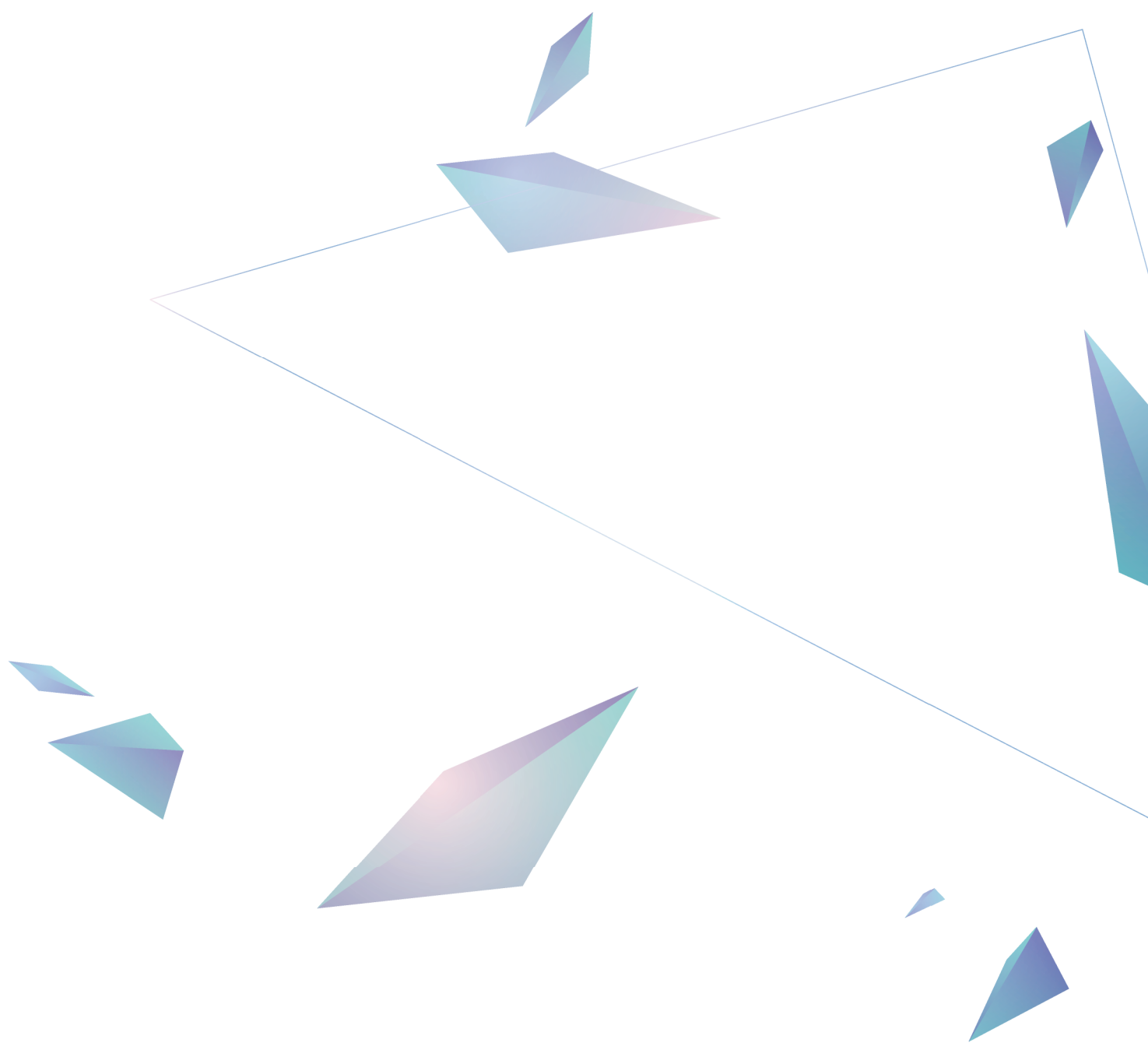
Мировая практика показывает, что наиболее эффективно развитие технологий и рынков квантовых коммуникаций осуществляется посредством создания экосистем и налаживания полноценной цепочки кооперации между всеми участниками рынка: научно-исследовательскими и образовательными организациями, разработчиками и производителями оборудования, телекоммуникационными операторами, институтами развития, сертификационными органами, а также конечными потребителями (государственными и коммерческими структурами). При этом распространенной формой организации такой работы выступают специализированные консорциумы на базе промышленных организаций, заинтересованных во внедрении технологий квантовых коммуникаций и готовых содействовать обеспечению не только финансовой,

но и инфраструктурной поддержки исследовательских центров и университетов.

С учетом тенденций развития квантовых коммуникаций в мире, достигнутых результатов и планов отечественных организаций ожидается, что спектр технологий и флагманских продуктов, создаваемых в России, будет полностью соответствовать запросам потребителей на рынке защиты, хранения и передачи информации. Согласно прогнозам, до 2024 г. производители устройств и разработчики решений в области КК при поддержке исследовательских организаций выведут на рынок готовые системы для предоставления сервисов КРК и квантово-защищенных каналов передачи данных.

В связи с высокой наукоемкостью направления и широким охватом решаемых технологических задач целесообразна дальнейшая проработка скоординированных планов научно-технологического развития, а также механизмов государственной поддержки развития квантовых коммуникаций на период 2025–2030 гг. Соответствующая работа проводится совместно с Российской академией наук, профильными федеральными органами исполнительной власти и другими участниками экосистемы. На площадке ОАО «РЖД» уже сформирован механизм поддержки развития квантовых коммуникаций, способствующий объединению всех участников экосистемы. В частности, реализован открытый отбор научно-технических проектов с участием представителей ведущих научно-исследовательских и образовательных организаций, компаний – разработчиков и производителей оборудования, операторов телекоммуникационных услуг. В дальнейшем такая организационная модель позволит наиболее эффективно сконцентрировать ресурсы для решения поставленных задач и соблюсти баланс всех заинтересованных сторон.

Технологии распределенных реестров



Сокращения

TPP	технологии распределенных реестров
CBDC (Central Bank Digital Currency)	цифровая валюта центрального банка
DeFi (Decentralized Finance)	децентрализованные финансы
L2-решения (решения второго слоя/ уровня)	архитектурный инструмент проектирования блокчейн-сетей

Технологии распределенных реестров (ТРР) обеспечивают децентрализованное хранение цифровых реестров транзакций, сделок, контрактов между участниками и не допускают их несанкционированного изменения или удаления. Уже сегодня ТРР успешно используются в финансовом секторе, в сфере документооборота и хранения данных, в здравоохранении, помогают вести учет прав собственности и сделок с недвижимостью, сокращая издержки в логистике и производстве, а также играют важную роль в цифровизации государственного управления и в цифровой идентификации личности. Тем самым, они позволяют переосмыслить многие бизнес-процессы и вносят существенный вклад в развитие цифровой экономики. ТРР и блокчейн являются сравнительно новыми технологиями, однако уже сейчас можно говорить об их распространении в глобальном масштабе. Технологии распределенных реестров приобретают все большее значение для цифровизации экономических

отношений, формируя пространство доверия между их участниками.

В рамках соглашения Госкорпорации «Ростех» с Правительством Российской Федерации по развитию высокотехнологичного направления «Технологии распределенных реестров» разработана дорожная карта¹. В ходе ее реализации предусматривается развитие российской экосистемы ТРР, благоприятной регуляторной среды, технологической инфраструктуры, инструментов и решений, в том числе с использованием программного обеспечения на основе модели открытого кода.

В настоящем разделе доклада приводятся оценки достигнутых результатов и перспектив развития высокотехнологичного направления «Технологии распределенных реестров» в мире и в России, в том числе дается обзор повестки исследований и разработок ТРР, представлены существующие на рынке ключевые решения на базе ТРР, систематизированы основные меры государственной поддержки развития направления.

Что такое технологии распределенных реестров?

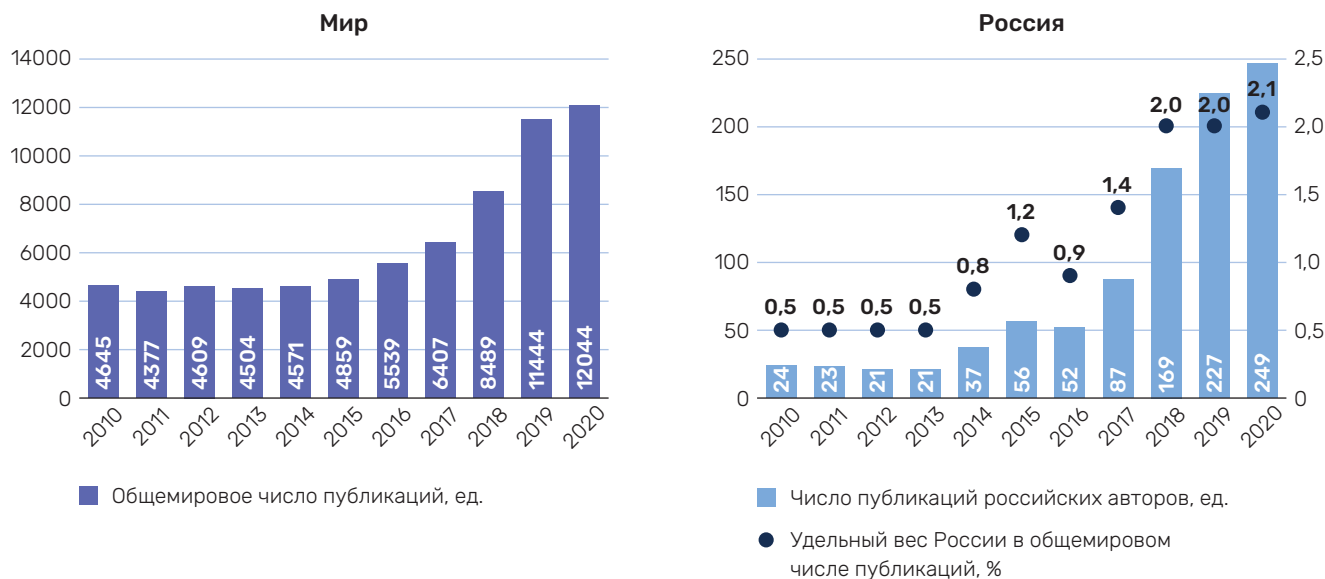
Технологии распределенных реестров позволяют защитить данные от злонамеренного вмешательства, формируют доверенную цифровую среду, дают возможность оцифровки объектов реального мира и их переноса в блокчейн. Ключевые преимущества такой архитектуры – безопасность, надежность и прозрачность всех процессов. ТРР включают несколько ключевых групп технологий, а именно: технологии организации и синхронизации

данных; технологии обеспечения целостности и непротиворечивости данных (консенсус); технологии создания и исполнения децентрализованных приложений и смарт-контрактов.

Интерес к развитию технологий распределенных реестров постоянно возрастает. Это подтверждается почти трехкратным ростом числа научных публикаций в мире в период с 2014 по 2020 г. (рис. 1).

¹ Дорожная карта развития высокотехнологичной области «Технологии распределенных реестров», утвержденная протоколом заседания президиума Правительственной комиссии по цифровому развитию, использования информационных технологий для улучшения качества жизни и условий ведения предпринимательской деятельности от 8 декабря 2020 г. № 31. Является основным механизмом реализации соглашения о намерениях между Правительством РФ и Госкорпорацией «Ростех» от 10 июля 2019 г., заключенного в соответствии с распоряжением Правительства РФ от 08 июля 2019 г. № 1484-р в целях развития технологий распределенных реестров.

Рис. 1. Ключевые показатели публикационной активности



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Лидирующие позиции по данному показателю за 2018–2020 гг. занимают Китай (6114), США (5296) и Индия (3677), что в совокупности составляет около половины от общего числа научных публикаций в мире. Доля России возросла за 2010–2020 гг. более чем в четыре раза, достигнув 2,1%, что позволило войти в топ-15 стран по уровню публикационной активности в области ТРР.

В последние несколько лет в мире продолжается взрывной рост патентной активности в области ТРР: число заявок на патенты за 5 лет с 2014 по 2019 г. выросло почти в 7 раз (рис. 2). Абсолютный лидер по этому показателю – Китай (более половины общемирового числа патентных заявок). В топ-5 входят также США, Республика Корея, Япония и Германия. В России объемы патентования также возрастают,

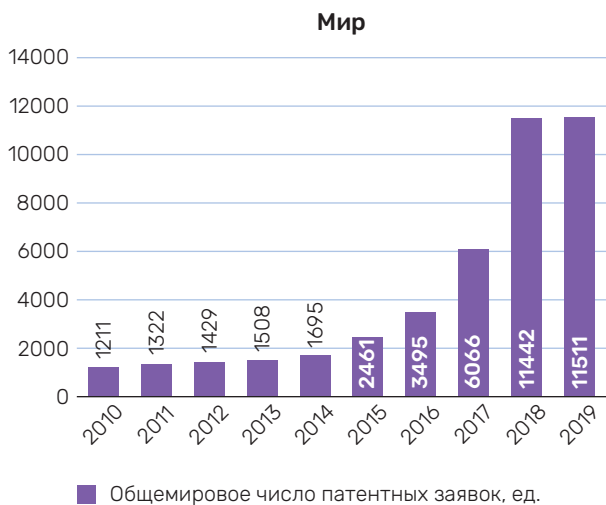
однако абсолютное число заявок остается довольно незначительным и составляет менее 1% от общемирового.

Наиболее высокие показатели патентной активности в области технологий распределенных реестров демонстрируют крупнейшие цифровые и финансовые корпорации: Alibaba Group (1850 заявок на патенты в 2017–2019 гг.), IBM (623), nChain (486), Tencent Technology (420), Hangzhou Fuzamei Technology Company (163).

Платформы на основе распределенных реестров внедряют такие ведущие мировые компании, как IBM, Google, Microsoft, Oracle, PayPal, Saudi Aramco, Visa, Walmart, Louis Vuitton, Christian Dior и др. По оценкам, за первое полугодие 2021 г. блокчейн-стартапы привлекли около 7 млрд долл., за предшествующие годы (вплоть до 2020 г.) – 22,4 млрд долл.²

² <https://www.comnews.ru/content/215877/2021-08-10/2021-w32/komu-blokcheyn-byt-khorosho>

Рис. 2. Ключевые показатели патентной активности



Источник: ИСИЗЗ НИУ ВШЭ.

Развитие технологий распределенных реестров внесет значимый вклад в экономический рост в самых различных отраслях. По прогнозам, к 2030 г. применение ТРР может обеспечить

прирост мирового ВВП около 1,8 трлн долл., из них более 960 млрд долл. – в области мониторинга товаров и услуг и управления цепочками поставок и свыше 430 млрд долл. – в финансовой сфере³.

³ <https://www.pwc.ru/ru/press-center/2020/blockchain-technologies.html>

Технологии

TRP – одно из самых молодых направлений в области цифровых технологий, которое пока находится на стадии становления, равно как и подходы к его структуризации. По функциональному признаку выделяются три группы технологий: организация и синхронизация данных; обеспечение целостности и непротиворечивости данных; децентрализованные приложения и смарт-контракты (рис. 3). В то же время технологии распределенных реестров можно структурировать и в соответствии с уровнями построения архитектуры распределенных реестров – от протоколов и алгоритмов консенсуса до создания приложений.

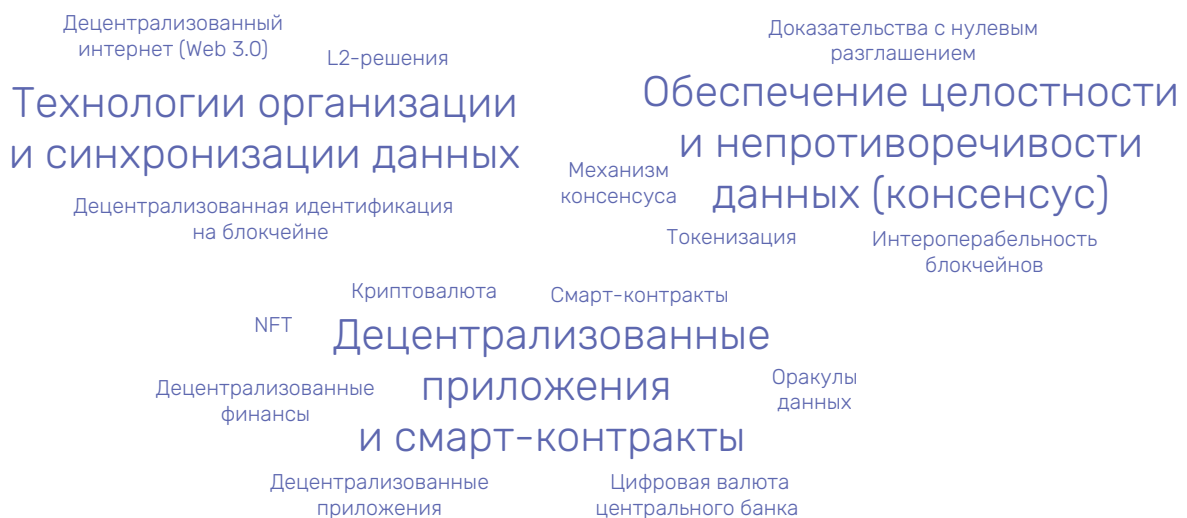
Технологии организации и синхронизации данных объединяют инструменты TRP, направленные на создание и проектирование блокчейн-сетей. Децентрализованный интернет, или Web 3.0, включает технологии для разработки децентрализованных веб-приложений, в которых пользователи могут полностью контролировать предоставляемую личную информацию. Для подтверждения достоверности здесь используется блокчейн, для хранения данных – распределенные реестры. Протоколы передачи данных обеспечивают их защиту

и возможность взаимодействия различных систем, в том числе в области децентрализованных финансов.

Снизить нагрузку на основную сеть и более точно выполнить технические требования сложных проектов с разными сценариями и параметрами блокчейн-сети позволяют решения второго слоя/уровня, или L2-решения. Этот архитектурный инструмент проектирования блокчейн-сетей дает возможность реализовать часть функций основного блокчейна с помощью дополнительных сетей второго уровня.

За счет применения концепции децентрализованной идентификации пользователь может самостоятельно хранить персональные данные и полностью контролировать доступ к личной информации. Тем самым он получает возможность принимать решение, когда и каким образом будет распространяться его личная информация. Например, пользователь может сохранить данные кредитной карты на своем электронном кошельке, а затем использовать приватный ключ, чтобы подписать транзакцию и отправить информацию о ней получателю. Это позволяет доказать, что операция осуществляется настоящим владельцем карты.

Рис. 3. Структура высокотехнологичного направления



Источники: Госкорпорация «Ростех»; ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Ключевые функции TRP, обеспечивающие надежность и прозрачность хранения и передачи данных, реализуются с помощью технологий обеспечения целостности и непротиворечивости данных (консенсус). Так, методы доказательства с нулевым разглашением позволяют проверить факт обладания информацией, не раскрывая и не передавая ее. Эта технология, реализуемая в виде криптографических алгоритмов, развивается с 1980-х гг. Разработчики предлагают все более надежные способы ее реализации, снижающие вероятность обмана проверяющей стороны; сегодня она сокращена до пренебрежимо малых значений.

По мере распространения решений на основе TRP в экономике и социальной сфере все большее значение приобретает вопрос кросс-платформенной интеграции. Растет востребованность инструментов, обеспечивающих интероперабельность блокчейнов. Они позволяют блокчейн-платформам, построенным на разных распределенных реестрах, взаимодействовать друг с другом и обмениваться данными. По сравнению с другими информационными системами, именно в блокчейне интероперабельность особенно важна, в частности ввиду необходимости учета рисков дублирования транзакций.

Основополагающей характеристикой любой блокчейн-сети являются механизмы консенсуса. В них сформулированы правила, по которым все ноды – децентрализованные компоненты сети – работают с транзакциями, содержащими данные, записывают или отклоняют их. Механизм консенсуса, выбираемый для конкретной блокчейн-сети, зависит от планируемых сценариев ее применения, масштабов, пропускной способности и других параметров.

Создание связей между бизнес-процессами и технологическим слоем блокчейн-платформ обеспечивает токенизация. Она дает возможность «привязать» физический ресурс или финансовый инструмент к токенам блокчейн-сети, где они используются для подтверждения факта владения или хранения. Токенизация активов позволяет значительно повысить безопасность транзакций и становится базой для создания новых видов финансовых инструментов.

TRP уже имеют довольно широкий спектр применения. Зачастую проекты по их внедрению подразумевают создание и исполнение смарт-контрактов и децентрализованных приложений (decentralized applications, dApps). Такие веб-приложения позволяют организовать прямое взаимодействие пользователей через P2P-сети и блокчейн. В отличие от стандартных приложений, в которых все операции контролируются централизованным сервером, dApps исключают необходимость в третьей стороне, реализуя тем самым базовые принципы Web 3.0.

Одна из технологий распределенных реестров, уже получивших широкое распространение, – это смарт-контракты. Они представляют собой записи в блокчейн-сети, содержащие программный код, через который реализуется прикладное применение блокчейна. Заданные события в блокчейн-сети вызывают исполнение смарт-контрактов, выполняют действия согласно своему программному коду, вызывают другие события или смарт-контракты.

Неотъемлемой программной частью прикладного использования блокчейна являются оракулы данных. Их функция состоит в передаче информации между блокчейн-сетью и ее окружением. Необходимость их применения обусловлена принципом организации блокчейна, где данные передаются последовательно в виде транзакций.

Стремительно набирают популярность не так давно появившиеся решения с использованием невзаимозаменяемых криптографических токенов – NFT (non-fungible token). Токен выступает аналогом цифрового сертификата, подтверждающего подлинность объекта, что помогает обеспечить защиту прав интеллектуальной собственности. Факт владения токеном подтверждает право на владение изображением, видео-, аудио- или другим цифровым (в некоторых случаях физическим) активом.

Финансовый сектор – одна из ключевых областей применения TRP. Здесь уже сформирован целый ряд решений, позволяющих как оптимизировать процессы организаций, так и создать прорывные разработки. На базе финансовых сервисов с использованием смарт-контрактов и децентрализованных приложений с открытым

исходным кодом, работающих в публичных блокчейн-сетях, формируется концепция децентрализованных финансов (DeFi). DeFi-сервисы предоставляют пользователям доступ к разнообразным финансовым услугам, таким как инвестирование, кредитование, торговля на биржах и т. д. DeFi-экосистема работает без участия централизованных финансовых институтов, регуляторов и органов власти.

Бум блокчейн-технологий во многом связан с распространением криптовалют и взрывным ростом цен на некоторые из них. Это разнообразие цифровых валют, в основе которых лежит полностью автоматизированная децентрализованная платежная система, ведущая учет внутренних расчетных единиц криптовалюты. Ключевые особенности криптовалютных систем – анонимность их участников и необратимость операций.

В рамках национальной финансовой системы на основе TPP может быть создана цифровая валюта центрального банка (Central Bank Digital Currency, CBDC). Это электронное обязательство монетарного регулятора, номинированное в национальной счетной единице и выступающее средством платежа, меры и сохранения стоимости. CBDC может укрепить позиции государства в активно развивающейся сфере цифровой и криптоэкономики, повышает финансовую инклюзивность за счет уменьшения промежуточных затрат, а благодаря своей прозрачности упрощает контроль за денежно-кредитной сферой со стороны государства.

Технологии распределенных реестров, таким образом, существенно различаются по уровню готовности к масштабированию и коммерциализации соответствующих решений. Так, технологии децентрализованного интернета находятся пока на стадии концепции, в то время как децентрализованные приложения и криптовалюты уже довольно широко представлены на рынке в виде конкретных продуктов и сервисов. Кривая технологической зрелости отражает текущую стадию развития TPP (рис. 4).

Центробанки по всему миру изучают, как с помощью технологий распределенного реестра улучшить национальную платежную инфраструктуру за счет выпуска цифровых валют (CBDC). Оптовая цифровая валюта CBDC может повысить эффективность клиринговых операций между центральными и коммерческими банками, а розничная – может стать эквивалентом банкноты в цифровом формате для общедоступного использования.

Эксперименты проводят и другие финансовые организации. Например, в качестве новых цифровых инструментов для трансформации трансграничных платежей используются стейблкоины. Это токены, которые, как правило, обеспечены фиатными деньгами (т. е. государственной валютой) или другими физическими активами и способные работать на блокчейне. Они позволяют снизить комиссию за перевод средств и обеспечивают практически мгновенное проведение транзакций.

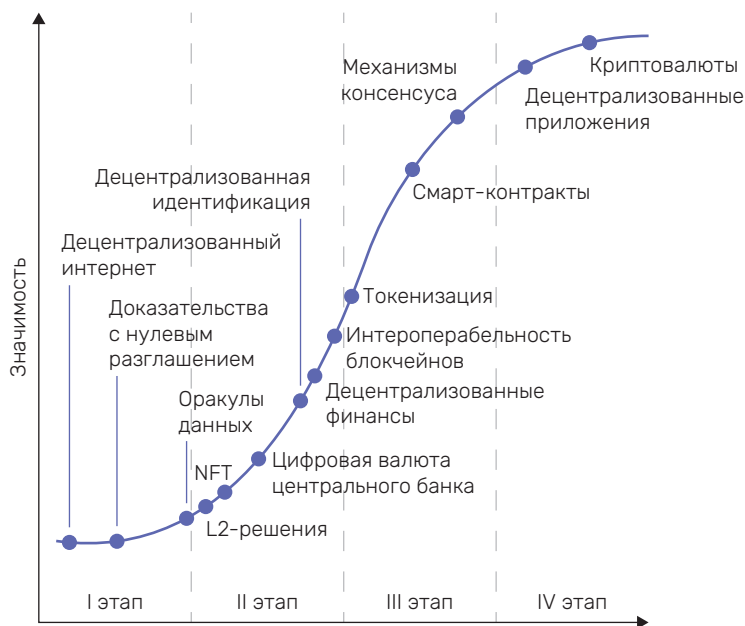
Реализовать такого рода функционал позволяет многоуровневая технологическая архитектура TPP (рис. 5). Самая обширная категория – технологии уровня протокола, структуры данных и алгоритмов достижения консенсуса, именно здесь отмечается наиболее высокая патентная активность. Технологии уровня приложений, напротив, пока не так широко представлены в области прикладных исследований, поскольку при их разработке зачастую реализуется интеграция многих уже запатентованных решений других уровней. Зато интерес исследователей к ним значительно возрос – число научных публикаций в мире с 2015 по 2020 г. увеличилось более чем в 7 раз.

Наибольшие эффекты от внедрения технологии распределенных реестров ожидаются в секторе государственного управления, сфере образования и здравоохранения. По прогнозам, к 2030 г. суммарная выгода данных отраслей от внедрения TPP в области управления идентификационными и квалификационными данными составит более 570 млрд долл.⁴

Технологии распределенных реестров могут быть эффективно использованы для заключения

⁴ <https://www.pwc.ru/ru/press-center/2020/blockchain-technologies.html>

Рис. 4. Кривая технологической зрелости



Источники: Госкорпорация «Ростех»; ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Методические пояснения. Значимость характеризует уровень зрелости технологии и отражает нормализованную упоминаемость технологии в данный период времени в публикациях соответствующего типа (научные статьи, патенты, рыночная аналитика). С учетом интенсивности исследований и разработок выделены четыре этапа:

I этап – зарождение технологии (высокая публикационная активность);

II этап – расцвет технологии (рост патентования и объема рыночной аналитики);

III этап – зрелость технологии (преобладание рыночной аналитики);

IV этап – плато (снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике).

контрактов и разрешения споров. Ожидаемый вклад в мировой ВВП в этой области применения TRP к 2030 г. – более 70 млрд долл.⁵

Взаимодействие с клиентами – еще одно перспективное направление развития технологий распределенных реестров, способное увеличить мировой ВВП более чем на 50 млрд долл. к 2030 г.⁶

Решения на базе TRP позволяют вывести на новый уровень качества традиционные для платежных карт программы лояльности и поощрения клиентов. Технологии распределенных

реестров активизируют взаимоотношения с клиентами за счет интеграции с CRM-платформами, такими как Salesforce, HubSpot CRM и Microsoft Dynamics 365 Sales, и дадут дополнительный эффект за счет повышения их удобства для пользователей.

Благодаря реализации на базе технологий распределенных реестров продуктов, связанных с идентификационной информацией, мировой ВВП может вырасти более чем на 220 млрд долл.⁷ Технологии распределенных реестров способны защитить персональную

⁵ <https://www.pwc.ru/ru/press-center/2020/blockchain-technologies.html>

⁶ Там же.

⁷ <https://www.pwc.ru/ru/publications/collection/blockchain-time-for-trust.pdf>

информацию в удостоверениях личности, документах о профессиональном образовании и пр., при этом существенно сократить затраты и помочь бороться с мошенничеством и хищением данных.

В России интерес к блокчейну растет с 2017 г., когда произошел всплеск популярности криптовалют. С тех пор был запущен целый ряд пилотных проектов по разработке решений на базе TPP.

Рис. 5. Основные показатели публикационной и патентной активности по группам технологий

		Научные публикации			Патентные заявки			
		Мир	Россия	Доля России, %	Мир	Россия	Доля России, %	
Технологии уровня протокола, структуры данных и алгоритмов достижения консенсуса	2020	4041	113	2,8	2019	10641	18	0,2
	2015	1413	17	↑	2015	1735	9	↑
	2010	1135	7	0,6	2010	604	2	0,3
Технологии уровня сетевого взаимодействия	2020	4949	96	1,9	2019	1075	6	0,6
	2015	2685	32	↑	2015	465	3	↑
	2010	3287	17	0,5	2010	471	0	0
Технологии уровня приложений, услуг и дополнительных компонентов	2020	3765	64	1,7	2019	158	2	1,3
	2015	526	7	↑	2015	56	0	↑
	2010	15	0	0	2010	1	0	0

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Методические пояснения. Для целей анализа патентной и публикационной активности технологические направления были распределены по трем уровням:
Уровень протокола, структуры данных и алгоритмов достижения консенсуса (включая децентрализованный интернет, L2-решения, доказательства с нулевым разглашением, интероперабельность блокчейнов, механизм консенсуса).
Уровень сетевого взаимодействия (включая децентрализованную идентификацию).
Уровень приложений, услуг и дополнительных компонентов (включая токенизацию, оракулы данных, децентрализованные финансы, криптовалюты, цифровую валюту центрального банка, NFT, децентрализованные приложения, смарт-контракты).

Продукты и рынки

Сейчас развитие решений на основе TRP осуществляется преимущественно за счет создания и совершенствования двух типов платформ – публичных и частных. На их базе формируются различные прикладные решения.

Публичные платформы – свободно расширяемое программное обеспечение, функционирующее на узлах открытой сети распределенного реестра. Они демонстрируют наибольшую динамику как с точки зрения числа подключенных к сети организаций, так и инновационности предлагаемых решений. Публичные платформы условно можно разделить на два ключевых типа: финансовые платформы – направлены на передачу ценности от одного лица (или организации) другому; платформы для построения децентрализованных приложений – формируют базовый, инфраструктурный, слой для функционирования блокчейн-сетей, на основании которого могут быть созданы децентрализованные приложения для решения различных прикладных задач.

В рамках платформ для создания децентрализованных приложений преимущественно формируются:

- децентрализованные биржи и финансовые сервисы – наиболее популярный тип приложений; обеспечивают возможность обмена цифровых активов и предоставления финансовых услуг без централизованного оператора;
- уникальные цифровые объекты (NFT-токены), которые крайне активно развивались в течение 2020 г. На текущий момент ежемесячный оборот в рамках соответствующих приложений, по оценкам экспертов, может составлять более 2 млрд долл.;
- отраслевые приложения, обеспечивающие публичную автоматизацию специфического бизнес-процесса (например, обмен информацией между звеньями цепочки поставок).

Частные платформы – программное обеспечение, которое функционирует на закрытой сети узлов, принадлежащих ограниченному кругу участников. В отличие от публичных, частные платформы разрабатываются определенной командой и имеют ряд особенностей, ценных для корпоративного или государственного сегментов.

Фокус применения блокчейн-платформ в мире постепенно смещается от специализированных задач финансового сектора к более разнообразным решениям для логистики, управления цепочками поставок, защиты прав интеллектуальной собственности и др.⁸

Depository Trust and Clearing Corp (DTCC) отвечает за хранение информации о сделках с ценными бумагами. Информация о приблизительно 50 тыс. счетов, содержащих сведения о кредитных деривативах на сумму 10 трлн долл., находится в специально разработанном цифровом распределенном реестре – AxCore, обеспечивающем открытый доступ к единому перечню сделок, обновляемому в реальном времени и свободному от многоуровневых баз данных.

IBM и датская грузовая компания Maersk запустили блокчейн-платформу TradeLens для отслеживания грузовых перевозок и обмена таможенной и финансовой информацией, которая включает уже более 100 участников, несколько десятков портов и терминалов по всему миру.

Walmart использует блокчейн, чтобы отслеживать грузы от поставщиков, сокращать производственные, транспортировочные и складские убытки. Компания уже зарегистрировала 50 патентов, связанных с блокчейном.

Seagate совместно с IBM применяет TRP для выявления контрафактной продукции. Проект направлен на повышение уровня безопасности производимых компанией накопителей данных. Одна из выполняемых задач – проверка оригинальности программной части жесткого диска (HDD).

⁸ <https://www.forbes.ru/biznes/374921-50-krupnyh-kompaniy-kotorye-ispolzuyut-blokcheyn-spisok-forbes>

Французский конгломерат производителей предметов роскоши LVMH (владелец бренда Louis Vuitton) запустил открытый проект на базе технологии распределенных реестров – AURA. Решение предоставляет производителям возможность подтверждения подлинности товара, позволяет отследить его происхождение от сырья до места продажи, обеспечивает защиту прав интеллектуальной собственности.

В России проекты по внедрению TTP реализуют не только финансовые организации, но и компании реального сектора экономики.

Национальный расчетный депозитарий (входит в группу «Московская биржа») внедряет блокчейн в финансовую инфраструктуру для проведения сделок с ценными бумагами, ведения документации и др.⁹

ПАО «Сбербанк» выполняет проект по переводу всех банковских расчетов на блокчейн. Лаборатория блокчейна разрабатывает проекты для ипотечного кредитования, факторинга, страхования и аккредитивов. Со второго полугодия 2020 г. ПАО «Сбербанк» начал промышленную эксплуатацию системы учета электронных закладных по сделкам с недвижимостью с использованием систем банка и российской национальной блокчейн-платформы Мастерчейн¹⁰.

«Райффайзенбанк» выпустил первую электронную закладную с учетом и хранением в децентрализованной депозитарной системе

на платформе «Мастерчейн», которая разработана Ассоциацией ФинТех совместно с Банком России и крупнейшими финансовыми организациями России¹¹.

ПАО «ГМК "Норильский никель"» внедрило решение на базе TTP для упрощения торговли сырьем. Компания выпускает токены, обеспеченные палладием, кобальтом и медью, и продает их производителям. Кроме того, на блокчейне ведется учет полезных ископаемых¹².

ПАО «Газпром нефть» организует на блокчейне логистические процессы, включая отслеживание перемещения грузов, и продажу топлива. Кроме того, компания разработала собственную блокчейн-систему Smart Fuel для авиазаправок¹³.

ОАО «РЖД» и Maersk заключили соглашение о взаимодействии в области развития цифровых сервисов для перевозок с использованием TTP и их продвижения на рынок мультимодальных перевозок. Блокчейн также внедряется в сервисном обслуживании локомотивов: используются смарт-контракты, обеспечивающие автоматическое исполнение условий договора¹⁴.

S7 Airlines через блокчейн-платформу продает авиабилеты и взаимодействует с ведущими банками¹⁵.

ПАО «Владимирский химический завод» (ВХЗ) создает блокчейн-платформу для фиксации выбросов парниковых газов¹⁶.

⁹ <https://digit.nsd.ru/articles/nrd-vozglavlyayet-protsess-vnedreniya-blokcheyn-tehnologii-v-rossii/>

¹⁰ <https://rns.online/finance/Sberbank-rasskazal-o-vipuske-elektronnih-zakladnih-na-baze-platforni-Masterchein-2020-07-28/>

¹¹ <https://www.raiffeisen.ru/about/press/releases/71080/>

¹² <https://www.forbes.ru/biznes/374921-50-krupnyh-kompaniy-kotorye-ispolzuyut-blokcheyn-spisok-forbes>

¹³ https://www.vedomosti.ru/press_releases/2021/05/25/gazprom-neft-zaregistrovala-pervuyu-v-rossii-blokcheyn-platfornu-dlya-oplati-aviazpravki

¹⁴ <https://portnews.ru/news/303660/>

¹⁵ <https://www.rbc.ru/crypto/news/5f4f6fed9a7947e3754a7cd7>

¹⁶ https://www.cnews.ru/news/line/2021-06-21_vh31_sozdaet_blokcheynplafornu

Государственная поддержка

В ведущих странах уделяется все большее внимание поддержке внедрения технологий распределенных реестров как в государственном, так и в частном секторе.

Одно из наиболее распространенных направлений применения TPP – цифровые национальные валюты. По оценкам, с 2014 г. более 60 центральных банков в мире запустили проекты, связанные с CBDC¹⁷. Например, Банк Японии в апреле 2021 г. начал первую фазу тестирования собственной цифровой валюты. В июле 2021 г. Центральный банк ОАЭ анонсировал разработку собственной CBDC. В пилотной стадии также находятся проекты запуска национальных криптовалют во Франции, Канаде, ЮАР, Уругвае, Нигерии¹⁸. Банк России также выступил с инициативой по созданию цифрового рубля¹⁹.

Блокчейн-инициативы активно поддерживаются в Китае. В декабре 2016 г. блокчейн был обозначен в 13-м пятилетнем плане страны в качестве технологии стратегического значения. После этого десятки местных администраций инициировали пилотные проекты с использованием блокчейна для различных приложений – от умного города до охраны окружающей среды.

В октябре 2019 г. в стране протестирована, а в апреле 2020 г. официально запущена общенациональная сеть блокчейн-сервисов (BSN), которую уже называют интернетом блокчейнов.

Значимую роль играет запуск экосистемных проектов с участием государственных компаний. China Blockchain Service Network – централизованная блокчейн-платформа, реализуемая с участием государственных телеком-компаний China Telecom, China Mobile, China Unicom, платежной системы China Union Pay и биржи Huobi, блокчейн-компаний Chainlink и Cosmos. Платформа интегрирует несколько облачных ресурсов, базовые блокчейн-фреймворки, операционную среду, управление ключами, набор

для разработки программного обеспечения и интерфейсы прикладного программирования шлюза²⁰. На китайской блокчейн-платформе работают более 140 электронных государственных сервисов, включая услуги обмена данными, совместную обработку данных, хранение различных электронных сертификатов и др.

Кроме того, среди мер поддержки TPP в Китае можно отметить:

- создание национального фонда развития блокчейна;
- государственные программы (например, включение блокчейна в технологическую инфраструктуру), гранты, субсидии;
- создание Национального технического совета по стандартизации технологий распределенных реестров;
- запуск цифрового юаня – с 2019 г. в рамках пилотной программы он вводился в отдельных городах Китая, а с ноября 2021 г. распространяется на всю страну.

В то же время принимаются и ограничительные меры: в 2021 г. Народный Банк Китая ввел полный запрет на майнинг криптовалют частными лицами и организациями и на инвестиции в эту отрасль²¹.

США реализуют разнообразные инициативы в области TPP, в том числе:

- создана рабочая группа по блокчейну при Конгрессе США (Congressional Blockchain Caucus);
- сформирована Ассоциация блокчейна (Blockchain Association);
- предоставляются гранты на исследования и разработки в области TPP;
- в мае 2021 г. дан старт пяти пилотным проектам внедрения национальной цифровой валюты (Digital Dollar Project) для тестирования и подтверждения потенциальных возможностей ее использования.

¹⁷ <https://www.pwc.ch/en/insights/digital/pwc-global-cbdc-index-2021.html>

¹⁸ <https://cbdctracker.org/>

¹⁹ https://www.cbr.ru/StaticHtml/File/112957/Consultation_Paper_201013.pdf

²⁰ <https://www.rbc.ru/crypto/news/5f5c84fe9a794762cd740d4f>

²¹ <https://www.reuters.com/world/china/china-central-bank-vows-crackdown-cryptocurrency-trading-2021-09-24/>

В Европейском союзе формируется регуляторная среда для развития ТРР и создаются соответствующие экосистемы:

- сформирован Наблюдательный совет Евросоюза по блокчейну;
- создано международное партнерство в области блокчейна в ЕС (Декларация об открытии European Blockchain Partnership);
- развернута Европейская инфраструктура блокчейн-сервисов (European Blockchain Services Infrastructure, EBSI) – инициатива Европейской комиссии и Европейского блокчейн-партнерства (ЕВР). Инфраструктура сервисов EBSI работает на одно-ранговой сети взаимосвязанных узлов. Каждый участник Европейского блокчейн-партнерства, куда входят 29 стран (в том числе страны ЕС, Норвегия, Лихтенштейн и др.), будет управлять по крайней мере одним узлом²²;
- разработан проект единой цифровой валюты ЕС (инициатива Европейского центрального банка);
- запущены регуляторные песочницы;
- реализуются программы поддержки исследований и инноваций «Горизонт Европы», включающие ТРР в качестве одного из направлений.

В развитие ТРР вносят вклад мировые ассоциации и консорциумы (например, Enterprise Ethereum Alliance, Hyperledger), включая международные финансовые блокчейн-консорциумы (R3, Ripple), объединяющие сотни участников. Примечательно, что из более 260 членов Hyperledger 20 являются академическими партнерами²³.

В России, как и во многих других странах, развитие и внедрение ТРР наиболее активно ведется в финансовой сфере. В 2019 г. принят Федеральный закон от 18.03.2019 № 34-ФЗ, закрепивший в части первой Гражданского кодекса Российской Федерации понятие «цифровые права», а в 2020 г. – Федеральный закон

от 31.07.2020 № 259-ФЗ «О цифровых финансовых активах, цифровой валюте и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Заметную роль в развитии блокчейна играют инициативы в государственном секторе. Так, Федеральная налоговая служба (ФНС) запустила блокчейн-платформу для выдачи беспроцентных кредитов малому и среднему бизнесу, к которой уже подключились более 4200 организаций²⁴. Блокчейн-платформа получит дальнейшее развитие, в том числе для новых госпрограмм поддержки бизнеса, безбумажного предоставления услуг клиентам банков, а также формирования досье клиента и профилирования его рисков²⁵. Банк ДОМ.РФ совместно с Росреестром впервые в России выдал электронную закладную взамен документарной (бумажной) по действующему ипотечному кредиту (ранее такие решения применяли только по новым ипотечным кредитам)²⁶. По заказу ЦИК на базе решения Waves Enterprise реализуется сервис децентрализованного блокчейн-голосования²⁷.

Развитие высокотехнологичного направления «Технологии распределенных реестров» предусмотрено в рамках реализации соглашения о намерениях между Госкорпорацией «Ростех» и Правительством Российской Федерации. ТРР входит в число направлений поддержки в рамках федерального проекта «Цифровые технологии» национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». Также в 2019 г. Университет Иннополис получил статус лидирующего исследовательского центра в области систем распределенного реестра и грант на разработку полностью верифицированной блокчейн-платформы²⁸. Действуют объединения, занимающиеся развитием технологий распределенных реестров. Так, Центр технологий распределенных реестров СПбГУ объединяет 12 научных и образовательных организаций, а также 20 индустриальных партнеров²⁹. Развитием технологии блокчейн занимается

²² <https://ichi.pro/ru/evropejskaa-infrastruktura-blokcejn-servisov-priblizaetsa-i-eca-dolzna-sygrat-svou-rol-115127463823240>

²³ <https://www.hyperledger.org/members>

²⁴ <https://digital.ac.gov.ru/news/4722/>

²⁵ <https://www.rbc.ru/economics/04/03/2021/603f8ec99a7947c24dfd973a>

²⁶ <https://domrfbank.ru/press/private-clients/bank-dom-rf-polnostyu-pereydet-na-elektronnye-zakladnye-do-kontsa-goda/>

²⁷ https://www.cnews.ru/news/top/2021-02-04_rossijskie_vybory_na_blokchejne

²⁸ <https://innopolis.university/center-blockchain>

²⁹ <https://dltc.spbu.ru/ru/consortium>

Ассоциация ФинТех, включающая 31 организацию и 21 партнера³⁰.

Среди ключевых задач развития высокотехнологического направления «Технологии распределенных реестров» в России:

- обеспечение высокого уровня интероперабельности разрабатываемых приложений и сервисов на базе ТРР;
- развитие стека отечественных технологий распределенных реестров, в том числе спроектированных на основе модели открытого кода (open source), и содействие повышению их экспортного потенциала;
- организация комплексного взаимодействия систем на базе ТРР с другими цифровыми технологиями (Интернет вещей,

большие данные, промышленный Интернет вещей, технологии беспроводной связи и др.);

- создание и развитие национальной инфраструктуры для хостинга систем на базе ТРР для малых и средних предприятий, а также частных лиц, предоставляющей разработчикам инструменты для создания приложений в общедоступных бизнес-сетях, в том числе на принципах государственно-частного партнерства;
- развитие нормативного регулирования для снятия барьеров и обеспечения высоких темпов внедрения ТРР в российской экономике.

³⁰ <https://fintechru.org/about/>

Перспективы развития

Распространение технологий распределенных реестров в отраслях экономики и социальной сферы становится важным условием устойчивого развития. Защищенность и прозрачность транзакций обеспечивают обстановку доверия, необходимую для реализации прорывных инноваций в цифровом мире³¹. Сфера применения блокчейн-технологий постоянно расширяется, охватывая помимо криптовалют такие направления, как онлайн-платежи и торговые платформы, системы здравоохранения, производственно-сбытовые цепочки, системы учета выбросов парниковых газов и торговли квотами и др. Ожидается дальнейший рост использования блокчейна для обмена данными между устройствами Интернета вещей. Прогнозируется увеличение количества проектов в сфере ТРР с открытым кодом³².

В мире уже преодолены многие технологические, регуляторные и рыночные барьеры, сдерживавшие широкое распространение и практическое использование продуктов, построенных на базе ТРР. Технологии распределенных реестров развивают и применяют тысячи компаний, как крупных и устоявшихся на рынке, так и стартапов.

Таким образом, сегодня технологии распределенных реестров находятся на достаточно высоком уровне готовности. Поэтому на текущем этапе поддержка ТРР на национальном уровне должна заключаться, прежде всего, в дальнейшей адаптации нормативного регулирования, учитывая необходимость, с одной стороны, стимулировать распространение ТРР в различных отраслях, где от данной технологии ожидаются высокие социально-экономические эффекты, с другой – минимизировать риски для пользователей технологии, учитывая, что ТРР зачастую применяются в отношении «чувствительной» информации (персональные данные, данные о финансовых активах, сделках и т. п.).

В нашей стране разрабатываются и используются решения на основе всех групп технологий распределенных реестров. В то же время

многие из них базируются на зарубежных разработках, хотя значимая часть решений создана на зарубежных платформах с открытым кодом (Hyperledger и Ethereum). В этой связи важнейшим направлением становится создание отечественных аналогов и использование модели открытого кода, позволяющей всем игрокам участвовать в процессе уточнения спецификаций и типовых бизнес-процессов для отраслевых решений.

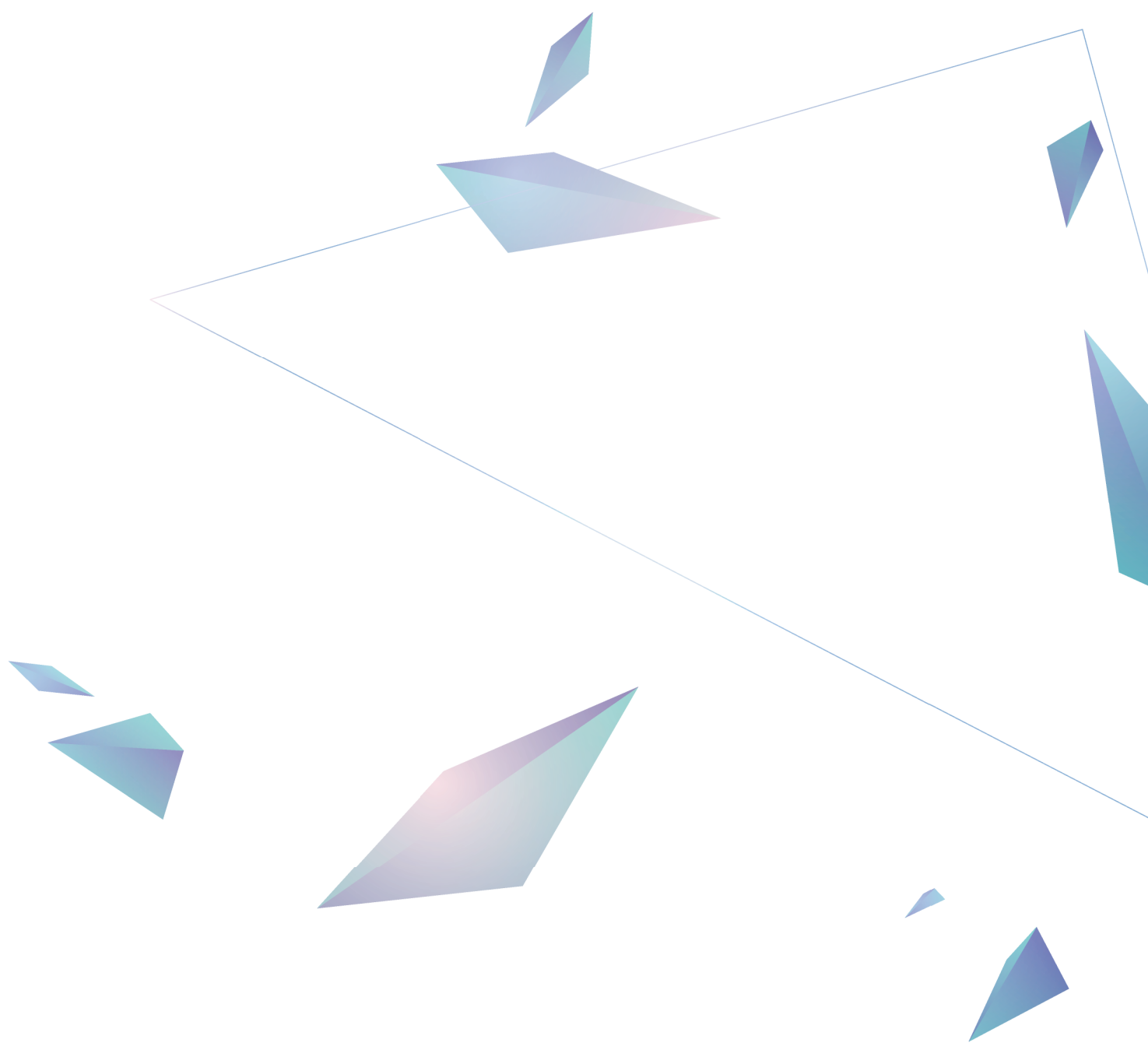
Одним из перспективных направлений построения российской инфраструктуры ТРР является формирование национальной сервисной сети распределенных реестров. Подобные сети уже создаются ведущими странами.

Более широкому распространению ТРР в России может способствовать реализация проектов с применением данных технологий в государственном секторе (например, оказание государственных услуг, предоставление государственной поддержки, налоговая отчетность, хранение медицинских данных). Создание отечественной экосистемы ТРР на принципах государственно-частного партнерства с использованием открытого кода, в контур которой вовлечены государственные органы, обеспечит необходимый уровень безопасности передачи, обработки и хранения данных и в то же время предоставит возможность построения новых сервисов и продуктов для бизнеса. Компании смогут создавать доверенные приложения, которые будут использовать данные государственных информационных систем с учетом требований надежности и безопасности. Это позволит интегрировать собираемые данные в доверенных защищенных узлах ТРР, обеспечить их неизменяемость и снизить риски подлога при оказании услуг. Российская экосистема ТРР позволит повысить уровень доверия при работе с контрагентами и реализации основной деятельности, в том числе с использованием умных контрактов, и обеспечит сокращение издержек за счет устранения посредников и повышения достоверности данных.

³¹ https://unctad.org/system/files/official-document/ecn162021d3_ru.pdf

³² https://www.cnews.ru/articles/2020-04-19_v_rossii_potratyat_36_mlrdrub_na_razvitiye

Технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем



Сокращения

АСУ ТП	автоматизированная система управления технологическим процессом
ЛЭП	линии электропередач
СНЭ	системы накопления энергии
GTO (Gate Turn Off)	запираемый тиристор
IEA (International Energy Agency)	Международное энергетическое агентство
IGBT-модуль (Insulated-gate bipolar transistor)	силовое устройство на базе технологий биполярных транзисторов с изолированным затвором
IRENA (International Renewable Energy Agency)	Международное агентство по возобновляемым источникам энергии
Microgrid	микроэнергосистема, малая энергосистема

Энергетический переход – один из центральных вопросов сегодняшней глобальной экономической повестки. О переходе на углеродно-нейтральную энергетику объявлено в странах Евросоюза, Китае, США. Во многих государствах сформированы планы по увеличению доли возобновляемых источников в энергобалансе. Согласно прогнозам, в средне- и долгосрочной перспективе получит всеобщее распространение электротранспорт, уже сейчас постепенно выстраивается необходимая инфраструктура. Данные факторы стимулируют развитие децентрализованных энергосистем.

В этих условиях развитие электроэнергетики определяют растущие требования к надежности электроснабжения, снижению цен на электроэнергию, необходимость построения умных сетей и автоматизации управления технологическими процессами вдоль всей цепочки «генерация – распределение – передача – сбыт – потребление». В электроэнергетике зарождаются новые модели взаимодействия производителей и потребителей электроэнергии, выходящие далеко за пределы традиционного уклада, в котором заложена обособленность и даже некоторое противопоставление их интересов и ролей.

Отмеченные тенденции усиливают возросшую потребность нового поколения высокотехнологичных решений, способных обеспечить гибкость, надежность, эффективность энерге-

тической инфраструктуры. Комплексная трансформация электроэнергетики придаст дополнительный импульс развитию многих секторов экономики и достижению межотраслевых эффектов.

ПАО «Россети» и Правительство Российской Федерации заключили соглашение о намерениях в целях развития высокотехнологичного направления «Технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем». В рамках соглашения разработана дорожная карта¹, мероприятия которой в перспективе до 2024 г. позволят создать благоприятные условия для проведения исследований и реализации проектов, развития системы кооперации при разработке и пилотировании перспективных продуктов и сервисов, а также для планомерного перехода на отечественные оборудование и программное обеспечение в сфере электроэнергетики.

В настоящем разделе доклада приводятся оценки достигнутых результатов и перспектив развития высокотехнологичного направления «Технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем» в мире и в России, в том числе дается обзор повестки исследований и разработок, представлены существующие на рынке ключевые решения, систематизированы основные меры государственной поддержки развития данного высокотехнологичного направления.

¹ Дорожная карта развития высокотехнологичной области «Технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем», утвержденная заместителем Председателя Правительства Российской Федерации А. В. Новаком 25 мая 2021 г. Является основным механизмом реализации соглашения о намерениях между Правительством Российской Федерации и ПАО «Россети», заключенного в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 июня 2020 г. № 1468-р в целях развития технологий передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем.

Что такое технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем?

Технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем – это довольно широкая область, которая охватывает целый ряд передовых решений, включая системы накопления энергии, ВИЭ, распределенную генерацию, микроэнергосистемы, интеллектуальные системы управления и защиты, силовую электронику и электротехнику, а также применение новых материалов (композитов)

и физических принципов (высокотемпературной сверхпроводимости) для построения линий электропередач.

Увеличение вложений в фундаментальные исследования и прикладные разработки свидетельствует о растущем интересе к новым технологиям со стороны государства и бизнеса (табл. 1).

Табл. 1. Инвестиции в исследования и разработки по отдельным группам технологий в мире

Группы технологий	Объем инвестиций
Силовая электроника	7,3 млрд долл. в 2020 г., в том числе 2–2,5 млрд государственных средств 4–5% ежегодный рост в 2021–2027 гг.
Системы накопления энергии для электрических сетей	3,5 млрд долл. в 2020 г. 5,5 млрд долл. в 2021 г.
Возобновляемые источники энергии и распределенная генерация	6,8 млрд долл. в 2020 г., в том числе 4,8 млрд государственных средств; 7–8% ежегодный рост в 2021–2027 гг.
Интеллектуальные системы управления и защиты	551 млн долл. в 2020 г. 2,8 млрд долл. к 2030 г.

Источники: Сколковский институт науки и технологий, АНО «Платформа НТИ», Международное энергетическое агентство².

Глобальные инвестиции в исследования и разработки по ключевым областям, составляющим данное направление, выросли с 13 млрд долл. в 2016 г. до более 20 млрд долл. в 2020 г.

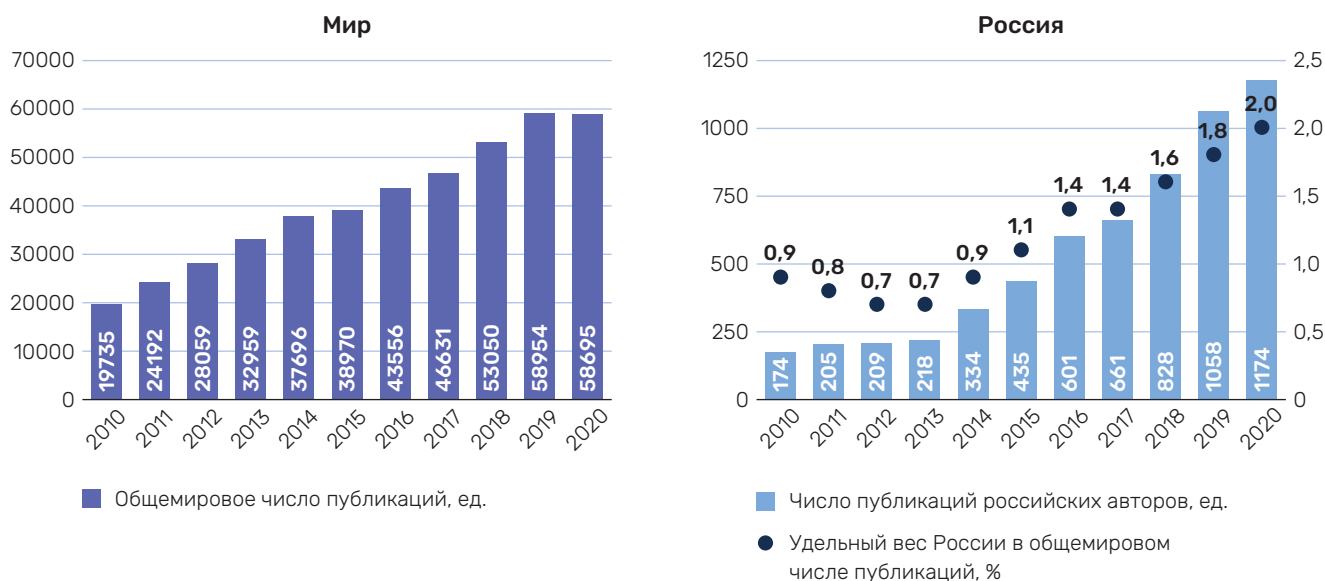
Это подпитывает рост научной активности по тематике технологий передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем. Так, с 2010 по 2020 г. число научных публикаций выросло почти втрое – с 19,7 тыс. до 58,6 тыс. (рис. 1). Прирост российских публикаций шел опережающими темпами.

Доля российских научных статей увеличилась более чем вдвое, а в абсолютном выражении их число выросло более чем в 6 раз.

Увеличиваются и объемы патентования. Число патентных заявок в мире за последние 10 лет выросло более чем вдвое – с 16,7 тыс. до 35,2 тыс. (рис. 2). На лидирующие позиции по патентным заявкам вышел Китай, где в последние годы усиливается экологическая повестка, а рынок электромобилей стал самым крупным в мире. В тройку лидеров с многократным отставанием входят Япония и США.

² <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2020>

Рис. 1. Ключевые показатели публикационной активности



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Дальнейшее развитие отрасли требует значительных вложений. Потребность в глобальных инвестициях в передачу и дистрибуцию электроэнергии в 2014–2035 гг. оценивается в 7 трлн долл. Повышаются требования к эффективности и надежности энергоснабжения, во многих странах остро стоит задача модернизации выработавшей свой ресурс инфраструктуры. Это происходит на фоне ожидания значительного роста потребления энергии (на 37% к 2040 г. относительно уровня 2014 г.), в том числе в результате расширения использования электронных устройств и цифровой трансформации отраслей экономики и социальной сферы³.

В последние годы на стадию масштабирования вышли проекты возобновляемой генерации. Это направление лидирует по масштабу инвестиций. Так, общий объем вложений в инфраструктуру электроэнергетики в мире в 2020 г. составил 679 млрд долл., из которых 41% (281 млрд долл.) приходится на ВИЭ, тогда как на традиционную генерацию – только 16% (111 млрд долл.). На развитие сетевой инфраструктуры направлено 36,5% (248 млрд долл.), а систем накопления энергии для электросетей – менее 1% (4 млрд долл.)⁴.

В ряде стран доля возобновляемой энергетики уже превышает 50%. Многие правительства поставили цель полностью перейти на возобновляемые источники в течение 20–30 лет. Рост отрасли ВИЭ влечет за собой развитие сопутствующих технологических решений, прежде всего, силовой электроники, а также спрос на редкоземельные металлы и технологии утилизации оборудования.

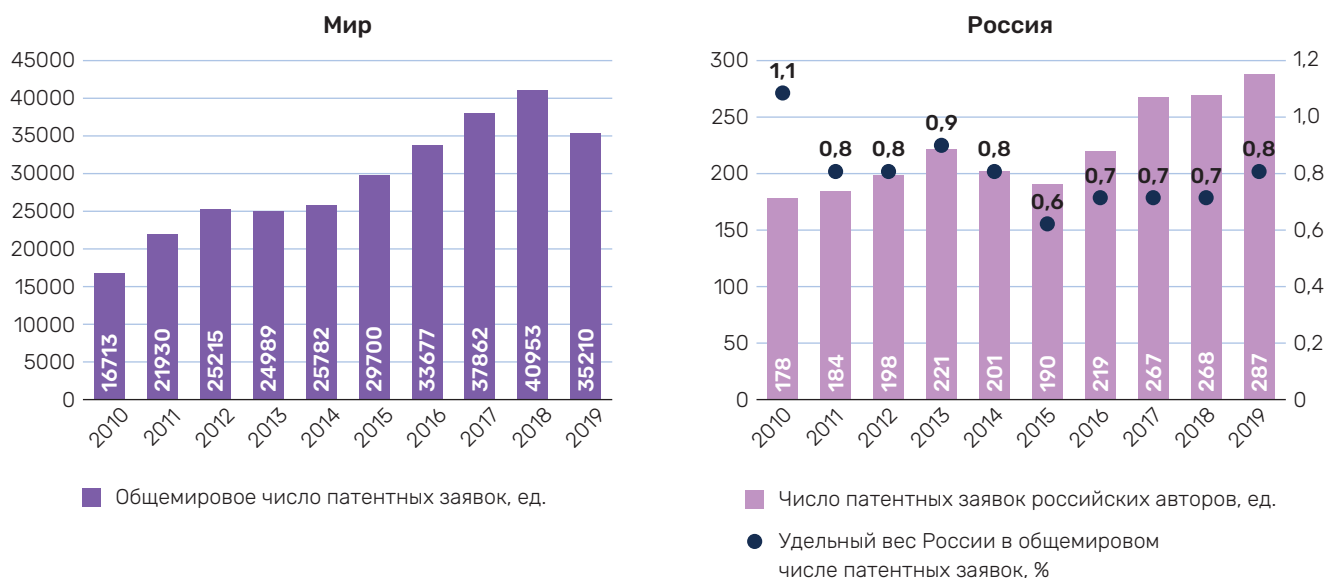
До недавнего времени основным стимулирующим фактором развития возобновляемой энергетики было государственное субсидирование. За последние 10 лет удельная стоимость вводимой мощности возобновляемой генерациикратно снизилась, и в настоящее время внедрение ВИЭ осуществляется уже преимущественно за счет частных инвестиций. Большинство стран-лидеров постепенно сокращают программы финансирования. Начиная с 2014 г. ежегодная вводимая мощность возобновляемых источников выше, чем традиционных. Вложения в ВИЭ более чем вдвое превосходят инвестиции в источники на ископаемом топливе и атомные станции.

Во многих регионах мира нарастает популярность электрического транспорта. Большин-

³ <http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2014>.

⁴ <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2020>.

Рис. 2. Ключевые показатели патентной активности



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

ство ведущих стран разрабатывают программы снижения доли автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (вплоть до запрета продажи). В ожидании значительного увеличения парка электромобилей реализуются программы государственных инвестиций в зарядную инфраструктуру и модернизацию электрических сетей. Расширяются пакеты мер стимулирования бизнеса и населения к покупке электротранспорта, включая прямые субсидии и налоговые льготы. Ключевые автопроизво-

дители запускают линейки электромобилей, постепенно отказываясь от производства транспорта с двигателями внутреннего сгорания. Ожидаемое в течение 10 лет увеличение доли электромобилей потребует адаптации сетевой инфраструктуры.

Все это в совокупности ставит перед электроэнергетикой ряд амбициозных задач, реализация которых невозможна без современных технологических решений.

Технологии

Современная электроэнергетика – это сложный комплекс множества взаимосвязанных решений на стыке различных областей науки и техники. Сегодня особенно сильное влияние на отрасль, как с технологической, так и с организационной точки зрения, оказывают тренды цифровой трансформации.

В основе соответствующих преобразований лежат решения, обеспечивающие мониторинг технологических процессов в режиме реального времени, интеллектуализацию управления и защиты (цифровые подстанции), оптимизацию взаимодействия между производителями и потребителями электроэнергии и др. Это позволяет выстраивать новые модели взаимодействия, в которых более важную роль играют потребители электроэнергии, а энергетические компании предлагают кастомизированные решения и услуги полного цикла (Energy-as-a-Service). Это обеспечивает в том числе высокую степень прослеживаемости электроэнергии. Цифровизация усиливает появившиеся ранее тренды, связанные с развитием децентрализованных энергосистем, интеграцией больших объемов «зеленой» электроэнергии в сеть и расширением спектра межотраслевых технологий (таких как Vehicle-to-Grid)⁵.

Высокотехнологичное направление «Технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем» включает целый ряд групп передовых технологий (рис. 3).

Основные группы технологий существенно различаются по уровню готовности и объемам рынков (рис. 4). Наиболее зрелые – решения по созданию интеллектуальных систем управления и защиты. Они объединяют в единую систему физическую и цифровую инфраструктуру, позволяя управлять текущей работой энергосистем в режиме реального времени, регулировать пиковые нагрузки, а также аккумулировать

данные для планирования дальнейшей работы энергосистем. Выход на этап коммерциализации и впоследствии масштабирования ВИЭ во многом стал возможным благодаря существенной поддержке со стороны правительств ведущих стран, что позволило компаниям снизить затраты на разработку технологий ВИЭ и их пилотное внедрение. Силовая электроника, образуя ядро большинства современных устройств, и решения по хранению электроэнергии, в том числе различные типы накопителей, становятся все более востребованными.

Отдельные группы технологий, составляющие высокотехнологичное направление «Технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем», характеризуются в целом положительной динамикой публикационной и патентной активности (рис. 5).

В 2010–2020 гг. практически по всем группам технологий постоянно росло общее количество научных публикаций. При этом наиболее динамично растет число научных статей по микроэнергосистемам и технологиям хранения электроэнергии.

Наибольшая доля публикаций российских авторов за 2020 г. – по тематике интеллектуальных систем управления и защиты (3,5%), а также силовой электроники (2,7%). По остальным группам технологий значение данного показателя не превышает 1,8%.

Доля российских патентных заявок в 2019 г. для всех технологий оставалась в пределах 0,6–1,1%. Наибольший прирост патентной активности в 2010–2020 гг. – в сфере технологий хранения электроэнергии.

Сегодня значительная доля рынка технологий передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем приходится на несколько корпораций – глобальных лидеров (табл. 2).

⁵ НИУ ВШЭ (2021) Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты. М.: НИУ ВШЭ. Подробнее см.: <https://conf.hse.ru/mirror/pubs/share/463148459.pdf>

Рис. 3. Структура высокотехнологичного направления



Источники: Сколковский институт науки и технологий, АНО «Платформа НТИ», НИУ «Московский энергетический институт», ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

На российском рынке целый ряд компаний обладают научным и производственным потенциалом, осуществляют внутренние и экспортные поставки продукции и компонентной базы, относящихся к высокотехнологичному направлению. К ним относятся ОАО «Аван-

гарт», АО «Ангстрем», ООО МНПП «Антракс», ООО «Астэк», ООО «АСУ-ВЭИ», ООО «НПП Бреслер», ООО «Волновые технологии», ООО «Децима», ООО «Компания ДЭП», ООО «Инкатех», ООО «НПК «Инкотекс», ООО «ИнЭнерджи», АО «Кирскабель», ООО «Курганский приборо-

Рис. 4. Кривая технологической зрелости



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Методические пояснения. Значимость характеризует уровень зрелости технологии и отражает нормализованную упоминаемость технологии в данный период времени в публикациях соответствующего типа (научные статьи, патенты, рыночная аналитика). С учетом интенсивности исследований и разработок выделены четыре этапа:

I этап – зарождение технологии (высокая публикационная активность);

II этап – расцвет технологии (рост патентования и объема рыночной аналитики);

III этап – зрелость технологии (преобладание рыночной аналитики);

IV этап – плато (снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике).

строительный завод», ООО «Лиотех», АО «Людиновкакабель», ООО «Матрица», ООО «Милур Интеллектуальные Системы», ООО «НПО «МИР», АО «Монитор Электрик», АО «НоваВинд», АО «НИИЭФА», АО «Оператор АСТУ», АО «Объединенная приборостроительная корпорация», ООО «ПиЭлСи Технолоджи», ООО «Прософт», АО «Протон-Электротекс», АО «Профотек», АО «Радиус Автоматика», АО «Русатом – Автоматизированные системы управления»,

ООО «Релематика», АО «РиМ», ГК «РТСофт», ООО «Рэнера», ООО «СКТ-групп», АО «НПО «Стример», ЗАО «СуперОкс», АО «ГК «Таврида Электрик», ООО «ТЭЭМП Производство», ГК «Хевел», АО «НПК «Химпромжиниринг» (UMATEX), АО «Чебоксарский электроаппаратный завод», ООО НПП «ЭКРА», ООО «Энергетика, Микроэлектроника, Автоматика», АО «Электротехнические заводы «Энергомера» и ряд других.

Рис. 5. Основные показатели публикационной и патентной активности по группам технологий

	Научные публикации			Патентные заявки				
	Мир	Россия	Доля России, %	Мир	Россия	Доля России, %		
Силовая электроника	2020	5859	159	2,7	2019	4906	46	0,9
	2015	3863	105	↑	2015	3933	18	↑
	2010	2707	53	2,0	2010	2361	32	1,4
Хранение электроэнергии	2020	24349	420	1,7	2019	14693	116	0,8
	2015	14452	150	↑	2015	11137	70	↑
	2010	6619	59	0,9	2010	6673	38	0,6
Возобновляемые источники энергии и распределенная генерация	2020	24079	437	1,8	2019	6823	76	1,1
	2015	18730	149	↑	2015	5950	59	↑
	2010	9560	55	0,6	2010	3903	49	1,3
Микроэнергосистемы	2020	4230	53	1,3	2019	4124	30	0,7
	2015	1461	8	↑	2015	4619	32	↑
	2010	430	3	0,7	2010	1684	18	1,1
Интеллектуальные системы управления и защиты	2020	5290	185	3,5	2019	6622	42	0,6
	2015	2837	30	↑	2015	5666	18	↑
	2010	1458	7	0,5	2010	2864	53	1,9

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

В рамках реализации своих программ инновационного развития ПАО «Россети», ПАО «Русгидро», Госкорпорация «Росатом», АО «СО ЕЭС» и другие отраслевые компании

с государственным участием финансируют комплекс исследований и разработок в области технологий передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем.

Табл. 2. Оценки мирового рынка по группам технологий

Группы технологий	Объем рынка, млрд долл.	Компании-лидеры
Силовая электроника	Более 19,8	Huawei, Sungrow Power Supply, SMA
Хранение электроэнергии	8,6	NextEra Energy, Toshiba, Sonnen, Sumitomo Electric Industries
ВИЭ (в части ветровой генерации)	70	Orsted, Iberdrola, Vestas Wind Systems, Siemens, Gamesa Renewable Energy
ВИЭ (в части солнечной генерации)	7,5	JinkoSolar, Trina Solar, JA Solar, Hanhwa Q-cells, Canadian Solar
Микроэнергосистемы	50	ABB, Cisco, General Electric, Siemens, IBM
Интеллектуальные системы управления и защиты	Более 15	General Electric, ABB, Siemens, Schneider Electric, Itron, Landis+Gyr, Aclara

Источники: Сколковский институт науки и технологий, АНО «Платформа НТИ».

Продукты и рынки

Согласно экспертным оценкам, в среднесрочной перспективе наиболее востребованными на рынке технологий передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем будут такие продукты, как интеллектуальные системы автоматического управления энергосистемами и их защиты, системы управления распределенными энергетическими ресурсами. Ожидается, что мировой рынок соответствующих решений вырастет до 50 млрд долл. к 2025 г. Порядка 40 млрд долл. может составить рынок стандартизованных решений Microgrid. При этом прогноз развития рынка гибридных систем накопления энергии и инверторов с расширенным функционалом несколько скромнее – он оценивается ориентировочно в 20–25 млрд долл.

В России в соответствии со стратегическими документами развития отрасли, планами развития ПАО «Россети» и ключевыми направлениями разработок отечественных производителей решений для энергетики активно развиваются следующие продуктовые направления.

Системы накопления энергии (СНЭ) для стабильной генерации и надежной передачи энергии, подключаемые к распределительным сетям, применяются для сокращения пиковых нагрузок в электросетях, поддержания надежной работы, обеспечения резерва мощности, контроля нагрузки сети. При интеграции в системы распределенной генерации СНЭ позволяют сгладить пики производства электроэнергии на основе ВИЭ, а также улучшить качество электроэнергии и надежность электроснабжения.

Системы интеллектуального учета электроэнергии для разных типов потребителей предназначены для сбора и анализа информации о динамике и структуре потребления электроэнергии, общем состоянии электросетевого оборудования. Такие системы помогают выявлять предаварийные ситуации и дистанционно управлять нагрузками для повышения эффективности энергосистемы в целом и ее отдельных элементов.

Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) электроэнергетических систем обеспечивают поддержку нормальных режимных параметров отдельного объекта и сети в целом; минимизацию потерь; повышение устойчивости электроэнергетических систем за счет предотвращения их перехода в аномальный режим работы; минимизацию аварийности и своевременное проведение ремонта оборудования.

Релейная защита подстанций представляет собой комплекс устройств, предназначенных для быстрого автоматического выявления и отделения от электроэнергетической системы поврежденных элементов с целью обеспечения ее нормальной работы. Современные интегрированные модульные устройства защиты и автоматики на базе интеллектуальных электронных устройств высокой степени гибкости позволяют оптимизировать затраты на создание, техническое обслуживание и ремонт оборудования электросетевого комплекса.

Системы удаленного мониторинга и диагностики обеспечивают в режиме реального времени сбор данных о состоянии ЛЭП, основного и вторичного оборудования, диагностику и прогнозирование состояния объектов и оборудования. Благодаря подобным системам принимаются своевременные организационные и инженерные решения на основе актуальной и достоверной информации.

Автоматизированные системы технологического управления центрами управления сетями оптимизируют режимы работы сети и оборудования подстанций, чтобы снизить потери в электрических сетях и обеспечить надежное электроснабжение; предотвращают выход различных показателей режима работы сети за пределы допустимых значений и поддерживают требуемое качество электроэнергии.

Новое поколение полупроводниковых систем управления режимными параметрами работы сети и качеством электроэнергии на элементной базе силовой электроники

(IGBT, GTO) основано на передовых разработках полупроводниковой промышленности и позволяют повысить эффективность работы электросетей за счет интеллектуального управления, обеспечивая их устойчивость к нормируемым возмущениям, увеличивая пропускную способность ЛЭП, регулируя перетоки мощности. Использование устройств силовой электроники способствует сокращению капитальных затрат на обеспечение надежности и качества энергоснабжения.

Системы передачи электрической энергии на основе технологии высокотемпературной сверхпроводимости позволяют снизить потери в линиях электропередач, передавать большие мощности на генераторном напряжении без избыточной трансформации напряжения, избежать больших затрат на капитальное строительство и закупку высоковольтного оборудования, уменьшить размеры кабеля, инфраструктуры, землеотвода и степень влияния электромагнитного излучения на окружающую среду.

Системы постоянного тока среднего напряжения в сетях с напряжением 6–10 кВ упрощают интеграцию ВИЭ и зарядных станций в энергосистему, что позволяет снизить потери при

передаче электроэнергии и, как следствие, себестоимость услуг, затраты на строительство и реконструкцию сетей, а также последствия аварий. Использование подобных систем устраняет необходимость создания повышающих и понижающих подстанций, резервов мощности, повышая управляемость и устойчивость энергосистемы.

Новое поколение проводов с улучшенными эксплуатационными характеристиками позволяет обеспечить повышение пропускной способности существующих ЛЭП в 1,5–2 раза в качестве альтернативы переводу на более высокий класс напряжения, строительству новой ЛЭП или увеличению сечения существующего провода. Кроме того, благодаря расширению габаритов и длины пролетов снижаются капитальные затраты на больших переходах (через судоходные реки, озера, инженерные сооружения и дороги), где требуется существенное увеличение высоты опор для соблюдения габаритных расстояний.

Перечисленные продукты и решения создают основу для трансформации всех ключевых процессов в отрасли, формируя контуры ее развития до 2030 г. и далее.

Государственная поддержка

В большинстве государств развитие электроэнергетики – один из приоритетов государственной политики. Вместе с тем в ряде стран-лидеров уже приняты или в ближайшее время планируются крупные программы государственной поддержки развития технологий передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем. Наиболее масштабные инвестиции в размере 1 трлн долл. планируются в США в рамках программы по модернизации энергетической инфраструктуры (Energy Infrastructure Program) в течение предстоящих 8 лет. На развитие зарядной инфраструктуры для электромобилей будет выделено 7,5 млрд долл. Реализация стратегического плана по развитию энергетических технологий в ЕС (Strategic Energy Technology Plan) потребует 9 млрд долл. на протяжении 10 лет. Несколько меньшие объемы вложений (4 млрд долл.) предусмотрены на развитие сетевой инфраструктуры в рамках пятилетнего плана 2020–2025 гг. Китая. Подобные инициативы могут стать мощным драйвером экономического роста стран на горизонте до 2030 г.

Кооперационные проекты наднационального уровня в области технологий передачи и распределения электроэнергии реализуют в основном Международное энергетическое агентство (IEA) и Международное агентство по возобновляемым источникам энергии (IRENA). В рамках IEA на постоянной основе действует Программа технологического сотрудничества (IEA Technology Collaboration Programme, TCP), объединяющая 6 тыс. специалистов из 51 страны. На основе этого масштабного экспертного партнерства осуществляются разработка новых технологий, реализуются демонстрационные и пилотные проекты, вырабатываются международные стандарты. Аналитическое сопровождение в области науки и технологий ВИЭ

обеспечивает IRENA. Эта организация оценивает эффективность проектов в области возобновляемых и альтернативных источников энергии.

Во многих странах действуют разнообразные объединения, поддерживающие развитие возобновляемой энергетики, электротранспорта и интеллектуальных систем управления электрическими сетями. Для организации и поддержки исследований и разработок новых технологий в электроэнергетике формируются многочисленные исследовательские стратегии и программы, в числе которых:

- Инициатива по модернизации электрических сетей США (DOE Grid Modernization Initiative), в которую вовлечены 17 национальных лабораторий. На них приходится существенная часть публикаций по электроэнергетике в самых престижных международных журналах.
- Крупный исследовательский проект Европейского союза, посвященный изучению эффектов интеграции силовой электроники в существующие электрические сети (Horizon 2020 Migrate Project). Проект объединяет ряд ведущих университетов, включая Высшую техническую школу Цюриха (Швейцария), Делфтский технический университет (Нидерланды), Университет Манчестера (Великобритания), и компаний (Schneider Electric, RTE France, Eirgrid Ireland и др.) из 13 европейских стран.

В нашей стране развитие технологий передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем входит в число государственных приоритетов, что нашло отражение в действующих программных и стратегических документах, включая Энергетическую стратегию Российской Федерации на период до 2035 года⁶, План мероприятий по реализации Энергетической стратегии

⁶ Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р.

Российской Федерации на период до 2035 г.⁷, Программу инновационного развития ПАО «Россети» на 2018, 2019 и 2020–2024 гг. с перспективой до 2030 года.

Сегодня развитию высокотехнологичного направления способствуют следующие меры государственной поддержки, ориентированные в том числе на рост производства конкурентной экспортно-ориентированной промышленной продукции:

- субсидии на разработку современных технологий⁸;
- субсидии на производство и реализацию пилотных партий средств производства⁹;
- льготы по налогам, сборам, таможенным платежам, арендной плате за пользование государственным имуществом для проек-

тов, реализуемых в рамках специальных инвестиционных контрактов (СПИК 2.0)¹⁰;

- льготные целевые займы по программам Фонда развития промышленности.

В 2020 г. ПАО «Россети» и Правительство Российской Федерации заключили соглашение о намерениях в целях развития в России высокотехнологичного направления «Технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем», предусматривающее вовлечение в кооперацию с ПАО «Россети» производственных, научных и образовательных организаций, а также малых и средних компаний – разработчиков передовых инновационных продуктов и сервисов. Для его реализации разработана соответствующая дорожная карта.

⁷ Утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 1 июня 2021 г. № 1447-р.

⁸ Постановление Правительства Российской Федерации от 12 декабря 2019 г. № 1649.

⁹ Постановление Правительства Российской Федерации от 25 мая 2017 г. № 634.

¹⁰ Федеральный закон от 31 декабря 2014 г. № 488-ФЗ.

Перспективы развития

В ближайшие годы значительно изменится сам облик мировой электроэнергетики. В условиях нарастающей необходимости модернизации выработавшей ресурс инфраструктуры повсеместный рост потребления энергии в сочетании с расширением технологических возможностей приведут к формированию новой архитектуры энергосистем. Распространение возобновляемой генерации обеспечит спрос на технологии интеллектуального управления и защиты электрических сетей, а также приведет к масштабному внедрению систем накопления, децентрализации электрических сетей и постепенному удешевлению всего стека необходимых решений. Программы создания зарядной инфраструктуры и модернизации электрических сетей позволят поддержать взрывной рост парка электромобилей.

В нашей стране развитие технологий передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем в перспективе до 2030 г. будет осуществляться в том числе в рамках реализации соглашения о намерениях между ПАО «Россети» и Правительством Российской Федерации, заключенного в целях развития данного высокотехнологичного направления, а также разработанной для этого дорожной карты. На первом этапе (2021–2024 гг.) основное внимание будет уделено формированию научно-технических заделов, проработке финансово-экономической модели, правовых основ использования новых решений. Кроме того, будет подготовлена стратегия локализации производства приоритетных продуктов и компонентов. В период 2023–2026 гг. будет обеспечена их разработка на базе специально сформированной сети партнерств, определены потенциальные регионы внедрения и поставщики оборудования. На основе результатов этих работ будут развернуты производственные мощности по локализации оборудования на территории России. На горизонте 2025–2027 гг.

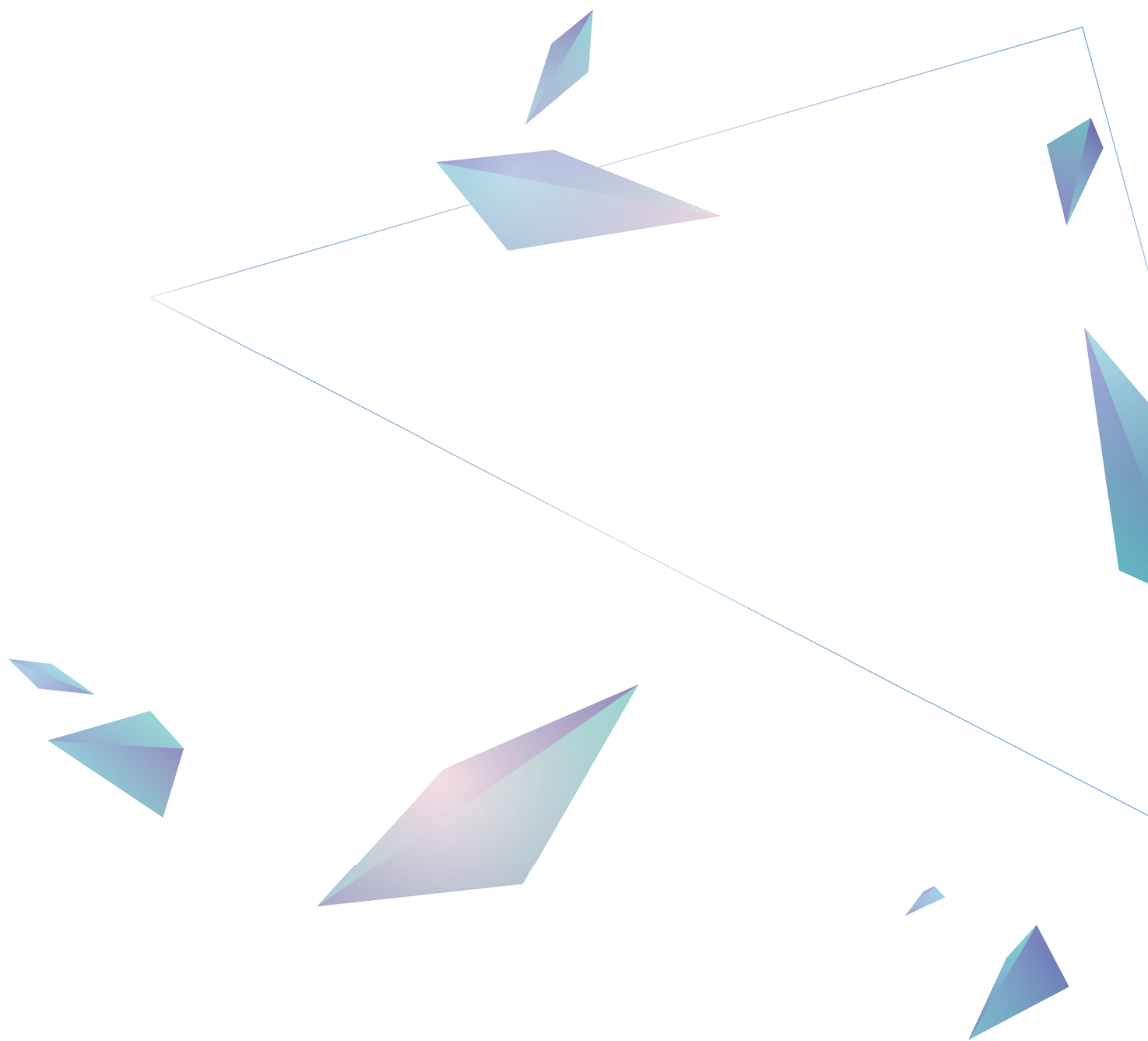
будут созданы прикладные решения и сервисы для целевых сегментов рынка, начнутся их пилотные внедрения. На заключительном этапе в 2026–2030 гг. усилия будут сосредоточены на развитии спроса на российском и зарубежных рынках.

В совокупности мероприятия, запланированные в рамках дорожной карты и иных стратегических и программных документов в области электроэнергетики, направлены на достижение следующих целевых ориентиров развития высокотехнологичного направления:

- введение 12 ГВт мощностей генерации на основе возобновляемых источников до 2035 г.;
- повышение объема производства электротранспортных средств различных типов к 2024 г. до 27 тыс. ед., к 2030 г. – до 730 тыс. ед. накопленным итогом;
- построение зарядной инфраструктуры, в том числе медленных зарядных станций – более 6,5 тыс. ед. к 2024 г., не менее 44 тыс. ед. накопленным итогом к 2030 г.; быстрых зарядных станций 2,9 тыс. ед. к 2024 г., более 28,3 тыс. ед. накопленным итогом к 2030 г.

Развитие технологий передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем – необходимое условие для удержания позиций российской электроэнергетики в условиях быстроменяющегося мирового энергетического рынка и нарастающих экологических вызовов. Проекты и мероприятия дорожной карты в совокупности с иными ключевыми инициативами в этой области позволят нарастить научно-технические заделы, обеспечив тем самым основу для перехода на отечественные решения. В свою очередь, трансформация электросетевого комплекса внесет значимый вклад в повышение эффективности функционирования большинства отраслей российской экономики, прежде всего промышленности.

Технологии создания систем накопления электроэнергии, включая портативные



Сокращения

АКБ	аккумуляторная батарея
КНТП	комплексная научно-техническая программа
КПД	коэффициент полезного действия
ЛИА	литий-ионный аккумулятор
МЭА	Международное энергетическое агентство
СНЭ	стационарный накопитель энергии
ЛСО	катодный материал для ЛИА состава LiCoO_2
LFP	катодный материал для ЛИА состава LiFePO_4
LMO	катодный материал для ЛИА состава $x\text{Li}_2\text{MnO}_3 - y\text{Li}_{1+a}\text{Mn}_{2-a}\text{O}_4 \cdot z\text{LiMnO}_2$ (где $x + y + z = 1$)
LTO	анодный материал для ЛИА состава $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$
NCA	катодный материал для ЛИА состава $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ (где $x + y + z = 1$)
NMC	катодный материал для ЛИА состава $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z\text{O}_2$ (где $x + y + z = 1$)
NVP	катодный материал для натрий-ионных аккумуляторов состава $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$
NVPF	катодный материал для натрий-ионных аккумуляторов состава $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{O}_2\text{F}$

Глобальной целью, предусмотренной Парижским соглашением по климату, является достижение к 2050 г. углеродной нейтральности, означающей нулевой выброс CO₂ в атмосферу. Дорожная карта Международного энергетического агентства (МЭА) для энергетического сектора рассматривает в качестве одного из ключевых драйверов ее достижения развитие электрического транспорта. По прогнозам, в перспективе до 2030 г. в мире будет выпускаться 30 млн электромобилей, что может обеспечить спрос на новые тяговые аккумуляторные батареи общей емкостью не менее 1800 ГВт•ч в год.

В свете усиления экологической повестки получает дополнительный импульс еще одно быстрорастущее направление – возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Для стабильного энергоснабжения потребителей на основе ВИЭ необходимы дополнительные (резервные) источники электроэнергии и системы хранения, которые не зависят от погодных условий и солнечной активности. К концу десятилетия суммарная мощность ветровых станций достигнет порядка 500 ГВт, солнечных панелей – 450 ГВт. Без привлечения углеводородного топлива резервировать ВИЭ могут стационарные аккумуляторные станции, источники питания на «зеленом» водороде, гидроаккумулирующие установки.

Аккумуляторные станции могут быть установлены в любом регионе вблизи ВИЭ, они имеют высокий КПД, легко интегрируются в электрические сети, запасают излишки электроэнергии в моменты низкого спроса и оперативно отдают ее в сеть при необходимости, в том числе в периоды пиковой нагрузки. Оценки показывают, что при условии резервирования только десятой части всех ВИЭ аккумуляторными станциями в 2030 г. потребуются не менее 200–400 ГВт•ч аккумуляторных емкостей в год. Таким образом, только по этим двум

направлениям – электромобилям и резервированию ВИЭ – рынок аккумуляторных батарей должен увеличиться более чем в семь раз до 2000–2200 ГВт•ч в год на горизонте предстоящих 10 лет.

Параллельно ожидается снижение стоимости водородных технологий для энергетики и транспорта. Установки на основе аккумуляторов и водородных топливных элементов технологически дополняют друг друга. Предполагается, что для городского легкового транспорта оптимальными будут аккумуляторы, для дальнемагистрального грузового транспорта и спецтехники будут использоваться гибридные установки на основе аккумуляторов и водородных топливных элементов. По прогнозам МЭА, к 2030 г. в ряде ведущих стран (США, Китай, Япония, Республика Корея) количество автотранспортных средств на водородных топливных элементах составит около 1 млн, а их общее количество в мире достигнет 4,6 млн.

С учетом значимости систем накопления энергии для различных отраслей экономики между Правительством Российской Федерации и Госкорпорацией «Росатом» планируется заключить соглашение о намерениях по развитию данного высокотехнологичного направления. Реализация имеющихся и создание новых заделов входят в контур стратегических задач энергетического комплекса и укрепления позиций России на международных энергетических рынках.

В настоящем разделе доклада приводятся оценки текущего состояния и перспектив развития высокотехнологичного направления «Технологии создания систем накопления электроэнергии, включая портативные» в мире и в России. В частности, дается обзор повестки исследований и разработок, представлены существующие на рынке ключевые решения, систематизированы основные меры государственной поддержки развития данного направления.

Что такое технологии накопления электроэнергии?

Системы накопления электроэнергии представляют собой современные электроэнергетические устройства с функцией многократного аккумулирования электрической энергии, способные потреблять и отдавать энергию. Накопители, прежде всего на основе литий-ионных аккумуляторных батарей, используются в энергетике, электротехнике, электродвижении, а также являются важным компонентом многих видов продукции машиностроительного комплекса.

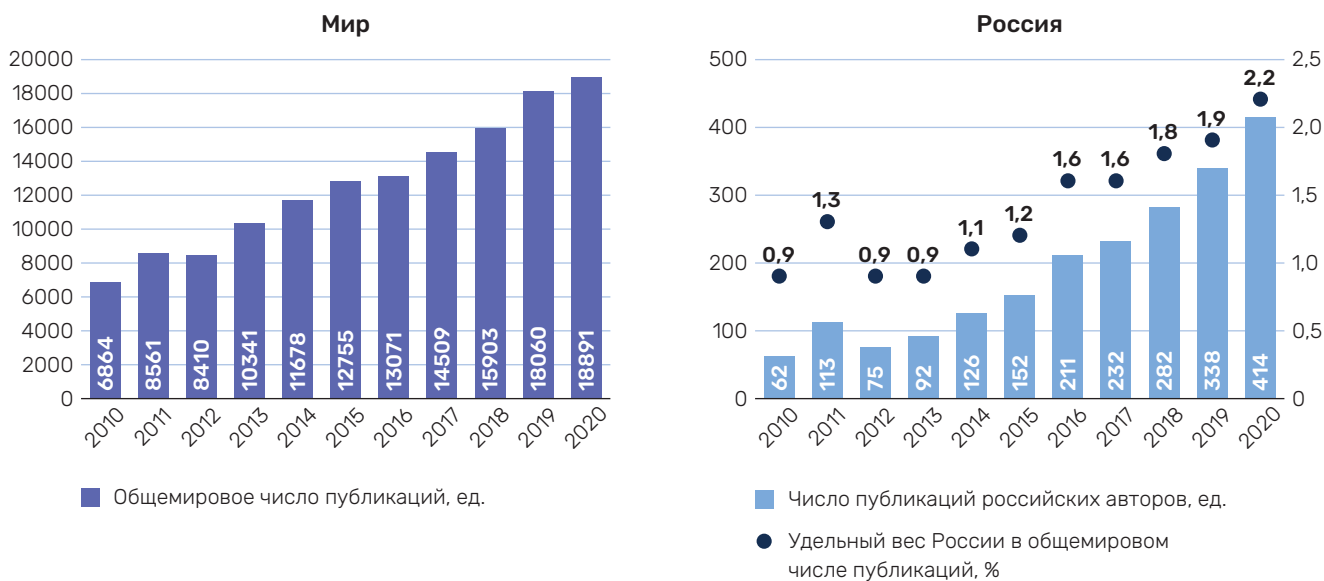
Сегодня наиболее популярны системы хранения на литий-ионных аккумуляторах. Это обусловлено тем, что по сравнению с наиболее распространенными свинцово-кислотными батареями они позволяют в несколько раз быстрее накапливать и отдавать энергию, их ресурс (в циклах «заряд – разряд») в разы больше, они компактны и почти не требуют обслуживания. Благодаря сочетанию доступной цены и высоких технических характеристик литий-ионные аккумуляторы стали основным компонентом экологичного пассажирского транспорта – электромобилей и электробусов.

Спрос на системы хранения энергии растет и в электроэнергетике. Накопители на литий-ионных аккумуляторах обеспечивают бесперебойное энергоснабжение и рациональное использование электроэнергии, позволяя накапливать энергию при ее избытке и отдавать при дефиците. Системы накопления позволяют решить проблему стабильности энергосистемы, регулируют колебания мощности, характерные в том числе для сегмента возобновляемой энергетики.

В мире интерес к этому направлению неуклонно растет, о чем свидетельствуют индикаторы публикационной и патентной активности (рис. 1).

За период 2010–2020 гг. наблюдался практически трехкратный рост общемирового числа научных публикаций – до 18,9 тыс. в 2020 г. В нашей стране динамика еще выше: число научных статей к 2020 г. увеличилось почти в семь раз в сравнении с 2010 г. Более чем в два раза вырос и вклад России в мировую научную повестку (2,2%).

Рис. 1. Ключевые показатели публикационной активности

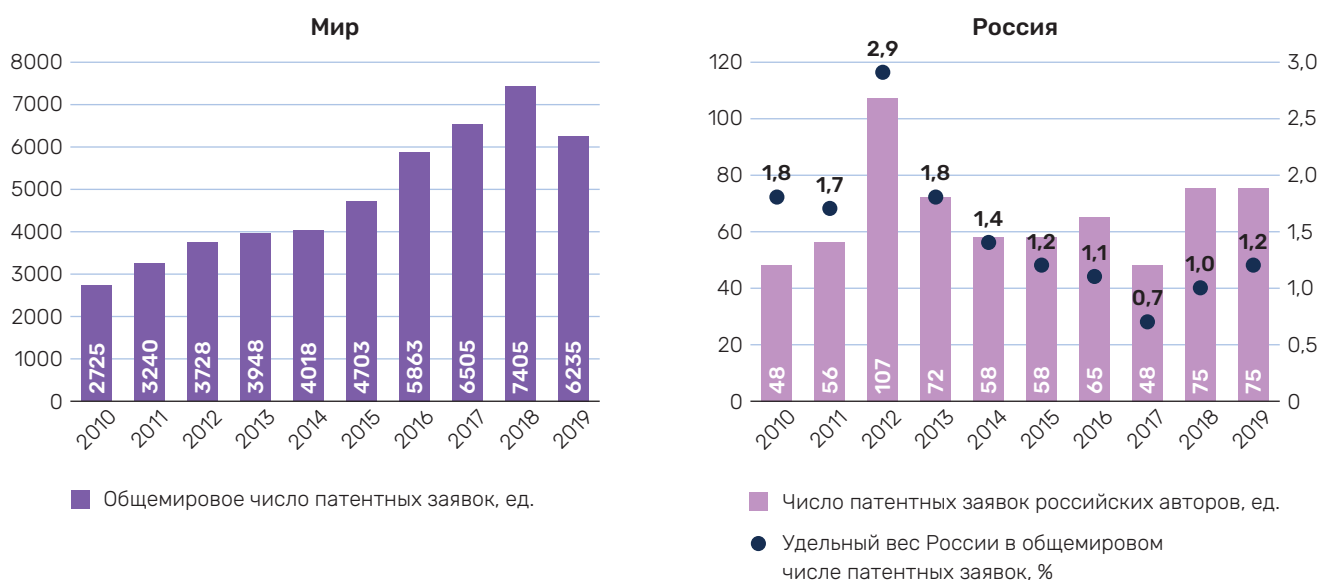


Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Немного менее интенсивно увеличивались масштабы патентования (рис. 2). В 2010–2019 гг. общемировое число заявок на изобретения выросло более чем в два раза. Доля России на протяжении указанного периода менялась

разнонаправленно. После пиков, достигнутых в 2012 г., наблюдался некоторый спад, который в последние годы вновь сменился ростом. В 2019 г. российскими заявителями подано 75 патентных заявок.

Рис. 2. Ключевые показатели патентной активности



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

В последние годы повестка развития систем накопления электроэнергии в значительной степени определяется национальными планами по переходу на экологически нейтральный автотранспорт на электрической тяге. Уже более 20 государств объявили о грядущем запрете автомобилей с двигателем внутреннего сгорания, в том числе Норвегия (с 2025 г.), Германия (с 2030 г.), Франция (с 2040 г.), Великобритания (с 2050 г.), а также Словения, Бельгия, Индия, Сингапур и др.

Амбициозная цель по обеспечению потребностей европейской промышленности в аккумуляторах для электромобилей к 2025 г. установлена в ЕС¹. Европейская комиссия и страны - члены Евросоюза выделяют значительные финансовые ресурсы для ускорения создания производственных цепочек по выпуску накопителей. Масштабная государственная поддержка призвана снизить

зависимость от зарубежных поставщиков, сделав ЕС самостоятельным игроком на мировом рынке наравне с Китаем, Республикой Корея и Японией.

Несмотря на растущее внимание к тематике накопителей со стороны правительств ведущих стран, многие технологии еще находятся на стадии пилотирования и апробации. При этом в фокусе внимания разработчиков остаются увеличение мощности накопителей и снижение стоимости их создания. Наряду с поддержкой исследований и разработок все больше усилий концентрируется на развитии собственных производств полного цикла, инфраструктуры и сопутствующих индустрий (например производства материалов). Параллельно с этим правительства активно стимулируют спрос на новые решения, формируют организационно-технические и правовые условия для их внедрения.

¹ https://ec.europa.eu/growth/industry/strategy/industrial-alliances/european-battery-alliance_en

Технологии

К наиболее перспективным группам технологий создания систем накопления электроэнергии, включая портативные, в мире на горизонте 2024–2026 гг. можно отнести, прежде всего, технологии создания литий-ионных аккумуляторов. Их развитие определит облик электротранспорта как ключевого драйвера раз-

вития электрохимических технологий и обеспечит создание сопутствующей инфраструктуры – заправочных станций. Среди перспективных технологий с более длинным горизонтом выхода в массовое производство – натрий-ионные аккумуляторы, проточные аккумуляторы, а также водородные технологии (рис. 3).

Рис. 3. Структура высокотехнологичного направления



Источник: Сколковский институт науки и технологий.

Большинство отмеченных групп технологий пока не достигли стадии окупаемости и массового распространения и находятся на этапе зарождения (нижняя часть кривой технологической

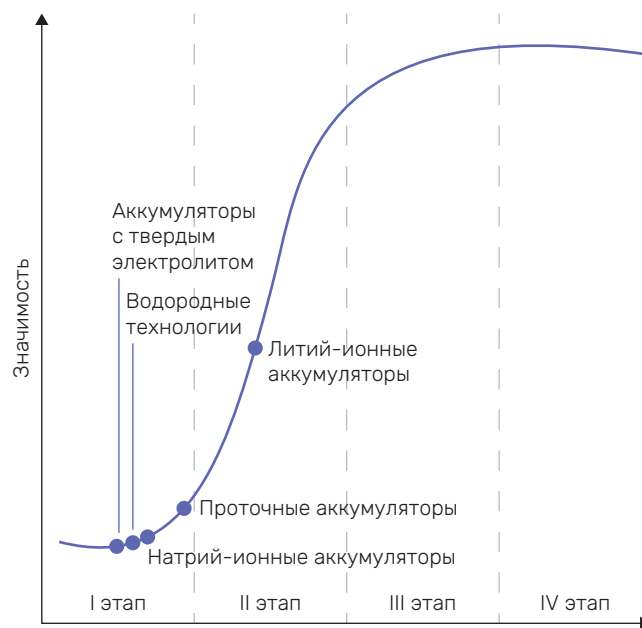
зрелости) (рис. 4). Исследования и разработки все еще направлены на поиск и освоение наиболее жизнеспособных решений, которые могут быть применимы для различных отраслевых

приложений (энергетика, транспорт и др.). Ведущие страны делают ставку на развитие широкого спектра технологий, что гарантирует в дальнейшем появление наиболее конкурентоспособных и коммерчески выгодных решений.

Каждая из групп технологий характеризуется своими особенностями и траекторией развития.

Основные этапы производства литий-ионных аккумуляторов уже отработаны. Текущие задачи связаны с совершенствованием активных материалов для анодов и катодов, удешевлением производства, разработкой технологий вторичной переработки. До 2024 г. будут разработаны высокоемкие катодные материалы на основе NMC с повышенным

Рис. 4. Кривая технологической зрелости



Источники: Сколковский институт науки и технологий.

Методические пояснения. Значимость характеризует уровень зрелости технологии и отражает нормализованную упоминаемость технологии в данный период времени в публикациях соответствующего типа (научные статьи, патенты, рыночная аналитика). С учетом интенсивности исследований и разработок выделены четыре этапа:

I этап – зарождение технологии (высокая публикационная активность);

II этап – расцвет технологии (рост патентования и объема рыночной аналитики);

III этап – зрелость технологии (преобладание рыночной аналитики);

IV этап – плато (снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике).

содержанием никеля и марганца и LFP с повышенным содержанием марганца, высокоемкие анодные материалы (Si/C), а также безопасные высоковольтные электролиты. В перспективе

к 2030 г., как ожидается, будут созданы альтернативные высокоемкие катодные (обогащенные литием NMC и никелем NCA) и анодные материалы, будут усовершенствованы

технологии сборки ячеек и батарейных модулей, а также разработаны технологии вторичной переработки и утилизации.

Технологии натрий-ионных аккумуляторов находятся на начальной стадии развития. Их появление позволит создать дешевые, быстрозаряжаемые АКБ, способные функционировать в расширенном температурном диапазоне, для производства которых не требуется значительная сырьевая база. В краткосрочной перспективе (до 2024 г.) основные усилия будут сосредоточены на разработке и совершенствовании электродных материалов, а также организации массового производства компонентов электролитных смесей. К концу десятилетия потребуется оптимизация технологий сборки ячеек.

В области проточных аккумуляторов отработаны основные этапы производства ванадиевых аккумуляторов. Текущие задачи заключаются в создании единых стандартов для производства и тестирования решений, удешевления производства электролита и мембран. На период до 2024 г. вектор развития будет направлен на оптимизацию сборки ячеек и стеков, внутренних компонентов (мембран и электродов), разработку надежной системы балансировки электролита и стандартов для производства ячеек и стеков промышленного масштаба. На горизонте до 2030 г. для обеспечения надежности систем управления проточными аккумуляторами потребуются разработка новых электролитов с большей удельной емкостью, оптимизация сборки аккумуляторных модулей и их последующая интеграция в электрические сети.

Разработка аккумуляторов с твердым электролитом также находится на начальном этапе. Доработка соответствующих технологий обеспечит вывод на рынок более емких, надежных и безопасных решений, однако потребует кардинальной перестройки существующей производственной инфраструктуры. В перспективе до 2024 г. основные вехи развития данной группы технологий – разработка и оптимизация твердых электролитов и электродных материалов, оптимизация технологий

сборки ячеек и создание пилотного производства. При условии удешевления технологий к 2030 г. станет возможным массовое производство данного типа аккумуляторов.

Несмотря на длительный период разработки, водородные технологии пока не достигли стадии окупаемости вложений. На горизонте до 2030 г. основные усилия будут сосредоточены на проработке инженерных и инфраструктурных решений по стадиям производственного цикла. Для получения водорода необходимы оптимизация электролизного метода генерации, создание установок типа P2G (Power-To-Gas), преобразующих излишки ВИЭ-энергии в запасы водорода. В части генерации энергии с использованием водорода потребуется увеличение мощности унитарного модуля топливных элементов. Появление технологий хранения и передачи водорода обеспечит максимальную доступность решений для потребителей и снижение затрат на крупнотоннажную и локальную логистику.

О различиях в уровне развития основных групп технологий свидетельствуют индикаторы публикационной и патентной активности (рис. 5). Наибольший вклад России в общемировое число научных статей – в области водородных технологий (3,5% в 2020 г.), по остальным группам технологий значение показателя не превышает 1,7%. В нашей стране наиболее динамично растет публикационная активность в сфере технологий создания литий-ионных аккумуляторов (в период 2010–2020 гг. рост более чем в 19 раз). В мире бурный рост публикаций отмечается по технологиям натрий-ионных аккумуляторов, активно увеличивался массив научных статей по тематике аккумуляторов с твердым электролитом.

По числу патентных заявок на изобретения, как и по количеству научных статей, Россия вносит наиболее заметный вклад в области водородных технологий – 2,3% в 2019 г. По более зрелым литий-ионным батареям доля отечественных заявок составила лишь 0,5%. В мире интенсивно патентуются технологии создания аккумуляторов с твердым электролитом и натрий-ионных аккумуляторов.

Рис. 5. Основные показатели публикационной и патентной активности по группам технологий

	Научные публикации			Патентные заявки				
	Мир	Россия	Доля России, %	Мир	Россия	Доля России, %		
Литий-ионные аккумуляторы	2020	9968	157	1,6	2019	2372	11	0,5
	2015	6450	51	↑	2015	1717	14	↑
	2010	1870	8	0,4	2010	1220	5	0,4
Натрий-ионные аккумуляторы	2020	1735	30	1,7	2019	592	0	
	2015	618	2	↑	2015	319	0	
	2010	6	0	0	2010	70	0	
Проточные аккумуляторы	2020	537	7	1,3	2019	47	0	
	2015	252	1	↑	2015	76	1	
	2010	41	0	0	2010	6	0	
Аккумуляторы с твердым электролитом	2020	1707	17	1,0	2019	528	0	
	2015	239	1	↑	2015	201	1	
	2010	50	1	2,0	2010	47	0	
Водородные технологии	2020	6425	223	3,5	2019	2806	64	2,3
	2015	5590	97	↑	2015	2436	44	↑
	2010	4953	54	1,1	2010	1397	43	3,1

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Несмотря на устойчивое увеличение публикационной и патентной активности, высокие затраты на разработку технологий, за исключе-

нием литий-ионных батарей, пока сдерживают широкое коммерческое использование решений на их основе.

Продукты и рынки

Ключевым драйвером развития технологий накопления энергии служат нарастающие потребности в более эффективных и доступных решениях для энергетики и электротранспорта. В энергетике ключевыми продуктами являются накопители на основе литий- и натрий-ионных батарей, а также проточные аккумуляторы (табл. 1). В сфере электротранспорта применимы литиевые и натрий-ионные накопители, аккумуляторы с твердым электролитом, водородные технологии. При этом особенностям легковых электромобилей лучше отвечают литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) и аккумуляторы с твердым электролитом. В свою очередь натрий-ионные аккумуляторы больше соответствуют специфике муниципального транспорта с ограниченным «плечом» пробега, тогда как водородные системы – крупногабаритного электротранспорта.

Внедрение электротранспорта требует не только совершенствования электромобилей, но и создания инфраструктуры зарядных станций и значительной перестройки существующих энергосистем.

На сегодняшний день в нашей стране производство литий-ионных батарейных блоков

в основном ограничено их сборкой из готовых ячеек зарубежного производства. Выпуск самих ячеек невелик и ведется на основе импортных электродных материалов, отечественные – производятся в незначительном количестве для специального применения.

Вместе с тем Россия обладает научно-технологическими заделами для организации собственного производства ключевых материалов, ячеек и решений для транспорта и стационарных накопителей.

В нашей стране ведется разработка электрохимических генераторов с топливными элементами и проточных батарей с ванадиевым электролитом, инициировано создание производства систем постоянного и резервного электропитания на основе электрохимических генераторов.

Перспективным полигоном для отработки использования водородных технологий в условиях Крайнего Севера станет Международная арктическая станция «Снежинка» – круглогодичный и полностью автономный комплекс, создаваемый на базе возобновляемых источников энергии и водородной энергетики.

Табл. 1. Ключевые продукты и сферы их применения

Флагманский продукт / группа технологий	Портативная электроника	Стационарные установки для генерации или накопления энергии	Электротранспорт
Литий-ионные аккумуляторы	☑	☑	☑
Натрий-ионные аккумуляторы	☒	🕒	🕒
Проточные аккумуляторы	☒	🕒	☒
Аккумуляторы с твердым электролитом	☑	🕒🕒	🕒
Водородные технологии	☒	🕒	🕒

☑ – уже применяются 🕒 – применимы в ближайшей перспективе 🕒🕒 – применимы в отдаленной перспективе
 ☒ – не применимы

Источник: Сколковский институт науки и технологий.

Государственная поддержка

Правительства ведущих стран активно содействуют разработке и внедрению систем накопления энергии. Наиболее комплексная поддержка, нацеленная на снижение рисков и стоимости разработки технологий для бизнеса, осуществляется в Европейском союзе. Ключевые меры развития отрасли включают, в том числе, финансирование фундаментальных исследований, субсидирование производителей, создание благоприятной регуляторной среды. В 2018–2021 гг. объем государственной поддержки в форме займов и грантов составил более 7 млрд евро, а суммарный объем инвестиций за счет всех источников – около 27 млрд евро. Основной акцент поддержки – развитие полного цикла производства топливных ячеек. Предусмотрено два ключевых инструмента финансирования инициатив:

- 1) проекты общеевропейского значения (Important Project of Common European Interest, IPCEI) – особый механизм, позволяющий странам – членам Евросоюза предоставлять гранты предприятиям, стартапам и исследовательским институтам на реализацию проектов в новых отраслях с высокими стартовыми издержками и рисками. Проект по развитию аккумуляторных батарей является стратегическим приоритетом для всего объединения;
- 2) ресурсы Европейского инвестиционного банка, предоставляющего займы и другие финансовые инструменты для проектов, которые в силу значительных рисков реализации не могут получить заемное финансирование от коммерческих банков. В дополнение к этому поддержку оказывает Европейский банк реконструкции и развития. Так, за последние 3–4 года были профинансированы три профильных проекта по развитию научно-производственных цепочек.

Аналогичные меры по развитию полного цикла производства аккумуляторов осуществляются и в других странах. Например, государственная поддержка в Великобритании сосредоточена на фундаментальных исследованиях, создании прототипов, разработке и массовом производстве батарей для электромобилей.

В нашей стране меры содействия разработке и внедрению систем накопления энергии предусматриваются в рамках отраслевых документов стратегического планирования. Так, Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации² определяет цели, задачи, стратегические инициативы и ключевые мероприятия поддержки разработки и внедрения технологий на среднесрочный (до 2024 г.) и долгосрочный (до 2035 г.) периоды, а также основные ориентиры на перспективу до 2050 г. Документ дополняет и конкретизирует положения Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 г.³ Также утвержден План мероприятий по развитию водородной энергетики до 2024 г.⁴

Среди инициатив по поддержке создания аккумуляторных батарей для транспорта на электроприводе следует отметить Концепцию по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта на период до 2030 г. и дорожную карту ее реализации на период до 2024 г.⁵, которые предусматривают меры по развитию электротранспорта с тяговыми аккумуляторными батареями и топливными элементами, а также зарядной и водородной заправочной инфраструктуры. Документы задают векторы развития отрасли и предполагают запуск производства ячеек для тяговых аккумуляторных батарей.

Ключевые направления государственной политики стимулирования спроса на системы накопления энергии определяются в рамках

² Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 августа 2021 г. № 2162-р.

³ Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р.

⁴ Утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р.

⁵ Утверждены распоряжением Правительства Российской Федерации от 23 августа 2021 г. № 2290-р.

Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года (с прогнозом до 2035 года)⁶. В числе наиболее востребованных мер: снятие регуляторных барьеров; стимулирование развития зарядной инфраструктуры для муниципалитетов; стимулирование спроса на отечественный электротранспорт и компоненты, в том числе предоставление субсидий на покупку и лизинг отечественных электромобилей; развитие производства отечественных тяговых аккумуляторных батарей и компонентов к ним, а также водородных топливных элементов и сопутствующих систем; развитие производства и локализация электротранспорта и ком-

понентной базы, в том числе на водородных топливных элементах; создание испытательной базы для проведения сертификационных и доводочных работ при проектировании автомобилей с низким углеродным следом; создание инфраструктуры на водороде.

В целях комплексного развития технологий создания систем накопления электроэнергии планируется заключить соглашение о намерениях по развитию высокотехнологичного направления «Технологии создания систем накопления электроэнергии, включая портативные» между Правительством Российской Федерации и Госкорпорацией «Росатом».

⁶ Утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.

Перспективы развития

Согласно зарубежным государственным программам и стратегиям, создание систем накопления электроэнергии входит в число приоритетов как государственной политики, так и крупнейших компаний-производителей. Инициативы стран-лидеров, опираясь на значительный объем внутреннего рынка и готовность преодолевать технологические риски, ориентированы, прежде всего, на переход от двигателей внутреннего сгорания к автотранспорту на электрической тяге. Ведущие страны создают производственные мощности с опережением, осознавая, что они будут «простаивать» на начальном этапе. В основе развития индустрии зачастую лежит экспортная модель развития производства. Как показывает мировая практика, эффективным механизмом развития направления является создание объединений по разработке технологий аккумуляторных батарей (например, Tesla – Panasonic). Подобные консорциумы включают научные центры, производителей материалов и аккумуляторных ячеек, инженерные компании и промышленных заказчиков, в интересах которых осуществляется модернизация производства.

В нашей стране выпуск накопителей энергии ориентирован в основном на внутренний рынок, что представляется оправданным в настоящее время с учетом начального этапа формирования отечественных технологических цепочек. Дальнейшие шаги по созданию отрасли по производству накопителей – от активных материалов до конечного изделия – будут предприняты при содействии Госкорпорации «Росатом» с участием заинтересованных организаций. В частности, планируется создание отечественного производства систем накопления энергии, способного полностью удовлетворить внутренний спрос, а также развитие

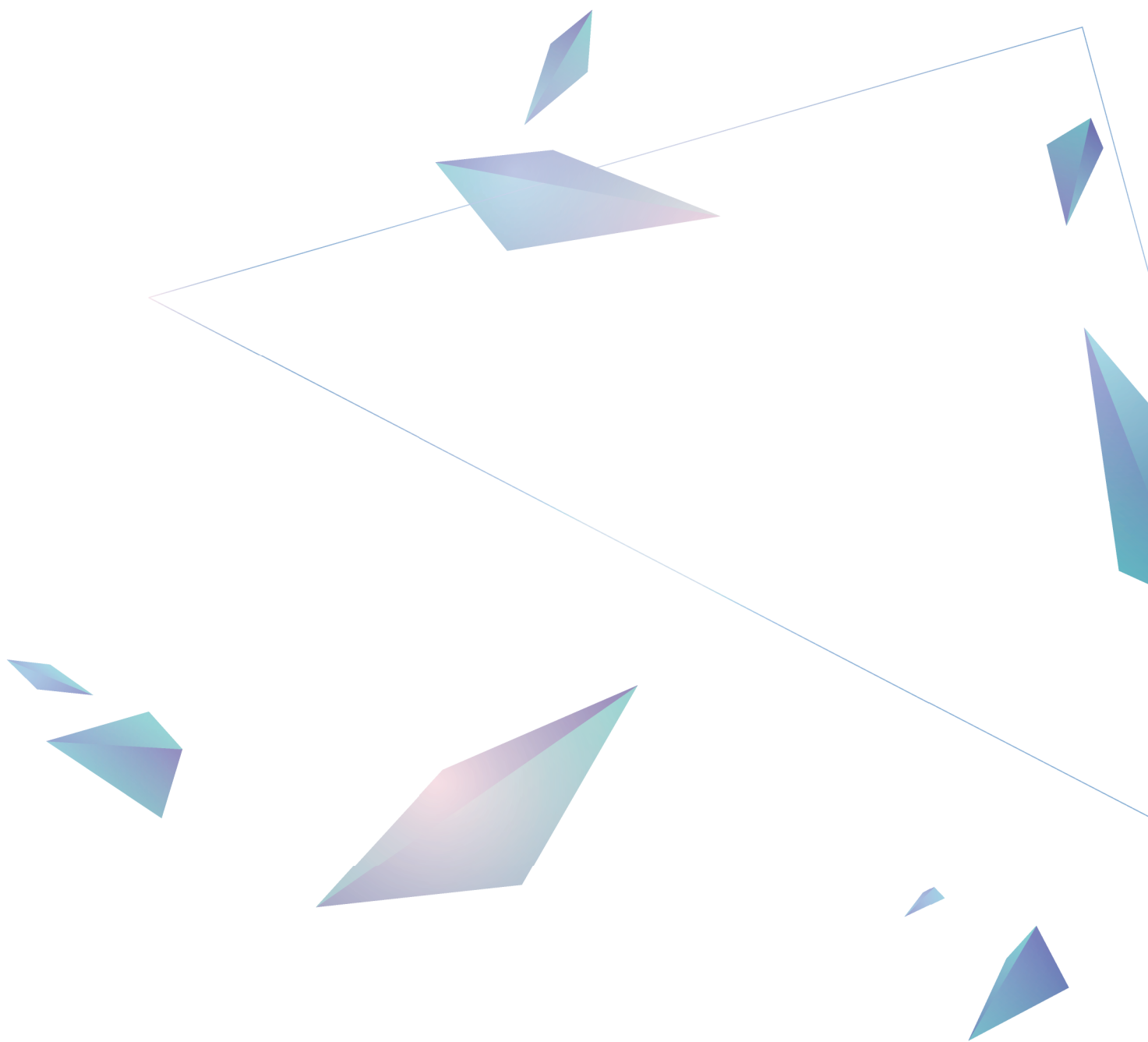
импортонезависимого производства специальных материалов и комплектующих.

В перспективе до 2030 г. основным драйвером развития направления останется электротранспорт, который уже сегодня формирует более 65% спроса. Планы создания производственных мощностей по выпуску российских электромобилей в совокупности с развитием сектора промышленных аккумуляторов формируют внутренний спрос на накопители энергии в объеме 17,5 ГВт·ч. Госкорпорацией «Росатом» прорабатывается проект строительства «Российской гигафабрики» – завода по производству литийионных аккумуляторных ячеек. Запуск первой производственной очереди мощностью 3 ГВт·ч/год планируется в 2025 г. с перспективой масштабирования к 2030 г. по мере увеличения потребностей рынка.

Еще одно перспективное направление – водородная энергетика, которая обладает уникальным кросс-отраслевым потенциалом создания принципиально новых точек роста на стыке электроэнергетики, транспорта, промышленности, обеспечивая декарбонизацию и структурную трансформацию межотраслевого баланса. Флагманскими продуктами станут низкоуглеродные водородные энергоносители, среди которых – низкоуглеродные водород и аммиак, метано-водородные смеси, а также технологии производства и применения этих ресурсов.

Синергия водородных технологий и тяговых батарей для электротранспорта обеспечит оптимизацию флагманских продуктов под возможности отечественной научно-производственной базы. Это, в свою очередь, позволит реализовать потенциал российских организаций на активно развивающихся глобальных технологических рынках.

Технологии новых материалов и веществ



Сокращения

КНТП	комплексная научно-техническая программа
НДПИ	налог на добычу полезных ископаемых
ПАН-прекурсор	синтетическое волокно, основное сырье для производства углеродного волокна
Полиакрилонитрил (ПАН)	синтетический линейный полимер, получаемый полимеризацией акрилонитрила
РАО	радиоактивные отходы
РЗМ (редкоземельные металлы)	15 лантаноидов (с атомными номерами от 57 до 71 в периодической системе: лантан, церий, празеодим, неодим, прометий, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций), а также скандий и иттрий
РМ (редкие металлы)	ниобий, тантал, литий, бериллий, рений, германий, цирконий, вольфрам, молибден; входят в перечень основных видов стратегического минерального сырья, утвержденный Распоряжением Правительства Российской Федерации от 16 января 1996 г. № 50-р
СПИК	специальный инвестиционный контракт

Решение стратегических задач научно-технологического развития России невозможно без создания нового поколения материалов. Это сверхматериалы (сверхлегкие, сверхтвердые и т. п.), материалы с «эффектом памяти» и программируемыми свойствами, которые отвечают современным требованиям или превосходят их, являясь основой для передовых производственных технологий, и др.

Госкорпорация «Росатом» и Правительство Российской Федерации заключили соглашение о намерениях в целях развития в России высокотехнологичного направления «Технологии новых материалов и веществ». В рамках его реализации утверждена дорожная карта¹, представляющая собой комплексный план развития направления в перспективе до 2024 г.

Ключевая задача мероприятий дорожной карты – обеспечить потребности российской промышленности в современных материалах и изделиях на основе отечественных разработок, заместить зарубежные аналоги, а также нарастить экспортный потенциал российской продукции за счет повышения конкурентоспособности на мировом рынке.

В настоящем разделе доклада приводятся оценки достигнутых результатов и перспектив развития высокотехнологичного направления «Технологии новых материалов и веществ» в мире и в России, в том числе дается обзор повестки исследований и разработок, представлены имеющиеся на рынке ключевые решения, систематизированы основные меры государственной поддержки развития направления.

Что такое технологии новых материалов и веществ?

Высокотехнологичное направление «Технологии новых материалов и веществ» составляют три крупные группы технологий: аддитивные технологии (АТ); полимерные композиционные материалы (ПКМ); редкие и редкоземельные металлы (РМ и РЗМ), в том числе технологии получения лития². Отдельно выделяется цифровое материаловедение «Материалы как сервис» (МаaS), представляющее собой совокупность цифровых решений и моделей для предсказания свойств, разработки и тестирования новых структур. Отмеченные группы технологий различаются по технологическим характеристикам, уровню зрелости и масштабам коммерциализации.

В прошедшие пять лет технологии новых материалов и веществ активно развивались в России и мире. Значительный интерес к данному направлению объясняется его стратегической важностью для обеспечения технологи-

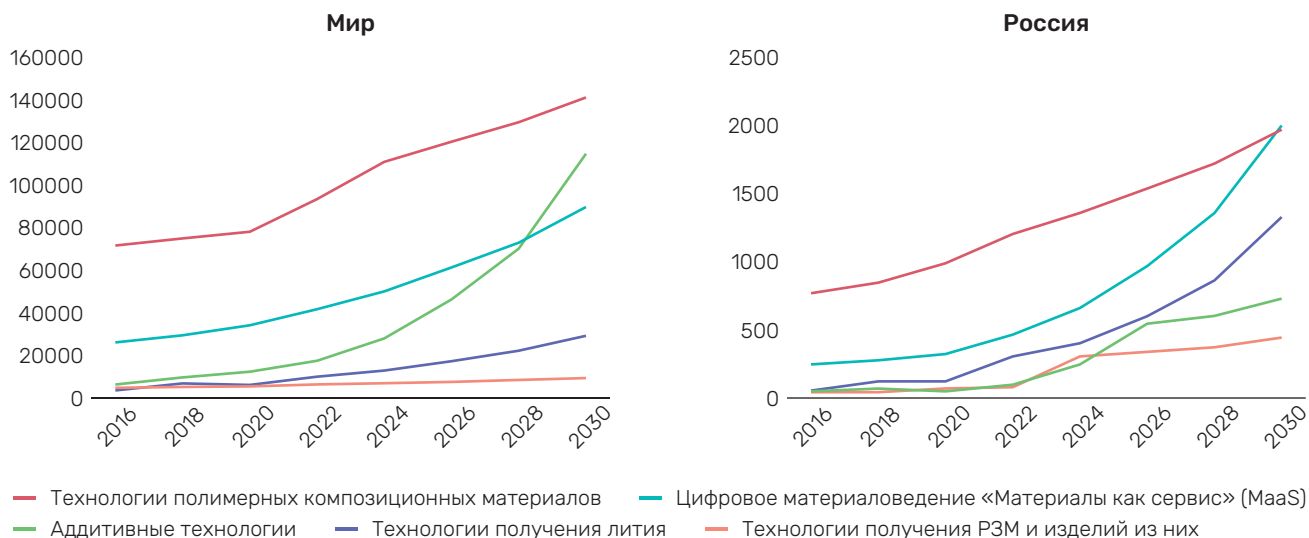
ческого суверенитета государств. По оценкам экспертов, сегодня наибольшим по объему является рынок ПКМ (порядка 80 млрд долл.). Ожидается, что до 2030 г. он будет удерживать лидирующие позиции и увеличится более чем в 1,8 раза по сравнению с показателем 2020 г. Второй по емкости в настоящее время – рынок цифрового материаловедения (порядка 40 млрд долл.). По прогнозам, в последующее десятилетие он вырастет более чем вдвое. Наиболее динамично будет развиваться рынок аддитивных материалов: к 2030 г. ожидается десятикратный рост.

Схожие тенденции наблюдаются в России. Рынок ПКМ сохранит лидирующие позиции и к 2030 г. увеличится вдвое – до 2 млрд долл. Этой же отметки достигнет рынок цифрового материаловедения – благодаря более высокой по сравнению с мировой динамике роста (рис. 1).

¹ Дорожная карта развития высокотехнологичной области «Технологии новых материалов и веществ», утвержденная Решением Заместителя Председателя Правительства Российской Федерации Ю. И. Борисова от 27 апреля 2020 г. № ЮБ-П7-4257. Является основным механизмом реализации соглашения о намерениях между Правительством Российской Федерации и Госкорпорацией «Росатом», заключенного в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 июля 2019 г. № 1484-р в целях развития технологий новых материалов и веществ.

² Технологии получения лития выделены в отдельную категорию в силу высокой значимости для мировой экономики и растущего спроса на данный редкий металл со стороны энергетики, электротранспорта, электронной промышленности и ряда иных сфер.

Рис. 1. Объем рынка по группам технологий до 2030 г., млн долл.

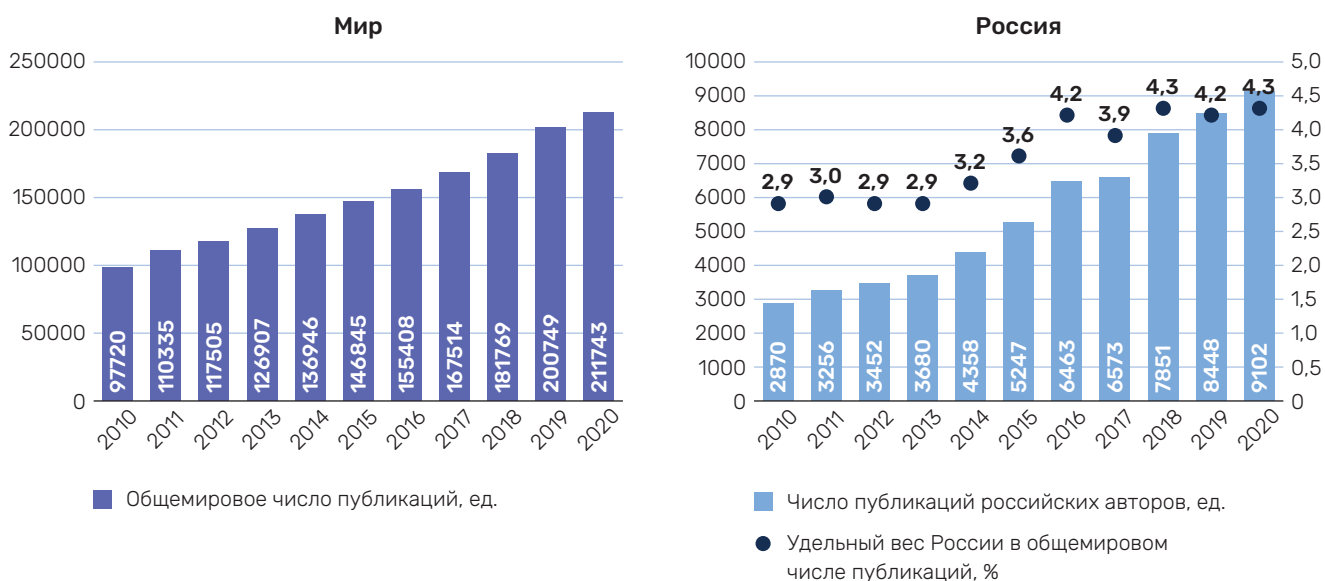


Источник: МГТУ им Н.Э. Баумана.

В мире объем затрат на исследования и разработки в области технологий новых материалов и веществ в период с 2016 по 2020 г. увеличился на 35% – с 3,4 млрд до 4,6 млрд долл. В России данный показатель вырос на 76%³.

Высокую востребованность новых материалов и веществ отражают также индикаторы публикационной и патентной активности. Так, в 2016 г. в мире было опубликовано более 155 тыс. научных статей по данной тематике, а в 2020 г. этот показатель приблизился к 212 тыс. (рис. 2).

Рис. 2. Ключевые показатели публикационной активности



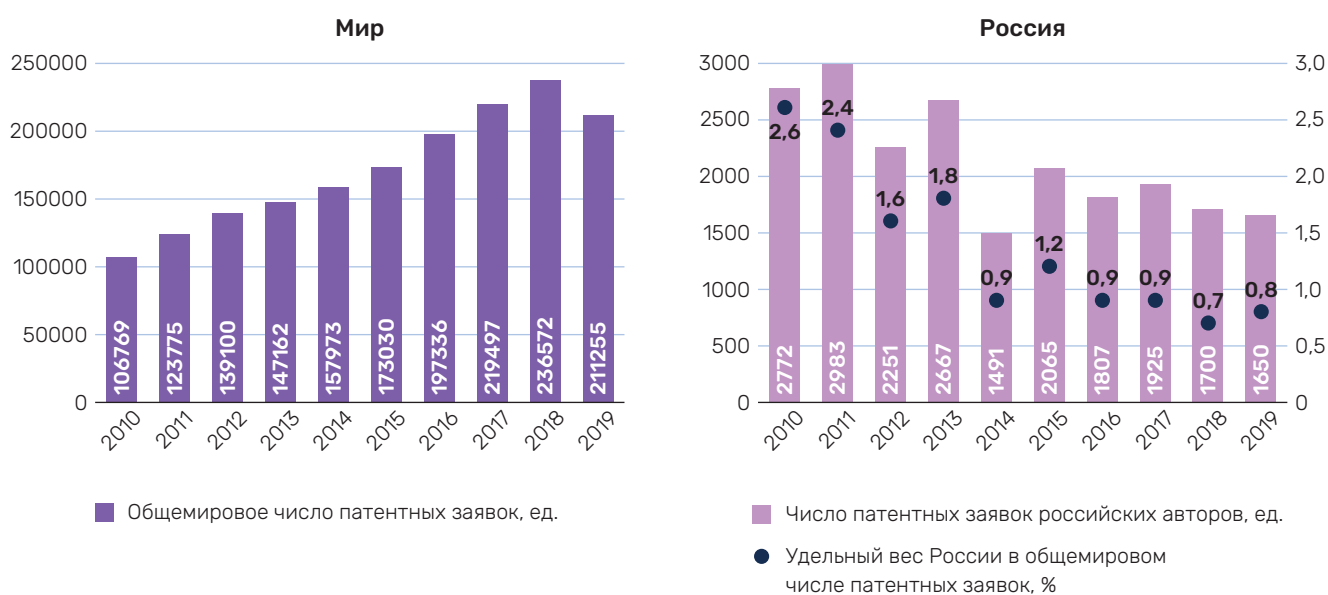
Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

³ По данным МГТУ им Н.Э. Баумана.

При этом число научных статей российских авторов в 2020 г. превысило 9 тыс. Следует отметить, что в нашей стране публикационная активность в 2016–2020 гг. возростала с опережением общемировой динамики (в мире – 36%, в России – 41%), в результате к 2020 г. доля России в общемировом числе публикаций достигла 4,3%.

Максимальное число заявок на изобретения по новым материалам и веществам в России приходится на 2011 г. (2,9 тыс.), в мире – на 2018 г. (236,6 тыс.). Вклад нашей страны за последние десять лет снизился и в 2019 г. составил 0,8% от общемирового числа патентных заявок. В 2019 г. российскими заявителями подано 1,6 тыс. заявок на изобретения (рис. 3).

Рис. 3. Ключевые показатели патентной активности



Примечание. Результаты по патентной активности в Российской Федерации получены на основе данных по патентным заявкам на изобретения и приведены без учета заявок на полезные модели, количество которых превышает число патентных заявок на изобретения в 10–20 раз.

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

В последние несколько лет динамику и траекторию развития технологий новых материалов и веществ определяют ряд устойчивых тенденций.

Перспективы литиевых технологий в значительной степени определяются развитием электротранспорта: продажи электромобилей в мире по итогам 2020 г. превысили 3 млн ед. Все крупнейшие автопроизводители (Tesla, Volkswagen, Mercedes, BMW, Toyota, Ford, Audi, Porsche, Volvo, Hyundai, Honda и др.) уже организуют их массовое производство либо анонсировали соответствующие долгосрочные планы. По прогнозам Международного энергетического агентства,

к 2030 г. парк электрического автотранспорта в мире составит 145 млн ед.⁴

Вектор развития аддитивных технологий в основном задают корпоративные инициативы. Так, американская компания Desktop Metal (производство изделий из металла с помощью АТ) привлекла в 2019 г. инвестиции в размере 200 млн долл. от Google, BMW и General Electric. Desktop Metal разработала собственную технологию «однопроходная струйная обработка», похожую на литье металла под давлением.

Одной из быстрорастущих компаний является Digital Metal – разработчик технологии binder jetting (процесс аддитивного производства,

⁴ <https://www.iea.org/news/global-electric-car-sales-set-for-further-strong-growth-after-40-rise-in-2020>

при котором жидкий связующий агент выборочно наносится для соединения порошковых материалов). Основанный на данной технологии металлический 3D-принтер DM P2500 обеспечивает объем печати 203×180×69 мм, не требуя каких-либо печатных носителей. Это одна из немногих компаний, использующих при печати медь. Несколько лет назад реализована сделка по приобретению Digital Metal угледобывающей корпорацией Höganäs.

Развитие ПКМ связано с созданием нового поколения материалов и во многом зависит от государственной поддержки. В декабре 2018 г. Национальный центр композитов Великобритании (National Composites Centre, NCC) объявил о крупнейших инвестициях правительства страны (в объеме 36,7 млн ф.ст.) в исследования и разработки по десяти новым передовым цифровым технологиям производства композитов⁵. Эти вложения направлены на достижение Великобританией мирового лидерства в данной области.

В секторе РМ и РЗМ знаковым событием стала публикация доклада Геологической службы США от 17 декабря 2017 г., в котором были проанализированы потребности страны в важнейших полезных ископаемых с 1973 г., включая

РЗМ. За этим последовал указ президента США о разработке стратегии обеспечения безопасности и надежных поставок критически важных минералов. В соответствии с этим документом, в 2020 г. Министерством обороны США заключены контракты и начато финансирование двух компаний (американской MP Materials и австралийской Lynas) для поставки на национальный рынок редкоземельной продукции. Всего на поддержку отрасли РЗМ Пентагон выделил 209 млн долл.

Правительство Австралии, на которую приходится шестая часть всех мировых запасов РЗМ, совместно с США запустило программу по поиску новых месторождений и поддержке участников рынка.

Начаты работы на первом в Канаде и втором в Северной Америке предприятии по производству РЗМ. Разработку месторождения Nechalacho осуществляет австралийская компания Vital Metals. Администрация канадской провинции Саскачеван выделила порядка 25 млн долл. на строительство первого в стране предприятия по производству РЗМ, которое будет осуществлять обогащение концентрата и выделение отдельных металлов. Запуск проекта намечен на вторую половину 2022 г.

⁵ <https://www.nccuk.com/news/largest-ever-uk-government-r-d-investment-will-make-uk-composites-world-leader>.

Технологии

Новые материалы и вещества – одна из наиболее перспективных научных областей, охватывающая значительное число тематик. К наиболее динамичным и востребованным для применения в различных отраслях экономики относятся аддитивные технологии, полимерные композиционные материалы, технологии получения РЗМ и изделий из них, литиевые технологии и цифровое материаловедение «Материалы как сервис» (MaaS) (рис. 4). Первые три из них формируют крупные продуктовые направления.

В период 2010–2020 гг. указанные группы технологий заметно различались результативностью исследований и разработок (рис. 5). По числу научных публикаций максимальный прирост достигнут по технологиям получения лития, РЗМ и изделий из них. В 2020 г. российские авторы внесли наибольший вклад в публикационную активность по технологиям получения РЗМ и цифровому материаловедению (18,2 и 9,5% соответственно).

Что касается патентной активности, то за 2010–2019 гг. наиболее динамичный рост количества патентных заявок в мире и в нашей стране отмечен в области цифрового материаловедения и ПКМ. Наибольшая доля России в общемировом числе заявок на получение патента сохраняется по технологиям получения РЗМ (4,2%).

Ввиду значимых различий далее подробно рассмотрены три ключевые группы технологий: аддитивные технологии, полимерные композиционные материалы, редкие и редкоземельные материалы, в том числе технологии получения лития.

Аддитивные технологии

Аддитивные технологии имеют ряд преимуществ перед традиционными способами производства. Они позволяют сократить сроки вывода на рынок новых продуктов, снизить затраты на механическую обработку, увеличить коэффициент использования материалов и др. Наибольший спрос на АТ предъявляют высокотехноло-

гичные отрасли промышленности: авиастроение, аэрокосмическая промышленность, автомобилестроение, двигателестроение, производство высокотехнологичных медицинских изделий, судостроение, энергетическое машиностроение, в том числе атомное.

В нашей стране в рамках развития АТ предусматривается создание конкурентоспособных новых технологий благодаря усилению научно-технического и кадрового потенциала; освоение приоритетных промышленных АТ; оптимизация, модернизация и техническое перевооружение производственных мощностей. Отдельное внимание уделяется совершенствованию нормативно-правовой базы.

Продукты и рынки

Внедрение и рост рынка АТ во многом сдерживаются необходимостью значительных стартовых инвестиций в оборудование, программное обеспечение, материалы, сертификацию, обучение персонала. Капитальные затраты на внедрение 3D-систем зачастую больше, чем для традиционного производственного оборудования.

Для смягчения данного ограничения правительства разных стран вводят стимулирующие меры, которые могут обеспечить существенный рост рынка АТ вплоть до 2030 г. Так, в мае 2017 г. правительство Канады выделило Университету Ватерлоо 8,9 млн долл. на разработку 3D-лаборатории для ускорения процессов аддитивного производства. Значительные усилия для поддержания конкурентоспособности обрабатывающей промышленности прилагает КНР. Китайские производители вкладывают масштабные средства в исследования и разработки в области 3D-печати. Индия рассматривает аддитивные технологии как возможность увеличить свою долю в глобальных цепочках создания стоимости.

По оценке Wohlers Associates, несмотря на пандемию COVID-19, объем мирового рынка АТ вырос до 12,8 млрд долл. в 2020 г., что на 7,5% больше, чем в 2019 г. Вместе с тем наи-

Рис. 4. Структура высокотехнологичного направления



Источник: АНО «Платформа НТИ».

большие темпы роста были достигнуты в 2015–2019 гг. и составили в среднем около 24% в год. Пик был пройден в 2018 г. (33%), после чего рост рынка несколько замедлился по мере постепенного насыщения спроса.

Наибольшую долю рынка АТ в мире в настоящее время занимает сегмент услуг 3D-печати – около 59% (7,4 млрд долл.), на долю оборудования приходится 24% рынка (3 млрд долл.), сегмент материалов составляет 17% (2,1 млрд долл.).

Рис. 5. Основные показатели публикационной и патентной активности по группам технологий

	Научные публикации			Патентные заявки				
	Мир	Россия	Доля России, %	Мир	Россия	Доля России, %		
Аддитивные технологии	2020	48070	2013	4,2	2019	287087	1050	0,4
	2015	26655	768	↑	2015	243752	1429	↑
	2010	20895	390	1,9	2010	243938	2749	1,1
Технологии полимерных композиционных материалов	2020	166655	7188	4,3	2019	148427	704	0,5
	2015	121609	4508	↑	2015	127771	752	↑
	2010	78148	2498	3,2	2010	72693	531	0,7
Технологии получения редкоземельных металлов и изделий из них	2020	296	54	18,2	2019	189	8	4,2
	2015	209	35	↑	2015	305	10	↑
	2010	125	10	8	2010	294	17	5,8
Технологии получения лития	2020	5059	110	2,2	2019	2334	20	0,9
	2015	2431	25	↑	2015	1707	27	↑
	2010	1285	18	1,4	2010	1548	26	1,7
Цифровое материаловедение «Материалы как сервис» (MaaS)	2020	42	4	9,5	2019	13616	51	0,4
	2015	27	1	↑	2015	9226	38	↑
	2010	35	2	5,7	2010	3735	36	1,0

Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

Структура рынка изменилась несущественно по сравнению с 2019 г., однако сегмент услуг и материалов рос более динамично. Причина в том, что потребители, закупившие большое количество 3D-принтеров в 2017–2019 гг., начали постепенно увеличивать их загрузку, что привело к росту потребности в материалах, а многие компании продолжили реализацию планов по переходу на аддитивные технологии и использование 3D-печати, даже несмотря на пандемию COVID-19.

Исходя из типа используемых при печати материалов, наиболее зрелым является сегмент полимерных и термопластиковых 3D-принтеров (около 25 и 20% рынка в денежном выражении соответственно). Самый динамичный в последние годы сегмент – печать металлом (порядка 50% рынка 3D-принтеров в стоимостном выражении). Рост интереса потребителей к данному сегменту стал драйвером более чем двукратно-

го увеличения мирового рынка металлических 3D-принтеров с 2016 по 2020 г. в стоимостном выражении. В то же время прочие сегменты (композиционные, песчаные, керамические и др.) пока находятся на начальном этапе развития, занимая около 5% рынка АТ в стоимостном выражении.

Динамика мирового рынка материалов для 3D-печати напрямую коррелирует с объемом продаж 3D-принтеров. За последние четыре года рынок материалов увеличился вдвое, достигнув в 2020 г. 2,1 млрд долл., что на 9,9% больше, чем в 2019 г. Крупнейшими сегментами рынка являются фотополимеры (объем их продаж составляет более 630 млн долл., или около 30% рынка), и полимерные порошки (более 620 млн долл.). Чуть меньше приходится на термопластики – около 415 млн долл. (порядка 20% рынка). Доля металлических материалов составила немногим более 18% (свыше 380 млн долл.). Прочие материалы (керамика, композиты,

песок, биоматериалы) востребованы в значительно меньшей степени.

Большинство производителей флагманских продуктов по направлению АТ базируются в США и Германии. Среди американских компаний в данной области лидируют 3D Systems, HP, Desktop Metal (разработка оборудования для аддитивной промышленности). Передовые позиции занимают немецкие компании EOS, DMG Mori, Envisiontec, Voxeljet, SLM Solutions, Trumpf, а также итальянская Sisma и британская Renishaw.

Государственная поддержка

В ведущих странах, включая США, Китай, государства ЕС и Великобританию, уже более десяти лет активно поддерживается разработка отдельных технологий аддитивного производства⁶. Так, в Индии развитие АТ осуществляется в рамках различных государственных инициатив («Сделано в Индии» и др.). В Республике Корея сформирована дорожная карта исследований и разработок в сфере АТ, предусмотрены стимулирующие меры по внедрению аддитивных технологий, включая налоговые льготы. Своя стратегия развития 3D-технологий действует и в Великобритании.

В июле 2021 г. утверждена Стратегия развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года⁷. Одним из ключевых документов планирования государственной поддержки развития АТ в России призвана стать дорожная карта развития высокотехнологичного направления «Технологии новых материалов и веществ» – комплексный план развития на перспективу до 2024 г. В рамках ее реализации предусматривается привлечение Минпромторга России, Минобрнауки России, участников Национальной технологической инициативы, Фонда перспективных исследований, Российской венчурной компании, Фонда содействия инновациям, Российского фонда развития информационных технологий, Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда.

Перспективы развития

Мировой рынок АТ характеризуется стабильно высокими темпами роста. Лидерство принадлежит США: на долю страны в настоящее время приходится около 35% рынка АТ. По оценкам экспертов, в ближайшие годы рост сохранится, но несколько замедлится. К 2030 г., согласно данным МГТУ им. Н.Э. Баумана, объем мирового рынка АТ достигнет 115 млрд долл. Несмотря на устойчивую динамику роста, в настоящее время аддитивные методы и технологии применяются для выпуска только 0,1% объема мировой продукции. Как ожидается, к 2035 г. эта доля увеличится до 1,5%⁸.

Российский рынок оборудования и услуг 3D-печати за последние несколько лет вырос в разы, достигнув 4,5 млрд руб., и продолжает увеличиваться. Реализация в полном объеме мер, предусмотренных дорожной картой, позволит обеспечить кратный рост объема российских АТ (18,5 млрд руб. к 2024 г. и 58,2 млрд руб. к 2030 г.)⁹.

К 2030 г. (а отчасти уже к 2024 г.) планирует разработать ключевые технологии 3D-печати и производства соответствующих материалов, создать на территории России серийное производство материалов и оборудования для 3D-печати, а также комплектующих и оборудования для постобработки изделий. Предполагается создание центров АТ, в том числе включающих научно-исследовательские и испытательные лаборатории, которые будут специализироваться на производстве изделий и предоставлении инженеринговых услуг.

Также будут разработаны национальные стандарты в области АТ и внедрены новые образовательные стандарты и программы.

Полимерные композиционные материалы

Полимерные композиционные материалы широко применяются в различных высокотехнологичных отраслях промышленности. Так, круп-

⁶ По данным МГТУ им. Н.Э. Баумана.

⁷ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 14 июля 2021 г. № 1913-п.

⁸ https://image-src.bcg.com/Images/BCG-Get-Ready-for-Industrialized-Additive-Manufacturing-Apr-2017_tcm9-154927.pdf

⁹ Ориентиры предусмотрены Стратегией развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 г.

нейшие мировые производители авиалайнеров активно используют ПКМ в современных моделях гражданской авиации: доля ПКМ в структуре используемых материалов гражданского самолета Airbus A350 достигает 53%, Boeing 787 – 50%, Bombardier C-Series – 46%.

Лидеры мирового рынка ПКМ (Toray Group, Hexcel, Mitsubishi Group, Teijin и др.) вкладывают значительные средства в разработки и цифровизацию бизнес-процессов. Расходы лидеров на исследования и разработки составляют порядка 3,5% годовой выручки. Например, в 2020 г. компания Toray Group направила на эти цели около 570 млн долл. Один из ключевых элементов стратегии ведущих игроков на мировом рынке ПКМ – улучшение характеристик выпускаемых материалов (повышение прочности, стойкости к ударным нагрузкам и агрессивным средам) и создание новых видов продукции.

Продукты и рынки

В течение длительного периода до 2010 г. рынок композитов увеличивался примерно на 8% в год. Затем рост постепенно замедлился приблизительно до 4% ежегодно. В 2020 г., по данным JEC Group, объем мирового рынка ПКМ снизился на 14% в натуральном выражении из-за негативного влияния пандемии COVID-19 на ключевые отрасли потребления – транспорт и строительство. При этом мировой рынок углеродного волокна (УВ) в 2010–2020 гг. рос примерно на 11% в год, что кратно выше показателей по традиционным материалам (например, рынка стали – 2,4%, алюминия – 3,5%¹⁰).

Изменились и структурные характеристики рынка. Еще 10 лет назад лидерами были США и Европа, тогда как сегодня ведущие позиции занимают страны Азии (48% мирового рынка), при этом доля Китая составляет более 28%, а всей Северной Америки – 25%. Основной драйвер роста на мировом рынке композиционных материалов – растущий спрос на легкие материалы в аэрокосмической и автомобильной промышленности. В строительстве и других отраслях востребованы

материалы, устойчивые к коррозии и химическому воздействию. В 2019 г. в мире более 50% композиционных материалов и изделий из них пришлось на две отрасли – автомобилестроение и строительство.

Лидерство в технологиях ПКМ принадлежит компаниям Hexcel (США), Toray Industries (Япония), SGL Carbon SE (Германия), АО «ЮМАТЕКС» (Россия). Их основная специализация, за исключением Hexcel, – углепластики.

Рынок ПКМ охватывает три продуктовые линейки: ПКМ на основе стекловолокна (98,5% рынка), углеродного и арамидного волокна¹¹.

В настоящее время доля России на мировом рынке композитов не превышает 1% (порядка 1 млрд долл. по итогам 2020 г.). Объем потребления композитов на душу населения у нас в стране сегодня составляет 0,5 кг, в развитых экономиках – 4–10 кг. Практически отсутствуют экспортные продажи (порядка 77 млн долл. по итогам 2020 г.)¹². Тем не менее Россия обладает научно-техническим потенциалом для усиления рыночных позиций.

Государственная поддержка

Правительства ведущих стран (США, Китая, Японии, Великобритании и др.) уделяют значительное внимание развитию ПКМ. В последние десятилетия было разработано и реализовано множество государственных инициатив, предусматривающих проведение исследований и разработок, развитие производства в области ПКМ, многие из них уже дали значимые положительные результаты. Так, в США была запущена инициатива «Генном материала» с общим бюджетом в 100 млн долл., несколько позже аналогичная инициатива стартовала в Китае. В Европейском союзе в рамках программы «Горизонт 2020» на развитие направления перспективных материалов и промышленных технологий в 2014–2020 гг. было направлено более 200 млн евро. В настоящее время в данной области также реализуются стратегии и программы развития, направленные на создание и внедрение ПКМ нового поколения.

¹⁰ По данным U.S. Geological Survey, JEC.

¹¹ По данным МГТУ им Н.Э. Баумана, АО «ЮМАТЕКС».

¹² По данным АО «ЮМАТЕКС».

В нашей стране целый ряд инструментов государственной поддержки проектов в сфере ПКМ предусмотрены в дорожной карте. Особое внимание уделено развитию технологий производства композиционных материалов на всех стадиях жизненного цикла – от разработки ПКМ до их утилизации. В рамках данного направления предполагается создание единых цифровых баз данных по материалам, внедрение цифровых двойников, активное использование современных технологий изготовления изделий из ПКМ (безавтоклавные технологии, инфузия), а также дальнейшее развитие и промышленное масштабирование технологий рециклинга.

В рамках реализации дорожной карты по направлению ПКМ достигнут ряд важных результатов. В частности, организовано производство высокомодульного УВ мощностью до 45 тонн в год и локализована цепочка полного цикла по производству углепластиков в России. Госкорпорацией «Росатом» введен в эксплуатацию новый завод по производству ПАН-прекурсора в ОЭЗ «Алабуга» мощностью до 5 тыс. тонн в год.

Один из ключевых инструментов развития исследований и разработок в рамках дорожной карты – планируемая комплексная научно-техническая программа полного инновационного цикла на период 2021–2025 гг. «Новые композиционные материалы: технологии конструирования и производства» (КНТП) с участием ведущих игроков российского рынка ПКМ. В ее реализации примут участие более 20 промышленных предприятий, ведущих институтов Российской академии наук и университетов страны. Предполагается скоординированная разработка пакета современных технологий производства ПКМ и изделий из них, а также проведение широкого спектра фундаментальных исследований.

Для развития формируемых в рамках КНТП научных заделов в дорожной карте предусмотрено создание научно-производственной

инфраструктуры в рамках Инновационного научно-технологического центра «Композитная долина» в Тульской области (ИНТЦ)¹³. Ключевая задача ИНТЦ – обеспечение участников российского композитного рынка необходимой инфраструктурой для реализации цикла создания новых материалов от научных разработок до мелкосерийного производства. Проект был инициирован Тульским государственным университетом, научными партнерами станут РХТУ им. Д.Н. Менделеева и МГУ им. М.В. Ломоносова.

Еще одно направление дорожной карты – стимулирование спроса. В 2020 г. были внесены изменения в критерии подтверждения производства промышленной продукции на территории Российской Федерации¹⁴. Так, для отдельных видов композитных материалов введен критерий «Сделано в России», что обеспечивает расширенный доступ к мерам государственной поддержки. Возобновлено субсидирование затрат на сертификацию и омологацию ПКМ со стороны Российского экспортного центра¹⁵. Утверждена программа ДПМ ВИЭ 2.0¹⁶, которая простимулирует дополнительный спрос на ПКМ, используемые в ветроэнергетических установках. Принятая подпрограмма развития рынка газомоторного топлива в рамках государственной программы Российской Федерации «Развитие энергетики»¹⁷ станет драйвером роста рынка композитных газовых баллонов.

В условиях системной государственной поддержки потребителей российской композитной продукции, включающей компенсацию части затрат на приобретение и использование композитных материалов и изделий вместо традиционных материалов, возможно увеличение объема потребления ПКМ на российском рынке до 150 млрд руб. к 2030 г., а также выход российских ПКМ на зарубежные рынки – до 100 млрд руб. экспортной выручки к 2030 г.

¹³ Постановление Правительства Российской Федерации от 21 января 2021 г. № 26.

¹⁴ Постановление Правительства Российской Федерации от 17 июля 2015 г. № 719. Изменения утверждены Постановлением Правительства Российской Федерации от 12 марта 2020 г. № 267.

¹⁵ Постановление Правительства Российской Федерации от 8 июля 2020 г. № 1007.

¹⁶ ДПМ ВИЭ – программа стимулирования развития возобновляемой энергетики в России за счет гарантированной в течение определенного времени оплаты мощности по договору о предоставлении мощности (ДПМ) на оптовый рынок, заключенному с владельцем электростанции.

¹⁷ Постановление Правительства Российской Федерации от 2 марта 2020 г. № 221.

Перспективы развития

Ключевым производителем и потребителем ПКМ до 2024 г. будет Китай, на его долю придется около 30% их совокупного объема при среднегодовом темпе роста в 8%. По прогнозам, динамика роста на рынках Северной Америки (доля – 25%) и Европы (20%) в указанный период будет ниже, чем в Китае, и составит около 4%¹⁸.

Мировой рынок ПКМ будет находиться под влиянием ряда факторов, включая развитие цифрового материаловедения, технологий изготовления и переработки изделий из УВ, снижение стоимости УВ и расширение их массового использования. Углеродное волокно останется самым быстрорастущим сегментом мирового рынка композиционных материалов (порядка 9–11%). Остальные ПКМ будут расти темпом 2–3%.

Еще более значимым в сравнении с предыдущими периодами будет воздействие глобальных трендов (новая энергетика, топливная эффективность, экологичный транспорт и др.). Основным потребителем ПКМ в мире к 2024 г. наряду с автомобилестроением и строительством станет энергетика. Доля потребления композиционных материалов в данных отраслях составит 27% (3,6 млн тонн), 26% (3,4 млн тонн) и 12% (1,3 млн тонн) соответственно¹⁹. В частности, углеродное волокно будет востребовано для ветроэнергетических установок. Ожидаемое развитие водородного транспорта и рост выпуска баллонов IV и V типов для сжатого газа создаст новый рынок для ПКМ²⁰. Уже сейчас доля композиционных материалов в отдельных серийно производимых автомобилях на водородном топливе составляет 11–12% (включая Honda Clarity, Toyota Mirai, Hyundai Nexo и Mercedes GLC). Активно ведутся разработки в целях выведения на рынок термопластичных композиционных баллонов для водорода. Еще один драйвер роста потребления ПКМ – рынок электромобилей, рост которого прогнозируется на уровне 25–30% в год до 2025 г.

Особую роль в индустрии новых материалов играют цифровизация и развитие удален-

ных сервисов. Именно цифровые технологии позволят усовершенствовать проектирование изделий, оптимизировать производственные процессы, сократить сроки сертификации. По оценке экспертов, уже в ближайшем будущем цифровизация обеспечит кратное снижение срока вывода новых материалов на рынок – в среднем до одного года вместо текущих трех лет.

В связи с развитием мирового рынка ПКМ остро стоит проблема утилизации (рециклинга) композитных отходов. Например, каждый год в мире выводится из эксплуатации более 300 самолетов с последующей утилизацией, при этом в большинстве из них применяются ПКМ. Единственным решением указанной проблемы на сегодняшний день является вторичная переработка композитных деталей. Это наиболее экономически целесообразный (вторичные отходы допустимы к переработке на производствах неответственных изделий) и экологичный способ.

По прогнозам компании Lucintel, крупнейшими рынками переработки УВ в 2026 г. станут Европа и Северная Америка, на территории которых будет переработано 3 тыс. (44,5%) и 2 тыс. (30,1%) тонн УВ соответственно. Помимо утилизации композитных отходов, устойчиво растет спрос на переработанные УВ – из-за их более низкой стоимости – со стороны автомобилестроения, авиационной промышленности, спортивных и потребительских товаров.

Невысокие темпы роста производства и потребления ПКМ в России объясняются, в том числе, технологическим отставанием российской композитной отрасли, особенно в сегментах малотоннажной химии, оборудования, запасных частей и инструментов. Так, по экспертным оценкам, в течение последних 20 лет около трети продукции малотоннажной химии импортируется.

Реализация дорожной карты должна обеспечить системное и ускоренное решение данных проблем. Планируемые мероприятия нацелены на консолидацию участников российской отрасли композиционных материалов (вузов,

¹⁸ По данным JEC 2020.

¹⁹ По данным JEC 2020.

²⁰ Lucintel, Grand view Research, MarketsandMarkets и др.

научно-исследовательских институтов, производителей, основных потребителей, органов власти) в единую экосистему, а также на разработку и внедрение механизмов государственной поддержки и создание иных стимулов для опережающего развития отрасли.

Редкие и редкоземельные металлы, технологии получения лития

Развитие производства РМ и РЗМ имеет критическое значение для удовлетворения потребностей высокотехнологичных отраслей. Без редких и редкоземельных металлов невозможно создание сверхматериалов (сверхлегких, сверхтвердых и т. п.), материалов с «эффектом памяти» и программируемыми свойствами для передовых технологий, а также компонентной и элементной базы на их основе. Интерес к РМ и РЗМ растет и на фоне увеличения спроса на возобновляемую энергию. РЗМ, такие как неодим и празеодим, применяются в производстве электромобилей и гибридных автомобилей.

Значимость рынка РМ и РЗМ подтверждается, в том числе, тем фактом, что в последние годы он стал ареной торгового противостояния между США и Китаем как доминирующим мировым поставщиком, что оказывает негативное влияние на цепочки поставок во всех странах.

Продукты и рынки

Вклад редких и редкоземельных металлов в глобальный объем производимого минерального сырья относительно невысок, однако темпы роста производства и потребления РМ и РЗМ опережают многие традиционные виды сырья. Суммарное производство РЗМ в 2018 г. составило порядка 170 тыс. тонн (годом ранее – 132 тыс. тонн).

Благодаря переходу к массовому производству электромобилей, систем хранения энергии, расширению производства электроники, промышленной техники и другого высокотехнологичного оборудования, в фазе активного роста находится глобальный рынок лития. По оценкам

экспертов, с 2018 по 2030 г. потребление лития вырастет кратно, с 260–270 тыс. до 1250 тыс. тонн эквивалента карбоната лития (LCE)²¹. Российский рынок лития в настоящее время оценивается в несколько тысяч тонн LCE с перспективой умеренного роста до 10–12 тыс. тонн к 2030 г.

По объему минерально-сырьевой базы и производства лития выделяются Австралия (рудное сырье), Чили и Аргентина (рассолы), Китай (рудное сырье и рассолы). На указанные страны приходится более 90% разведанных ресурсов и около 95% всей добычи лития в мире, при этом производство лития из гидроминерального сырья (рассолов) отличается более низкой себестоимостью.

Мировые запасы РЗМ оцениваются примерно в 130 млн тонн. В 2019 г. добыча РЗМ в мире, по данным Геологической службы США, составила порядка 220 тыс. тонн.

Наиболее активную позицию в установлении контроля над сырьевыми ресурсами и производстве редкоземельных элементов занимают китайские компании. КНР прямо или косвенно контролирует до 70% всей минерально-сырьевой базы лития в мире. В последние годы сохраняется тенденция к увеличению импорта концентратов в страну при сокращении добычи в самом Китае.

Китай и США – крупнейшие в мире импортеры редкоземельных элементов. Доля китайских производителей, применяющих технологии обогащения концентратов и получения разделенных РЗМ, составляет 85%. В США добыча РЗМ осуществляется только на руднике Mountain Pass в Калифорнии, который был вновь введен в эксплуатацию в 2018 г. после консервации в 2015 г.

Что касается развития отдельных технологий РМ и РЗМ, то наибольшее число производителей ключевых продуктов также сосредоточены в США и Китае. Компаниями – лидерами в области технологий получения сырьевых литиевых продуктов являются Ganfeng Lithium и Tianqi Lithium Corp. Ежегодный объем вложений китайских компаний в исследования и разработки в области литиевых технологий составляет

²¹ Эквивалент карбоната лития является сырьем для производства лития.

до 145 млн долл.²² В США в сфере технологий получения сырьевых литиевых продуктов лидирует компания Albemarle Corporation с объемом вложений в исследования и разработки в размере 59 млн долл. в 2020 г.²³ Заметное положение в области технологий извлечения лития также занимает компания Sociedad Química y Minera de Chile (Чили).

Россия располагает значительными балансовыми запасами РЗМ (около 17% мировых запасов) и по объему сырьевой базы находится на втором месте в мире после Китая. Однако по объему добычи наша страна занимает лишь 7-е место. Российские литиевые сырьевые источники представлены в основном рудными объектами, которые уступают по себестоимости зарубежным рассольным и характеризуются длительным циклом освоения (до 10 лет).

Государственная поддержка

Основные усилия ведущих стран в области РМ и РЗМ, а также технологий получения лития направлены на повышение обеспеченности стратегически важными элементами.

Так, Еврокомиссия разрабатывает стратегию по снижению зависимости европейской промышленности от поставок РЗМ из Китая, предусматривающую финансовую поддержку новых производителей. В 2018 г. в рамках программы «Горизонт 2020» выделен грант в 17 млн евро для проекта по разработке критических РЗМ для промышленности Европы (Secure European Critical Rare Earth Elements, SecREEts). Также был создан Европейский альянс по накопителям (European Battery Alliance) для формирования конкурентоспособной и устойчивой отрасли по выпуску аккумуляторов в условиях глобальной конкуренции. Особое внимание уделяется вопросам доступности сырья, в том числе литиевого²⁴, и другим направлениям сотрудничества в производственной, технологической и иных сферах. В 2019 г. Еврокомиссия одобрила планы семи государств (Бельгии, Германии, Италии, Польши, Финляндии, Франции, Швеции) по вы-

делению 3,2 млрд евро на субсидии производителям батарей для электромобилей. Со стороны бизнеса ожидаются инвестиции в размере 5 млрд евро.

В США редкоземельные металлы отнесены к критически важным минералам. В 2020 г. государство проинвестировало 29 млн долл. в техасскую компанию Urban Mining Company, производящую редкоземельные магниты из электронного мусора.

В России значительный объем государственной поддержки РМ и РЗМ запланирован в рамках дорожной карты. Уже дан старт проектированию и созданию завода по выпуску РЗМ из техногенных источников (фосфогипс); запускается комбинат АО «ТГОК «Ильменит», который будет производить рудные концентраты титана, циркония, стекольные кварцевые пески.

Ведутся активные работы в части стандартизации, в том числе:

- разработаны национальные стандарты, проведена классификация цветных металлов, в которой выделена группа редких;
- создан отраслевой технический комитет по стандартизации для представления интересов России в работе международного отраслевого технического комитета ISO/TC 298 «Редкоземельные элементы» в целях гармонизации базы национальных стандартов с международными.

Для создания благоприятной среды для развития отрасли в России решен ряд задач нормативно-правового характера:

- снижена базовая ставка НДС при добыче руд РМ и РЗМ с 8 до 4,8%;
- разрешена добыча попутных полезных ископаемых (лития, йода, брома, бора и др.) из подземных и попутных вод;
- выведены из-под статуса недр федерального значения участки, которые содержат литий в растворенном виде.

Для дальнейшего совершенствования нормативно-правовой базы в краткосрочной

²² По экспертным оценкам.

²³ https://www.annualreports.com/HostedData/AnnualReports/PDF/NYSE_ALB_2020.pdf

²⁴ В 2020 г. литий включен в перечень критически важных сырьевых материалов ЕС.

перспективе запланировано введение норм федерального законодательства²⁵ в целях предоставления возможности использования урановых хранилищ радиоактивных отходов (РАО) для размещения отходов переработки минерального сырья и устранение некоторых барьеров, включая:

- снятие ограничений в применении специальных инвестиционных контрактов (СПИК) для проектов редкометалльной отрасли;
- упрощение доступа к осуществлению на землях лесного фонда геологического изучения недр, разведки и добычи полезных ископаемых.

Также рассматривается возможность пересчета запасов полезных ископаемых на государственном балансе, не востребованных на рынке, но содержащихся в качестве попутных продуктов в руде, которые оказывают существенное влияние на стоимость стартового разового платежа за пользование недрами, делая реализацию проектов по добыче основного полезного ископаемого (например титана, циркония, лития) экономически невыгодным.

Запланирован ряд мероприятий в части отмены или изменения рентных коэффициентов для повышения инвестиционной привлекательности проектов в сфере РМ и РЗМ.

В дальнейшем планируется проработка возможности введения обязательных норм минимальной доли закупок РМ и РЗМ, произведенных в Российской Федерации, введение обязательной квоты для государственных корпораций и компаний с государственным участием, а также субсидирования выпадающих доходов отечественных производителей РМ и РЗМ в случае падения цены на внешнем рынке ниже себестоимости производства (в течение первых пяти лет с момента запуска производства).

Помимо этого, предполагается формирование стратегического запаса РМ и РЗМ с применением механизма государственной закупки металлов, произведенных в России; создание механизма получения компаниями долгосрочных кредитов с государственными гарантиями

для реализации проектов, имеющих стратегическое значение, и обеспечение инвестиций со стороны государства в инфраструктуру, необходимую для реализации проектов в сфере РМ и РЗМ.

Перспективы развития

Значимость РЗМ и изделий из них очень высока для всего мира, ведущие страны ищут пути увеличения источников и способов получения РЗМ. Об этом говорят растущие вложения в исследования и разработки, расширение массива научных публикаций и патентов по данной тематике. Однако темпы роста направления и далее будут сдерживаться малым количеством разведанных месторождений, технологической сложностью и дороговизной получения РЗМ.

По тематике редких и редкоземельных металлов в настоящее время в России уже создан определенный научно-технологический задел в рамках реализации государственной программы Российской Федерации «Развитие промышленности и повышение ее конкурентоспособности». Дорожная карта предполагает реализацию проектов с высокой степенью готовности, осуществление которых позволит устранить дефицит РМ и РЗМ, включая, например, проекты по получению группового разделенного концентрата и гипсового вяжущего, увеличению сырьевой базы и созданию мощностей по производству ниобия, скандия и коллективного концентрата РЗМ с последующим выходом на экспортные рынки, а также ряд других.

Редкими металлами (ниобием, танталом, цирконием, германием) российская промышленность будет обеспечена благодаря реализации ряда инвестиционных проектов, включая создание производства по выпуску ильменитового концентрата, строительство нового горно-металлургического комбината и др.

В рамках дорожной карты будут реализованы проекты по обеспечению доступа к литиевому сырью, а также развитию необходимой инфраструктуры по переработке сырья и освоению российских месторождений. Ожидается,

²⁵ Федеральный закон от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами», федеральные нормы и правила Ростехнадзора НП-103-17.

что запланированные мероприятия обеспечат полное импортозамещение к 2025 г.

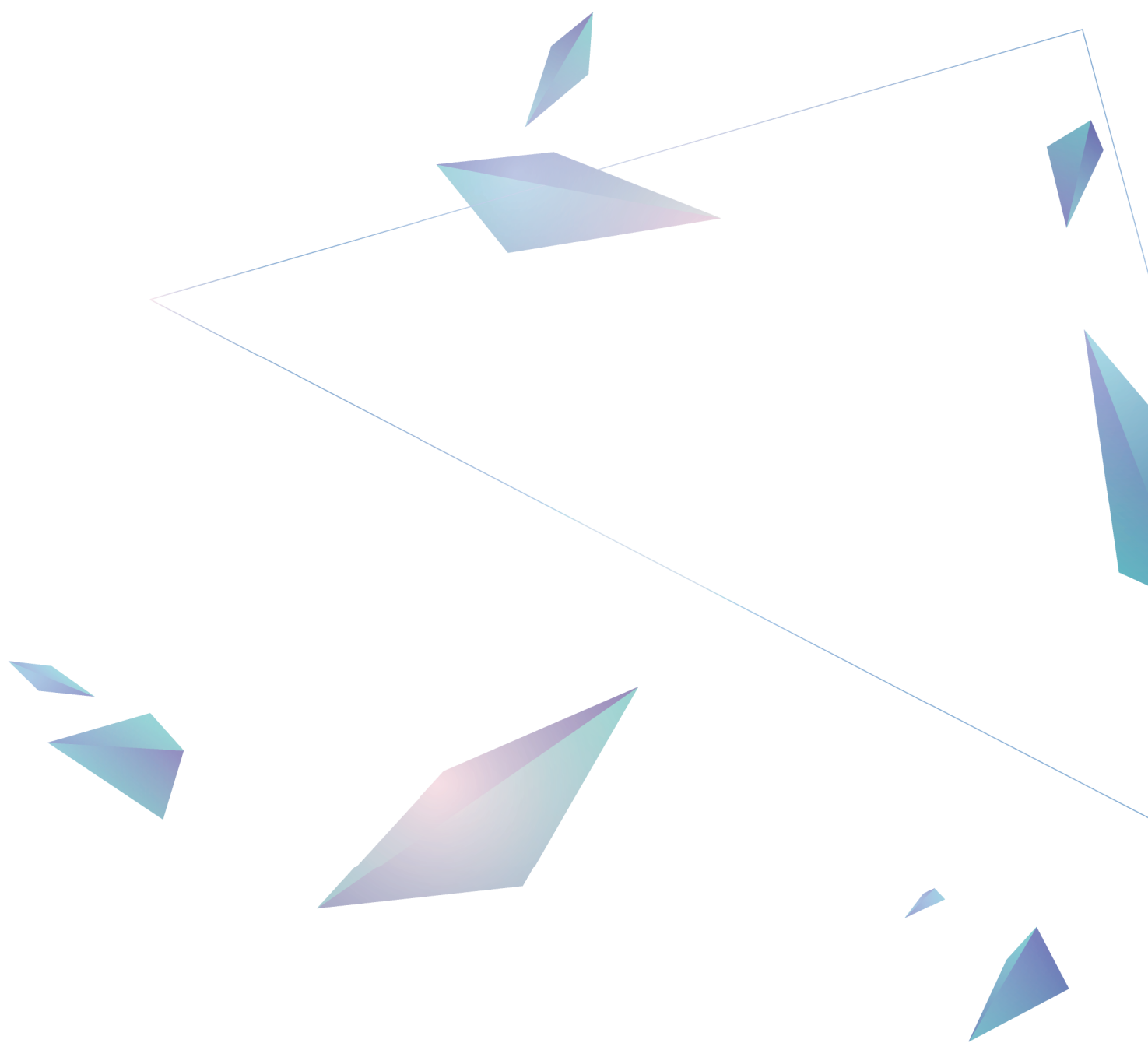
Одно из основных условий развития собственной индустрии – укрепление кооперационных связей. Для этих целей создана Ассоциация производителей и потребителей редких и редкоземельных металлов.

Для создания производственных цепочек от сырья до конечных изделий при участии Минпромторга России и Госкорпорации «Росатом» разработаны и реализуются рамочные трехсторонние соглашения с основными участниками рынка РМ и РЗМ (магниты, автокатализаторы, скандийсодержащие алюминиевые

сплавы, катализаторы нефтекрекинга, каучуки, оптика). Развитие литейного направления предусматривает международную кооперацию при реализации проектов с применением российских инновационных технологий.

По оценке Госкорпорации «Росатом», благодаря запланированному комплексу мероприятий к 2030 г. удастся на 100% обеспечить потребности российской промышленности в отечественных редких и редкоземельных металлах. В результате Россия сможет восстановить лидирующие позиции на мировом рынке и войти в топ-5 мировых производителей РМ и РЗМ.

Перспективные космические системы



Сокращения

АФАР	активная фазированная антенная решетка
ВОЛС	волоконно-оптические линии связи
ДЗЗ	дистанционное зондирование Земли
КА	космические аппараты
КС	космические системы
МКА	малые космические аппараты
ПКС	перспективные космические системы
СМКА	сверхмалые космические аппараты
СПКА	сборочное производство космических аппаратов
ШПД	широкополосный доступ в интернет
IoT/M2M (Internet of Things, Machine to Machine)	Интернет вещей, межмашинное взаимодействие
HTS (High Throughput Satellites)	спутники связи с высокой пропускной способностью
VHTS (Very High Throughput Satellites)	спутники связи со сверхвысокой пропускной способностью
VSAT (Very Small Aperture Terminal)	компактный терминал с антенной малого диаметра

Сегодня телекоммуникационные и геоинформационные космические системы позволяют реализовать множество различных сервисов, широко востребованных практически во всех секторах экономики. Однако имеющиеся отечественные решения не в полной мере отвечают задачам цифровой трансформации экономики России и растущим потребностям в космических инфокоммуникационных услугах. В частности, зарубежные продукты и услуги в этой области все чаще превосходят отечественные по своим потребительским характеристикам, а внедрение систем многократного использования ракет-носителей, стандартизация и организация массового производства продукции позволяют иностранным компаниям существенно снизить себестоимость, тем самым оказывая на российские организации и ценовое давление.

Преодолению наметившегося отставания должно способствовать развитие технологий перспективных космических систем (ПКС), в частности создание многоспутниковых орбитальных группировок. Основные их преимущества связаны с объективностью, оперативностью и доступностью передаваемой информации. В нашей стране стартовал федеральный проект «Комплексное развитие космических инфор-

мационных технологий на 2022–2030 годы» (ранее – подпрограмма «Сфера»), за реализацию которого отвечает Госкорпорация «Роскосмос». Проектом предусмотрены мероприятия, направленные на обеспечение потребности государственных и коммерческих заказчиков в современных продуктах и сервисах на основе космических технологий. Это позволит охватить услугами спутниковой связи, цифрового вещания и высокоскоростного доступа в интернет, а также спутникового Интернета вещей всю территорию Российской Федерации. Еще одним важным результатом станет широкое внедрение сервисов на основе технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в деятельность предприятий различных отраслей экономики, социальной сферы и государственного управления.

В настоящем разделе доклада приводятся оценки достигнутых результатов и перспектив развития высокотехнологичного направления «Перспективные космические системы» в мире и России, в том числе рассматриваются повестка исследований и разработок в области перспективных космических систем, существующие на рынке ключевые решения, основные меры государственной поддержки развития перспективных космических систем.

Что такое перспективные космические системы?

В последние годы тематика перспективных космических систем привлекает повышенное внимание не только правительств и государственных организаций, но и корпоративного сектора. Освоение околоземного космического пространства, ранее бывшее вотчиной самых передовых в технологическом отношении стран, становится все более зрелым и инвестиционно привлекательным бизнес-направлением, в развитии которого заинтересованы практически все страны и широкие круги инвесторов. Создаются условия для участия в разработке перспективной ракетно-космической техники новых игроков космического рынка –

частных и малых инновационных компаний, в том числе в формате государственно-частного партнерства.

Такой всплеск интереса к ПКС со стороны представителей различных отраслей экономики в значительной степени обусловлен новыми возможностями обеспечения широкополосного интернета с помощью спутниковых технологий. Так, в 2013 г. компания – оператор системы ДЗЗ Planet (ранее – Planet Lab) анонсировала создание многоспутниковой орбитальной группировки. В 2015 г. о разработке систем спутниковой связи объявили StarLink и OneWeb, а в 2017 г. началось развертывание низкоорбитальной мно-

госпутниковой группировки второго поколения Iridium NEXT, предоставляющей услугу мониторинга подвижных объектов наряду с традиционными возможностями широкополосного доступа (ШПД). Новый стимул данному направлению придает развитие систем выведения с многоразовыми ракетами-носителями, позволяющими снизить стоимость вывода космических аппаратов на орбиту. В 2010 г. американская компания SpaceX осуществила успешный пуск ракеты-носителя «Фалькон-9» с многоразовым использованием первой ступени.

Еще один тренд развития ПКС – миниатюризация и облегчение конструкций космических аппаратов (КА). Это позволяет создавать многоспутниковые низкоорбитальные группировки ДЗЗ с КА малой размерности, которые дают возможность существенно сократить время обработки запроса на проведение съемки, повышают оперативность доставки информации, обеспечивают онлайн-доступ к ней.

Направление ПКС охватывает технологии приборостроения, управления многоспутниковыми группировками, обработки больших объемов спутниковых данных, в частности на борту КА, с помощью искусственного интеллекта, управления информационными потоками с беспилотных летательных аппаратов и наземных робототехнических средств и др. Это требует значительных вложений, в том числе

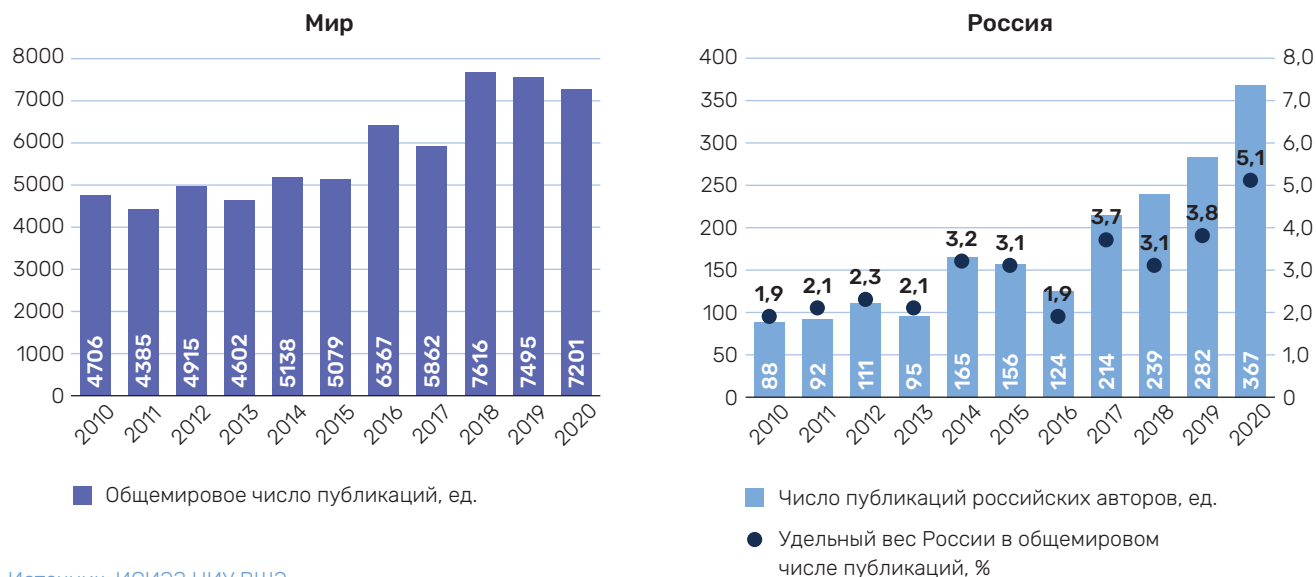
в проведение скоординированных исследований и разработок, создание инфраструктуры для их доведения до стадии готовности к коммерческой реализации.

Стабильно высокий интерес исследователей к тематике ПКС отражают показатели публикационной активности. Так, в период 2018–2020 гг. общемировое число научных статей по данному направлению ежегодно превышало 7,2 тыс. (рис. 1). При этом на долю России, которая входит в топ-10 стран по количеству научных публикаций, приходится свыше 5% научных работ.

По масштабам научной деятельности лидируют Китай и США, обеспечивающие более половины всех научных статей в области ПКС за последние три года. Среди организаций лидерами по числу научных публикаций являются университеты Китая (Пекинский университет авиации и космонавтики, Нанкинский университет авиации и космонавтики), ведущие научные организации США (Лаборатория реактивного движения НАСА, Калифорнийский технологический институт), а также Германский центр авиации и космонавтики.

Особенно наглядно возрастающий интерес бизнеса к тематике ПКС иллюстрирует интенсивно растущая патентная активность (рис. 2). В 2017–2019 гг. общее количество патентных заявок превышает 3 тыс. При этом со значительным отрывом лидирует Китай: общее чис-

Рис. 1. Ключевые показатели публикационной активности

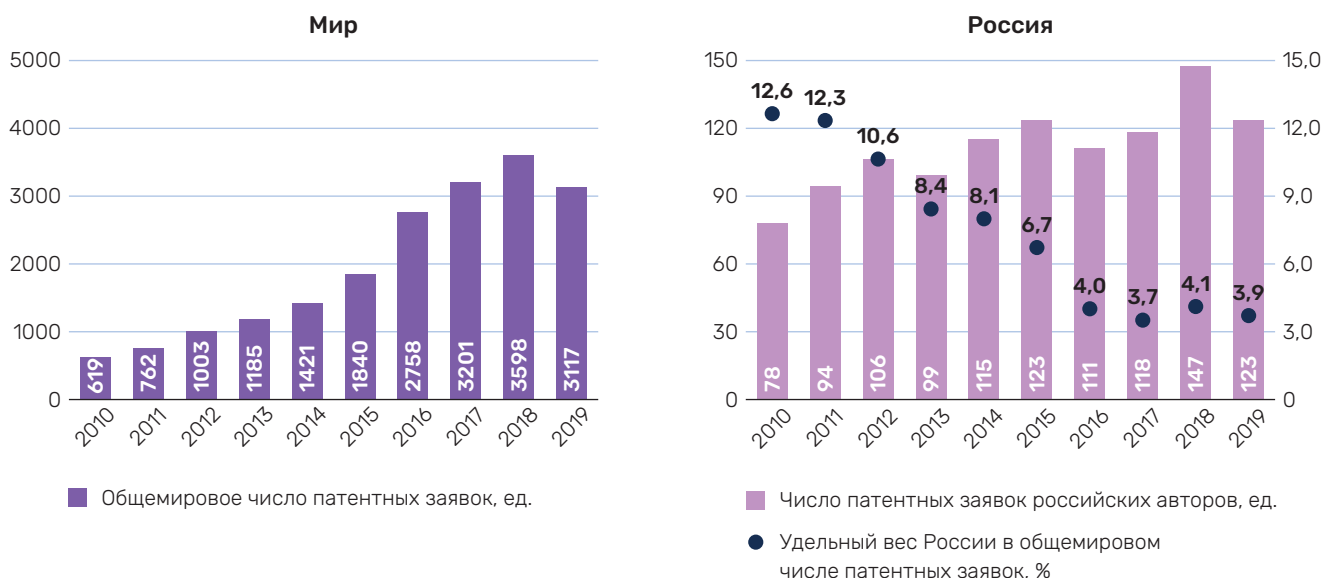


Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

ло заявок за указанный период в 4 раза выше, чем у США, которые занимают вторую позицию (накопленным итогом 6341 против 1475). Россия по данному показателю находится на четвертом месте, опережая Республику Корея. Доля нашей страны составляет порядка 4% в общемировом объеме патентных заявок.

По итогам 2017–2019 гг. наиболее активно разработки в области ПКС патентуют американские корпорации Boeing, General Electric, Hamilton Sundstrand, а также канадская компания Pratt & Whitney. В России лидирующие позиции по числу заявок на патенты занимают организации Госкорпорации «Роскосмос».

Рис. 2. Ключевые показатели патентной активности



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

За последнее десятилетие космическая индустрия значительно трансформировалась. Важную роль в этом сыграли процессы цифровизации, включая развитие Интернета вещей и мобильных сетей связи пятого поколения, и растущий спрос на данные со стороны большинства секторов экономики и социальной сферы. Востребованность современных ПКС возрастает и в связи с повсеместным распространением новых видов цифровых услуг в регионах, по мере широкого внедрения беспилотного транспорта и роботизированных систем, в том числе для выполнения логистических операций. На фоне экологических вызовов значительно увеличивается потребность в отслеживании состояния опасных объектов, выбросов парниковых газов, развития чрезвычайных ситуаций. Космические данные могут использоваться в целях мониторинга, обеспечения безопасности, научных исследований и целого ряда других

задач. Это требует надежной и современной телекоммуникационной и геоинформационной инфраструктуры на всей территории страны, включая удаленные регионы.

Системы космической связи в ряде случаев являются резервными, а в районах, где отсутствует наземная инфраструктура связи, используются как основные. Уже сегодня многие сервисы (медицинские, образовательные, досуговые и др.) реализуются в цифровом формате, что требует устойчивой широкополосной связи на всей территории страны, в том числе в самых отдаленных районах. Это особенно актуально в свете долгосрочных социально-экономических задач развития Арктического региона и Северного морского пути, где должны быть обеспечены все виды услуг связи, мониторинга и позиционирования, в том числе для наращивания грузопотока. Дополнительным фактором роста спроса на услуги спутниковой связи и интернета стала пандемия COVID-19.

Технологии

Перспективные космические системы – обширное направление на стыке различных областей науки и техники. Оно включает следующие группы технологий (рис. 3):

1) технологии создания перспективных телекоммуникационных спутниковых систем, обеспечивающие широкополосный доступ в интернет, телерадиовещание, голосовую связь, сбор

информации с датчиков и передачу управляющих команд через спутник (Интернет вещей);

2) технологии создания перспективных геоинформационных спутниковых систем, позволяющие решать задачи в таких сферах, как природопользование, картография, гидрометеорология и океанография, проводить оперативный мониторинг территорий России и мира;

Рис. 3. Структура высокотехнологичного направления



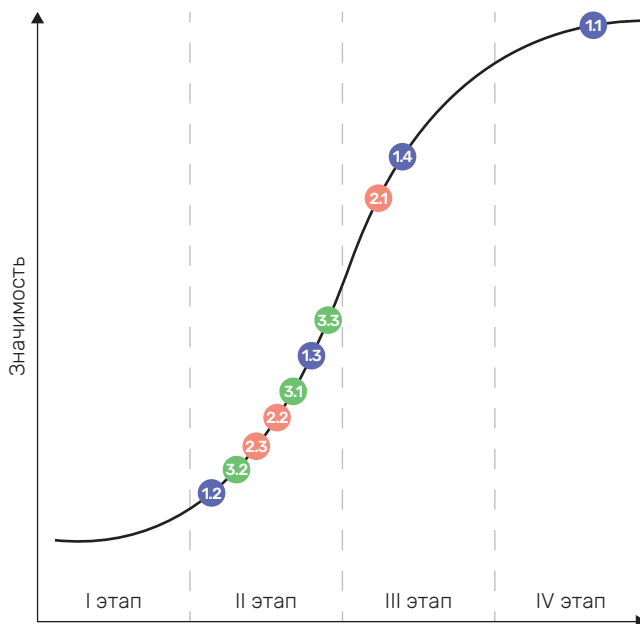
Источник: Госкорпорация «Роскосмос».

3) передовые технологии производства космических аппаратов нового поколения, обеспечивающие создание, испытания и эксплуатацию космических средств, унификацию космических платформ малых КА, разработку служебных систем и приборного ряда микро- и малых КА,

технологий управления многоспутниковыми орбитальными группировками, серийного производства КА и их составляющих.

Группы технологий ПКС существенно различаются по стадиям зрелости (рис. 4). Сегодня самым высоким уровнем готовности в мире

Рис. 4. Кривая технологической зрелости



Технологии создания перспективных телекоммуникационных спутниковых систем

- 1.1 Технологии создания космических комплексов фиксированной спутниковой связи и телевидения с КА высокой энерговооруженности на геостационарной орбите
- 1.2 Технологии создания космических систем с КА на высокоэллиптических орбитах
- 1.3 Технологии создания многоспутниковой системы Интернета вещей на базе МКА, унифицированной малогабаритной аппаратуры связи и абонентской аппаратуры
- 1.4 Технологии создания спутниковой системы коллективного ШПД в Интернет с использованием КА на круговых средневысотных орбитах

Технологии создания перспективных геоинформационных спутниковых систем

- 2.1 Технологии создания высокодетального космического комплекса ДЗЗ
- 2.2 Технологии разработки прототипов малого и сверхмалого КА ДЗЗ оптико-электронного наблюдения, целевой аппаратуры, технологий изготовления ее составных частей
- 2.3 Технологии разработки прототипов малого и сверхмалого КА ДЗЗ радиолокационного наблюдения, целевой аппаратуры, технологий изготовления ее составных частей

Передовые технологии производства КА нового поколения

- 3.1 Технологии создания сборочного производства серийных КА
- 3.2 Технологии разработки малогабаритной бортовой аппаратуры межспутниковых лазерных линий связи
- 3.3 Технологии разработки космических платформ КА нового поколения в обеспечение создания многоспутниковых орбитальных группировок на базе малых КА

Источник: Госкорпорация «Роскосмос».

Методические пояснения. Значимость характеризует уровень зрелости технологии и отражает нормализованную упоминаемость технологии в данный период времени в публикациях соответствующего типа (научные статьи, патенты, рыночная аналитика). С учетом интенсивности исследований и разработок выделены четыре этапа:

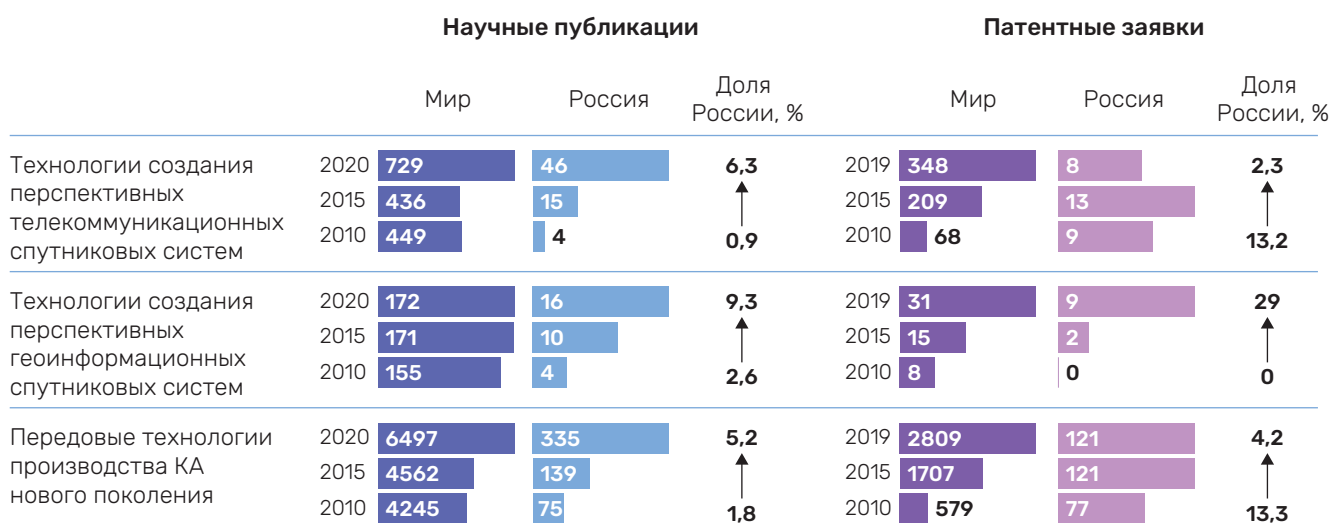
- I этап** – зарождение технологии (высокая публикационная активность);
- II этап** – расцвет технологии (рост патентования и объема рыночной аналитики);
- III этап** – зрелость технологии (преобладание рыночной аналитики);
- IV этап** – плато (снижение числа публикаций и патентов, отсутствие изменений или небольшой спад в рыночной аналитике).

и в России характеризуются традиционные спутниковые технологии, которые постепенно заменяются более передовыми. Остальные группы технологий, связанные с телекоммуникациями, начинают выходить на рынок по мере успешного завершения пилотных проектов. Темпы их освоения во многом зависят от готовности индустрии к их полномасштабному развертыванию, а также осуществлению вложений в сопутствующую научно-производственную инфраструктуру. Все технологии производства КА нового поколения находятся на этапе подъема. Совершенствуются имеющиеся образцы космических аппаратов, разрабатываются новые типы КА, для производства различных компонентов космических аппаратов внедряются аддитивные технологии. Модернизация различных систем КА (навигации, управления и др.) осуществляется, в том числе,

благодаря внедрению искусственного интеллекта. Развитие технологий данной группы подталкивает рост сегмента услуг по эксплуатации и обслуживанию КА. В эту деятельность вовлекается все большее число поставщиков, в том числе стартапы.

Интенсивность исследований и разработок по различным группам технологий ПКС значительно варьирует. В мире и в нашей стране передовые технологии производства КА нового поколения существенно превосходят остальные группы по числу научных публикаций и патентных заявок (рис. 5). Вклад российских исследователей в общемировую корпус научных публикаций по каждой из групп технологий в среднем по годам сопоставим с долей российских публикаций по направлению перспективных космических систем в целом.

Рис. 5. Основные показатели публикационной и патентной активности по группам технологий



Источник: ИСИЭЗ НИУ ВШЭ.

По всем технологиям ПКС динамика патентной активности в мире существенно выше публикационной. Наиболее быстро нарастает объем патентных заявок в области перспективных телекоммуникационных спутниковых систем (более чем в 5 раз в 2019 г. к уровню 2010 г.). В силу сравнительной новизны масштабы научных исследований и патентования в области технологий геоинформационных спутниковых

систем пока не так значительны в сравнении с остальными группами технологий.

Многие проекты по разработке технологий ПКС реализуются на основе всесторонней кооперации в рамках модели, предполагающей реализацию государственных программ и участие бизнеса в коммерциализации и продвижении решений на рынок в интересах широкого круга потребителей.

Продукты и рынки

Основные группы технологий ПКС обеспечивают создание целого ряда продуктов и услуг (табл. 1). Большинство связанных с ними рынков только зарождаются, в дальнейшем они продолжают активно расти в условиях

цифровой трансформации бизнеса, увеличения спроса на различные типы данных, в том числе полученные с помощью спутниковых систем, и сервисов на их основе.

Табл. 1. Уровень развития ПКС в мире

№ п/п	Наименование технологии	Область применения	Компании на мировом рынке	Уровень развития в мире		
				2020	2024	2030
1. Технологии создания перспективных телекоммуникационных спутниковых систем						
1.1	Технологии создания космических комплексов фиксированной спутниковой связи и телевидения с КА высокой энергоэффективности на геостационарной орбите	<ul style="list-style-type: none"> Связь и телекоммуникации Ракетно-космическая промышленность 	<p>Производители КА: Airbus Defence and Space, Thales Alenia Space, Boeing, Northrop Grumman, SSL, Israel Aerospace Industries (IAI), China Great Wall Industry Corporation (CGWIC), Mitsubishi Electric</p> <p>Операторы КА: SES, Intelsat, Eutelsat, Telesat, Sky Perfect JSAT</p>			
1.2	Технологии создания космических систем с КА на высокоэллиптических орбитах	<ul style="list-style-type: none"> Связь и телекоммуникации Ракетно-космическая промышленность 	Northrop Grumman, Lockheed Martin, NEC			
1.3	Технологии создания многоспутниковой системы Интернета вещей на базе МКА, унифицированной малогабаритной аппаратуры связи и абонентской аппаратуры	<ul style="list-style-type: none"> Связь и телекоммуникации Ракетно-космическая промышленность 	<p>Существующие игроки: Orbcomm, Iridium, Inmarsat, Globalstar</p> <p>Новые игроки: Astrocast, Kepler, Fleet Space, Swarm Technologies</p>			
1.4	Технологии создания космической системы коллективного высокоскоростного широкополосного доступа в интернет с использованием КА на круговых средневысотных орбитах	<ul style="list-style-type: none"> Связь и телекоммуникации Ракетно-космическая промышленность 	<p>Существующие игроки: O3b (SES) – охватывает только экваториальный пояс, O3b (m-power)</p>			

(окончание)

№ п/п	Наименование технологии	Область применения	Компании на мировом рынке	Уровень развития в мире		
				2020	2024	2030
2. Технологии создания перспективных геоинформационных спутниковых систем						
2.1	Технологии создания высокодетального космического комплекса ДЗЗ	<ul style="list-style-type: none"> • Строительство • Сельское хозяйство • Нефтедобыча • Микроэлектроника • Природопользование • Ракетно-космическая промышленность 	Airbus, Maxar			
2.2	Технологии разработки прототипов малого и сверхмалого КА ДЗЗ оптико-электронного наблюдения, целевой аппаратуры, технологий изготовления ее составных частей	<ul style="list-style-type: none"> • Строительство • Сельское хозяйство • Нефтедобыча • Природопользование • Ракетно-космическая промышленность 	BlackSky, Planet, Satellogic			
2.3	Технологии разработки прототипов малого и сверхмалого КА ДЗЗ радиолокационного наблюдения, целевой аппаратуры, технологий изготовления ее составных частей	<ul style="list-style-type: none"> • Строительство • Сельское хозяйство • Нефтедобыча • Микроэлектроника • Ракетно-космическая промышленность 	Capella, Iceye			
3. Передовые технологии производства космических аппаратов нового поколения						
3.1	Технологии создания сборочного производства серийных КА	<ul style="list-style-type: none"> • Операторы спутниковых сервисов • Ракетно-космическая промышленность 	SpaceX, OneWeb Satellites (совместное предприятие OneWeb и Airbus Defence and Space)			
3.2	Технологии разработки малогабаритной бортовой аппаратуры межспутниковых лазерных линий связи	<ul style="list-style-type: none"> • Операторы спутниковых сервисов • Ракетно-космическая промышленность 	Системы: EDRS, Starlink, LeoSat, Telesat			
3.3	Технологии разработки космических платформ КА нового поколения в обеспечение создания многоспутниковых орбитальных группировок на базе малых КА	<ul style="list-style-type: none"> • Операторы спутниковых сервисов • Ракетно-космическая промышленность 	Производители КА ШПД: Thales Alenia Space, Airbus Defence and Space, SpaceX, OneWeb Satellites Производители КА IoT/M2M: SpaceQuest, Clyde Space, Tyvak, GomSpace, Swarm Technologies			

Уровень развития в мире: низкий средний высокий

Источник: Госкорпорация «Роскосмос».

Развитие каждой группы технологий определяет целый ряд тенденций, обусловленных, в том числе, задачами и техническими особенностями их применения.

1. Технологии создания перспективных телекоммуникационных спутниковых систем

Телекоммуникационные спутниковые системы обеспечивают фиксированную и подвижную связь, телевидение, широкополосный доступ в интернет. На мировом рынке представлены космические аппараты связи, наземные комплексы управления, модули полезной нагрузки связи, устройства гибкой цифровой полезной нагрузки, активные фазированные антенные решетки (АФАР), малые наземные станции спутниковой связи (VSAT), абонентские терминалы связи.

В сегменте спутникового телевидения с 2015 г. преобладает негативная динамика, связанная с изменением потребительских предпочтений – запросом на предоставление контента по требованию. Вместе с тем растет спрос на высокопроизводительные HTS и VHTS спутники связи с гибкими полезными нагрузками.

На фоне развития сетей связи нового поколения крупнейшие игроки рынка инвестируют в новую технику и оборудование. В США операторы геостационарных спутников связи проводят модернизацию орбитальных группировок. В 2020 г. компании Intelsat и SES заказали десять космических аппаратов у Maxar, Northrop Grumman и Boeing для замены своих спутников в рамках государственной программы США по освобождению С-диапазона для операторов мобильной сети 5G.

Участники отрасли изучают возможности использования спутников на высокоэллиптической орбите, обладающих рядом преимуществ (широкий охват территорий, более низкая стоимость и др.). Пока реализуется лишь небольшое число перспективных проектов. В Арктическом регионе ожидается наибольший рост спроса на негеостационарные HTS-спутники.

Особое внимание уделяется покрытию спутниковой связью арктических территорий.

В 2019 г. Northrop Grumman в рамках проекта Арктической спутниковой широкополосной миссии (Arctic Satellite Broadband Mission, ASBM) заключила контракт на разработку двухспутниковой системы для обеспечения широкополосной связи в широтах, выходящих за пределы зон обслуживания геостационарных спутников. Каждый КА будет оснащен полезной нагрузкой для сетей Inmarsat, Министерства обороны Норвегии и BBC США.

Один из перспективных сегментов рынка телекоммуникационных систем – спутниковый Интернет вещей, число абонентов которого в 2020 г. превысило 3,4 млн, а к 2025 г. может увеличиться до более 15 млн.¹ Востребованность данного направления обусловлена, в том числе, ограниченностью покрытия территорий системами наземной связи (в настоящее время они охватывают только 10% поверхности Земли). Мировым лидером по числу абонентов спутникового Интернета вещей на базе малых космических аппаратов является Orbcomm – первая коммерческая компания, созданная исключительно для IoT/M2M космической связи. Параллельно реализуются несколько проектов спутникового IoT/M2M на базе наноспутников массой до 10 кг. Компании Astrocast, Kepler, Fleet Space, Swarm начали выводить свои космические аппараты на орбиту для тестирования решений и предоставления соответствующих услуг. Полномасштабное развертывание систем планируется завершить до 2024 г.

В сегменте коллективного высокоскоростного широкополосного доступа в интернет с использованием КА на мировом рынке работают несколько компаний. На средних орбитах эксплуатируется только одна система – O3b (компания SES), которая охватывает экваториальный пояс. Наряду с этим в 2022 г. планируется запуск группировки нового поколения O3b (m-power) на основе среднеорбитальных спутников. На низких орбитах функционируют системы OneWeb первого и второго поколения, а также StarLink компании SpaceX. Перспективная российская группировка «Скиф» имеет преимущество перед орбитальной группировкой StarLink благодаря использованию определен-

¹ По данным Berg Insight. Подробнее см.: <https://media.berginsight.com/2021/10/08215038/bi-satelliteiot-ps.pdf>

ных диапазонов частот. Китай планирует создать свою систему, однако сроки готовности пока не определены. Вместе с тем пока никто не обеспечивает глобальное покрытие.

2. Технологии создания перспективных геоинформационных спутниковых систем

Рынок геоинформационных спутниковых систем охватывает устройства и оборудование для обработки данных. К ним относятся модули радиолокационной полезной нагрузки, унифицированные платформы малых космических аппаратов (МКА), космические аппараты всепогодного высокопериодического мониторинга, наземные комплексы приема, обработки и распространения информации. Такие системы обрабатывают различные типы данных ДЗЗ, включая высокодетальные, данные среднего разрешения, обзорной съемки, радиолокационные данные.

Ведущие зарубежные компании и консорциумы выводят многочисленные орбитальные группировки ДЗЗ, состоящие из малых и сверхмалых КА, на низкие орбиты. На отечественном рынке это направление только начинает набирать обороты, лишь недавно совершены первые единичные запуски.

Развитие этой группы технологий связано, в первую очередь, с совершенствованием технических характеристик решений. Системы высокодетального ДЗЗ (сверхвысокого разрешения) от ведущих производителей повышают разрешение до 0,3 м и используют различные орбиты и спутники-ретрансляторы, позволяя снизить количество КА в орбитальной группировке при сохранении периодичности и повышении качества съемки.

Ведущие операторы малых и сверхмалых оптико-электронных КА повышают качество работы систем путем добавления спектральных каналов (до 8) и сокращения периодичности съемки (от 1–2 часов до 5–15 минут в сутки). При этом разрешение остается на прежнем уровне – 1–3 м.

Ключевые операторы малых и сверхмалых радиолокационных КА улучшают характеристики оборудования за счет повышения разрешения съемки (0,25–0,5 м) и увеличения орбитальной группировки до 6–14 КА, что позволяет довести периодичность съемки до одного часа в сутки.

3. Передовые технологии производства КА нового поколения

Передовые технологии производства КА включают решения для различных систем: двигательных установок (в том числе абляционные и плазменные двигатели), бортовой аппаратуры полезной нагрузки, служебных систем, ориентации (магнитометры, гироскопы) и связи (оборудование для межспутниковой связи, лазерные терминалы передачи данных). Кроме того, важную роль играют решения для энергообеспечения (солнечные, аккумуляторные батареи). Отдельную перспективную группу образуют малые космические аппараты различного назначения.

Преобладающая тенденция в данной области – развитие серийного производства небольших КА. Усилия основных участников рынка направлены на снижение веса КА, их стоимости и ускорение циклов изготовления. В июле 2019 г. во Флориде запущено серийное производство КА системы OneWeb на площади 10 тыс. кв. м. В 2020 г. компания производила в день в среднем 1,5 КА массой 147,7 кг, а к концу года достигла целевых показателей по производству двух КА в день при стоимости производства одного аппарата 0,5–1 млн долл. Компания SpaceX в этот же период ежедневно выпускала по шесть КА массой порядка 260 кг.

К числу перспективных относятся технологии лазерных линий связи, обладающие рядом преимуществ (уменьшение веса и габаритов оборудования с одновременным улучшением технических характеристик). Некоторые ведущие операторы систем спутникового ШПД планируют использовать межспутниковые лазерные линии связи. Часть космических аппаратов Starlink уже оборудуются такими системами для тестирования и принятия решения об оснащении данной технологией КА Starlink второго поколения. В системах LeoSat и Telesat рассматривается возможность использования межспутниковых линий связи.

К инициативам национального уровня относится Европейская система ретрансляции данных (European Data Relay System, EDRS) на базе проекта SpaceDataHighway. Она ориентирована на лазерную передачу данных для КА ДЗЗ Sentinel и в перспективе для КА ДЗЗ Pleiades

Neo. Благодаря передовым лазерным технологиям система позволяет безопасно передавать данные со скоростью до 1,8 Гбит/с в режиме, приближенном к реальному времени.

Для развертывания многоспутниковых систем разрабатываются стандартизированные платформы КА, что позволяет сократить затраты на их создание, увеличить надежность

КА, сократить время производства и гарантировать сроки изготовления. Компании – лидеры по производству КА используют унифицированные платформы, которые подходят для МКА различного назначения. В части перспективных спутниковых систем IoT/M2M популярны платформы малых космических аппаратов стандарта CubeSat массой до 10 кг.

Государственная поддержка

В мировой практике разработка и внедрение перспективных космических систем поддерживаются в рамках государственных программ развития орбитальных группировок и новых технологий спутникостроения. В США, Китае, ЕС, Японии реализуются масштабные инициативы, направленные на создание передовых космических технологий.

Программой исследований и инноваций Европейского союза «Горизонт Европы» (Horizon Europe) предусмотрено свыше 15 млрд евро в 2021–2027 гг. на поддержку развития кластера цифровых технологий, промышленности и космической индустрии². Главная цель – достижение автономности ЕС при разработке, развертывании и использовании космической инфраструктуры для предоставления соответствующих услуг на основе данных космической съемки³. Важным механизмом ее реализации станет формирование европейского партнерства, которое обеспечит создание глобально конкурентоспособных космических систем. К 2030 г. ЕС планирует занять 50% мирового рынка телекоммуникационных спутников, достичь лидерских позиций в области систем наблюдения за Землей, снизить стоимость пусковых услуг на 50%, а также удвоить количество услуг, связанных с космическими перевозками.

Для развития космического предпринимательства в ЕС, включая вовлечение стартапов, малых и средних частных предприятий, действует отдельная программа⁴, которая предусматривает проведение хакатонов и соревнований, реализацию программ наставничества и бизнес-акселерации. Финансовая поддержка осуществляется посредством специального фонда для стимулирования венчурных инвестиций в частный космический бизнес. Кроме того, созданы условия для демонстрации и тестиро-

вания предлагаемых решений в реальных условиях.

Аналогичную инициативу запустило Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA). Программа Space Innovation through Partnership and Co-Creation (J-SPARC) направлена на содействие созданию предприятий в сфере космической деятельности путем формирования партнерских отношений с частным бизнесом⁵. В рамках программы реализуются различные проекты по развитию технологий оптических спутников, использования и передачи данных, робототехники, решений для удаления космического мусора и др.

Развитие ПКС в России осуществляется в рамках реализации федерального проекта «Комплексное развитие космических информационных технологий на 2022–2030 годы» государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России». Мероприятия по разработке перспективных космических систем также предусмотрены Программой инновационного развития Госкорпорации «Роскосмос» на период 2019–2025 гг.

Предполагается, что полномасштабная реализация намеченных планов позволит обеспечить полный охват территории России, включая Арктическую зону и Северный морской путь, услугами спутниковой связи, цифрового вещания и высокоскоростного доступа в интернет. Федеральный проект призван сформировать основу для предоставления услуг спутникового Интернета вещей на всей территории нашей страны. Сервисами ДЗЗ смогут воспользоваться заинтересованные организации различных секторов экономики и социальной сферы. Для развертывания многоспутниковых группировок будет создан наземный комплекс приема, обработки, хранения и распространения космической информации.

² <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1f107d76-acbe-11eb-9767-01aa75ed71a1>

³ https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe/european-partnerships-horizon-europe/candidates-digital-industry-and-space_en

⁴ https://ec.europa.eu/defence-industry-space/eu-space-policy/space-research-and-innovation/cassini_en

⁵ https://global.jaxa.jp/press/2020/07/20200707-1_e.html

Перспективы развития

Перспективные космические системы – прорывное направление, которое в долгосрочном периоде будет обеспечивать стратегическую конкурентоспособность государств, обладающих заделами в данной области. Внедрение технологий ПКС открывает значительные возможности для роста добавленной стоимости в таких секторах, как сельское и лесное хозяйство, добыча полезных ископаемых, строительство, транспорт и логистика, информация и связь, образование, государственное управление.

В рамках федерального проекта предусмотрены ориентиры развития для каждой из групп технологий ПКС. Достижение этих ориентиров позволит перейти на качественно новый этап развития перспективных космических систем.

1. Технологии создания перспективных телекоммуникационных спутниковых систем

В рамках задач по разработке космических комплексов с КА на геостационарной орбите к 2030 г. планируется обеспечить широкополосный доступ в интернет на всей территории России, включая малонаселенные пункты (с численностью населения до 250 человек), и телевизионное вещание высокой четкости – непосредственное и распределительное – в форматах HD, 4K, 8K. Благодаря росту доступности спутниковых магистральных каналов связи увеличится обеспеченность ШПД, улучшится качество информационно-телекоммуникационной инфраструктуры воздушных, морских и сухопутных транспортных маршрутов. Спутниковой связью и вещанием будет охвачена часть территории Арктической зоны Российской Федерации.

Развитие систем спутниковой связи «Экспресс» и «Ямал» направлено на формирование устойчивой телекоммуникационной среды для решения задач цифровой трансформации отраслей экономики и социальной сферы, расши-

рение пропускной способности национальной системы спутниковой связи. Это будет достигнуто за счет увеличения зоны доступности, повышения качества, внедрения новых услуг спутниковой связи и вещания.

Система «Экспресс-РВ» призвана обеспечить связь и вещание в отдаленных и труднодоступных регионах страны, а также надежную высокоскоростную связь и интернет-радио на территории всей Арктической зоны, включая Северный морской путь. В коммерческом сегменте основным станет сравнительно новый рынок спутниковой связи и вещания на подвижных объектах коллективного (самолеты, морские суда, поезда дальнего следования, междугородные автобусы) и индивидуального (легковые и грузовые автомобили) пользования.

На базе малых космических аппаратов «Марафон IoT» будет создана многоспутниковая система для предоставления услуг Интернета вещей, которая обеспечит комплекс навигационных услуг для всех категорий потребителей сервисов спутникового Интернета вещей. Станет возможным широкомасштабное внедрение беспилотных и роботизированных систем на транспорте, в агропромышленном комплексе и других отраслях экономики.

Благодаря космической системе коллективного высокоскоростного широкополосного доступа в интернет «Скиф» возможность подключения к интернету получают стационарные и подвижные объекты на всей территории России и в глобальном масштабе. Система позволит проводить оперативное резервирование магистральных и внутризональных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и подключение мобильной связи форматов LTE и 5G в удаленных и труднодоступных районах. В результате будет организован высокоскоростной доступ в интернет на воздушном, морском, речном и наземном транспорте, а также реализация целого ряда смежных технологических задач (IoT/M2M и др.).

2. Технологии создания перспективных геоинформационных спутниковых систем

В настоящее время на российском рынке доминируют сервисы, основанные на данных с зарубежных систем ДЗЗ. Создание системы дистанционного зондирования Земли «Смотр» направлено на устранение зависимости от зарубежных поставщиков космических снимков. Система позволит обеспечить повышение эффективности решения большого числа задач за счет широкого внедрения технологий ДЗЗ в различных отраслях экономики и государственном управлении, среди которых:

- природопользование: уменьшение ущерба благодаря своевременному выявлению незаконных случаев использования природных ресурсов;
- лесное и сельское хозяйство: повышение эффективности деятельности; предотвращение эрозии почв и др.;
- добывающая промышленность: снижение затрат на разведку и разработку месторождений, добычу и транспортировку полезных ископаемых и др.; повышение эффективности мониторинга и эксплуатации объектов энергетической инфраструктуры, сокращение связанных с этим капитальных и эксплуатационных затрат и др.;
- строительство: снижение стоимости проектирования и строительства объектов за счет получения более полной и оперативной информации, контроля объемов работ, затрат на эксплуатацию объектов; уменьшение экологического ущерба и др.;
- аварийно-спасательные службы: снижение потерь от аварий и катастроф за счет своевременного обнаружения и профилактических мероприятий.

Еще одно направление – создание орбитальной группировки малых космических аппаратов («Сфера-МКА») высокодетальной съемки земной поверхности и радиопросвечивания атмосферы и космических систем (КС) на их основе, а также сверхмалых КА («Сфера-СМКА»). Это позволит сформировать взаимоувязанную космическую информационную инфраструктуру спутниковых систем ДЗЗ.

Решения для радиолокационного наблюдения Земли из космоса позволят повысить оперативность и полноту информационного обеспечения потенциальных потребителей благодаря данным ДЗЗ. Использование этих данных в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте и в органах управления позволит значительно увеличить эффективность и результативность многих видов экономической деятельности.

3. Передовые технологии производства КА нового поколения

Создание сборочного производства космических аппаратов (СПКА) – одно из ключевых мероприятий высокотехнологичного направления по формированию полного технологического цикла сборки и испытаний космической техники в пределах одной компактной производственной площадки, позволяющее создавать современные спутники различного назначения на уровне стандартов ведущих мировых производителей космической техники. СПКА обеспечит потребность российских операторов в надежных отечественных космических аппаратах связи и дистанционного зондирования Земли.

Запуск СПКА позволит сократить сроки и стоимость производства, гарантировать высокое качество выпускаемой техники, длительный срок активного функционирования космических аппаратов на орбите, возможность проведения сборки и испытаний КА на одной площадке.

В соответствии с мировым трендом на повышение пропускной способности глобальных сетей спутниковой связи будут проведены исследования в области межспутниковых лазерных линий связи. По их результатам будет разработан экспериментальный образец составных частей маломассогабаритной бортовой аппаратуры для обеспечения лазерной связи между низкоорбитальными КА.

Также планируется создание космических платформ КА нового поколения для многоспутниковых орбитальных группировок на базе малых КА, а также цифровых двойников автоматических КА для проектирования и управления их жизненным циклом. Это позволит разработать унифицированные служебные системы космических платформ нового поколения различной

размерности и целевого назначения, образцы перспективной целевой аппаратуры для перспективных КА.

В ближайшие годы доступ к информации, получаемой с помощью спутниковых технологий, станет не просто вопросом качества жизни людей, конкурентоспособности компаний или продуктов, но и критически важным условием функционирования инфраструктуры, транспортной системы, производств, систем управления, связи и безопасности любого развитого государства.

Развитие перспективных космических систем позволит повысить темпы разработки и внедрения телекоммуникационных и геоин-

формационных систем, соответствующих задачам опережающего роста потребностей экономики в космических инфокоммуникационных технологиях. Современные сервисы, включая высокотехнологичные спутниковые услуги – фиксированную и подвижную связь, ШПД и Интернет вещей, ДЗЗ и др., станут доступны широкому кругу предприятий. Это повысит конкурентоспособность продукции и эффективность производственной деятельности в национальном масштабе. Успешная реализация планируемых проектов и мероприятий приведет к росту числа высокотехнологичных отечественных производств и позволит России конкурировать на мировом рынке спутниковых услуг.

Заключение

Будущее экономики и социальной сферы трудно представить в отрыве от технологических достижений, новых форм сетевого взаимодействия, платформенных бизнес-моделей и других результатов развития высокотехнологичных направлений. Большинство экспертов сходятся в самых положительных оценках ожидаемых эффектов внедрения прорывных технологий в широком спектре областей, представленных на страницах Белой книги.

Нарастающие тренды цифровой трансформации формируют благоприятную социально-экономическую конъюнктуру по таким направлениям, как искусственный интеллект, мобильные сети связи пятого поколения, Интернет вещей, новые производственные технологии, новые коммуникационные интернет-технологии, технологии распределенных реестров. Наметившийся здесь в последние годы взрывной рост рынков будет продолжаться и в дальнейшей перспективе. Несмотря на конкуренцию со стороны иностранных технологических компаний, необходимо в полной мере использовать сложившиеся возможности, обеспечив разработку и вывод на российский и зарубежные рынки востребованной продукции и услуг.

Один из приоритетов мировой экономической повестки – энергетический переход. Глобальной целью, предусмотренной Парижским соглашением по климату, является достижение к 2050 г. углеродной нейтральности, то есть снижение до нуля выбросов CO₂ в атмосферу. В этой связи возрастает значимость технологий передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем, водородной энергетики и декарбонизации промышленности и транспорта на основе природного газа, систем накопления электроэнергии.

В то же время некоторые перспективные рынки находятся еще только на начальной стадии развития, однако уже сегодня очевиден большой потенциал, а зачастую и подрывной (disruptive) характер создаваемых инновационных решений. Так, сегодня мир стоит на пороге новой технологической революции, в основе

которой – квантовые технологии. На горизонте 2025–2030 гг., в эпоху массового внедрения квантовых компьютеров, «внеквантовое» технологическое лидерство станет невозможным. Российские компании должны стать полноценными участниками глобальной «квантовой гонки».

Следует отметить и некоторые риски развития высокотехнологичных направлений. Один из наиболее значимых из них – сильная зависимость от импорта комплектующих и оборудования, в том числе необходимых для проведения исследований и разработок. Санкции и другие ограничения негативно влияют на производство и экспорт высокотехнологичной продукции. В связи с этим обеспечивается опережающее развитие нового поколения отечественной микроэлектроники и создание производства российской электронной компонентной базы. Другой существенный риск – нехватка квалифицированных специалистов, в том числе необходимых для работы с инновационными решениями.

В мировой практике пионерами в формировании новых технологических рынков выступают крупнейшие компании – Apple, Microsoft, Google, Amazon, Tesla, Meta, NVIDIA, Tencent, Samsung, Alibaba, SpaceX и др. Именно они создают межотраслевые платформы взаимодействия участников глобального рынка. Сочетание кадрового, управленческого и инвестиционного потенциала технологических гигантов позволяет «просеивать» громадный поток проектов и организовать масштабирование наиболее перспективных из них на международных рынках.

В нашей стране лидерами развития высокотехнологичных направлений также выступают крупнейшие компании (ПАО «Сбербанк», АО «УК РФПИ», ПАО «Ростелеком», Госкорпорация «Ростех», Госкорпорация «Росатом», Госкорпорация «Роскосмос», ПАО «Россети», ПАО «НК «Роснефть», ОАО «РЖД», ПАО «Газпром»), в совокупности обеспечивающие существенный вклад в экономику. Одна из ключевых задач, стоящих перед компаниями-лидерами, – формиро-

вание опережающего спроса на инновационную продукцию и услуги. Это позволяет консолидировать работу всех заинтересованных сторон и, в частности, определить долгосрочные ориентиры для исследовательской повестки профильных университетов и научных организаций, вовлечь в цепочки создания стоимости малый и средний бизнес.

Анализ интенсивности исследований и разработок (публикационная активность), коммерциализации их результатов (патентная активность) и развития рынков в рамках высокотехнологичных направлений свидетельствует о стремительном нарастании, а в отдельных случаях – кратном увеличении показателей результативности научной и инновационной деятельности, объемов инвестиций и других ключевых индикаторов развития данных направлений. При этом среди ведущих стран зачастую затруднительно определить одного явного лидера. Безусловно передовыми по большинству параметров являются США и Китай с большим отрывом от остальных стран. Так, на долю Китая приходится более 50% патентных заявок (технологии новых материалов и веществ – 76,3%, технологии создания систем накопления электроэнергии, включая портативные, – 75,1%, Интернет вещей – 74,4%), причем наблюдается значительное превышение потока патентных заявок над количеством научных публикаций – свидетельство динамичного развития прикладной науки и эффективного использования результатов фундаментальных исследований.

Россия занимает места с 7–8 (перспективные космические системы, квантовые коммуникации) до 19 (мобильные сети связи пятого поколения, Интернет вещей) по публикационной активности исследователей; с 4–6 (перспективные космические системы, технологии новых материалов и веществ, технологии передачи электроэнергии и распределенных интеллектуальных энергосистем, технологии создания систем накопления электроэнергии, включая портативные) и до границы второго и третьего десятков (мобильные сети связи пятого поколения – 18, технологии распределенных реестров – 21) по патентной активности. По многим направлениям в нашей стране позитивная ди-

намика значительно опережает среднемировую. В то же время, если в Китае на одну научную публикацию в среднем приходится две патентные заявки, то в России соотношение составляет всего около 0,2. Другая сторона дисбаланса – крайне малое в сравнении с ведущими странами количество стартапов и практически полное отсутствие «единорогов» – частных высокотехнологических компаний, рыночная стоимость которых превышает 1 млрд долл. В таких условиях многие идеи и разработки российских университетов и научных организаций, в том числе финансируемые из бюджета, перетекают за рубеж и возвращаются к нам в виде продуктов и услуг с огромной «наценкой».

С учетом обозначенных факторов в ближайшей перспективе будет решен комплекс взаимосвязанных задач:

- развитие экосистемы, охватывающей ведущие технологические компании, стартапы, университеты, исследовательские институты, центры компетенций. Это позволит всем заинтересованным организациям принять участие в проведении исследований и разработок, создании производства инновационной продукции и услуг, в том числе за счет имеющихся инструментов государственной поддержки, включая институты развития. Компании-лидеры станут «центрами притяжения», вокруг которых сформируются цепочки научно-производственной кооперации;
- обеспечение благоприятных условий для безбарьерной разработки и форсированного внедрения новых технологий. Ускорить процессы тестирования и коммерциализации высокотехнологичных решений в отраслях экономики и социальной сферы позволят формируемые экспериментальные правовые режимы (регуляторные песочницы) и другие механизмы регулирования;
- формирование эффективной системы подготовки кадров для исследований и разработок и производства, поддержки спроса на высокотехнологичные решения. Будет обеспечена не только актуализация действующих и внедрение новых образовательных программ, отвечающих

перспективным тенденциям научно-технологического развития и запросам на кадры со стороны отечественного высокотехнологического бизнеса, но и поддержка совместных исследовательских программ с участием компаний, научных и образовательных организаций;

- создание комплекса технологических решений для реализации «проектов-маяков» («Беспилотные логистические коридоры», «Автономное судовождение», «Беспилотная аэродоставка грузов», «Персональные медицинские помощники», «Электроавтомобиль и водородный автомобиль») и других инициатив социально-экономического развития России до 2030 г.¹

Достижение глобального паритета и превосходства в технологической сфере – дорога с двусторонним движением. Сегодняшние реалии таковы, что продвижение российских

компаний на зарубежные рынки невозможно без активной и скоординированной поддержки государства. Должна быть создана атмосфера доверия и партнерства между всеми стейкхолдерами исходя из прагматичного признания общеизвестного факта: в современном мире даже самые сильные игроки основывают свою деятельность на бизнес-моделях открытых инноваций, формируют консорциумы и экосистемы, что позволяет многократно увеличить стоимость капитала. Это давно уже не экзотика, а безальтернативный путь развития инновационной экономики. Очевидно и другое: какие бы меры ни предпринимало государство, только компании-лидеры и предпринимательское сообщество вместе способны обеспечить успешное развитие высокотехнологичных направлений. В конечном счете от эффективности таких усилий зависит их долгосрочная конкурентоспособность в быстроменяющейся рыночной среде.

¹ Утверждены распоряжением Правительства Российской Федерации от 6 октября 2021 г. №2816-р.

Развитие отдельных высокотехнологичных направлений

Белая книга

Редакторы М. Ю. Соколова, Л. Д. Эйделькинд

Арт-директор О. В. Васильев

Дизайн И. В. Цыганков

Компьютерный макет А. Н. Корзун, Т. Ю. Кольцова, В. В. Пучков

Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
101000, Москва, Мясницкая ул., 20

Отпечатано в ООО «Типография ИРМ-1»
140000, Московская область, г. Люберцы, Инициативная ул., 38
Тел.: +7 (495) 740-00-77