

**РАЗВИТИЕ КВАНТОВЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ: ОСНОВНЫЕ  
НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛОЖЕНИЯ  
НАУЧНЫХ УСИЛИЙ**



2017



**Развитие квантовых технологий:  
основные направления приложения  
научных усилий**

Развитие квантовых технологий: основные направления приложения научных усилий/Под редакцией М.С. Липецкой. - СПб.: Фонд «Центр стратегических разработок «Северо-Запад», 2017 – 23 с.

Издание является промежуточным результатом форсайт-сессии Российского квантового центра и Фонда «Центр стратегических разработок «Северо-Запад».

В.Н. Княгинин – Методический редактор  
М.С. Липецкая – Руководитель рабочей группы

Рабочая группа: Т.Н. Трубникова, А.П. Сологуб, К.В. Сухарев, В.А. Адартасов,  
Е.А. Римских

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	.....6
Квантовые вычисления	.....7
Квантовые сенсоры	.....11
Квантовые коммуникации	.....13
Заключение	.....18
Список источников и литературы	.....19

## ВВЕДЕНИЕ

Перспективы развития квантовых технологий находятся на переходном этапе. С одной стороны, это эффективные и во многом инновационные способы решения различных проблем, с другой, – существующие альтернативы не всегда уступают по качеству результата, но оказываются существенно дешевле.

В то же время в мире накапливаются сигналы, свидетельствующие о важности развития квантовых технологий. За последние три года инвесторы венчурного капитала потратили 147 млн долларов в стартапы в области квантовых вычислений. Правительства во всем мире инвестировали 2,2 млрд долларов в квантовые исследования. Так, в 2016 г. в Евросоюзе была создана специальная программа по развитию квантовых технологий с общим бюджетом 550 млн долларов.

Поэтому нужно сформировать четкое понимание того, является ли развитие квантовых технологий безальтернативным, сможет ли оно определить будущее человечества. Своевременно выявление перспективных направлений развития и коммерциализации квантовых технологий может предопределить траектории изменения целого ряда технологических отраслей: от ИКТ до ЖКХ. Особое внимание должно быть уделено применениям квантовых технологий, имеющим значения для безопасности государства.

В сфере квантовых технологий сейчас выделяется три крупных направления приложения усилий: квантовые вычисления, квантовые сенсоры и квантовые коммуникации.

## 1. КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

В области квантовых вычислений (КВ) основным вызовом остается вопрос о возможности их полноценной реализации. Реальных квантовых компьютеров, тем более «универсальных», сейчас не существует. Сегодняшние машины на основе квантовых эффектов не способны выполнять все те задачи, с которыми справляются классические компьютеры, но в то же время и не являются по-настоящему квантовыми [5].

КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ: КАРТА НАУКИ-2017

МАГИСТРАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ		ПРОРЫВ	
Адиабативные квантовые компьютеры	Сверхпроводящие кубиты	Квантовые вычисления на измерениях	Топологические материалы
Конкуренция элементарных баз		Элементарная база оптических квантовых вычислений	Истинно однофотонные источники
		Квантовая память	Использование декогеренции и неунитарной динамики
		Математические методы корректного анализа масштабных физических моделей квантовых компьютеров	
ЗРЕЛАЯ НАУКА		ФАНТАСТИКА	
Квантовые алгоритмы	Квантовые вычисления на основе ядерного магнитного резонанса	Решение алгоритмически-неразрешимых задач на квантовом компьютере	Биологические квантовые вычисления

Источник: ЦСР «Северо-Запад» по материалам форсайт-сессии

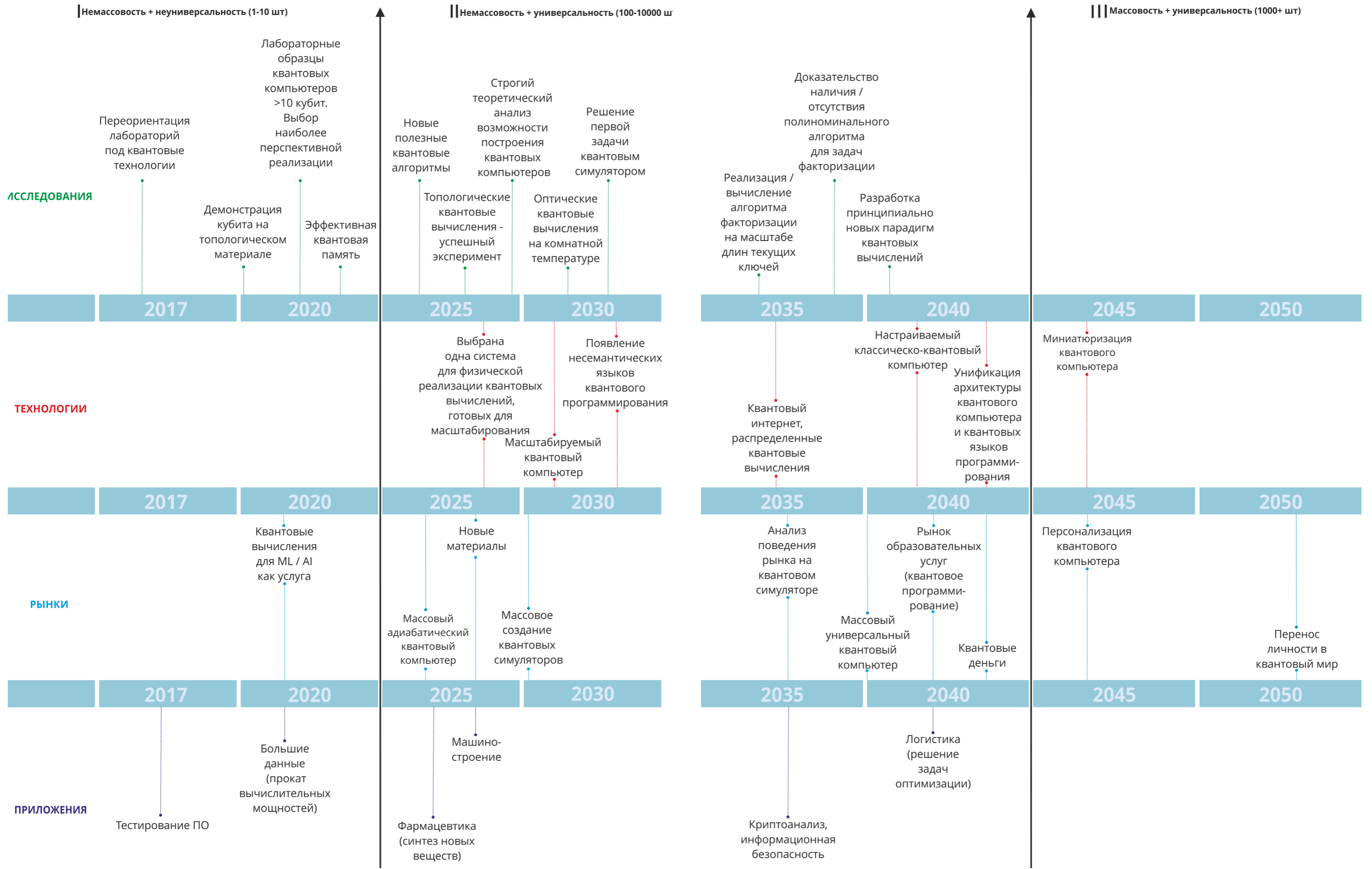
Для той формы квантовых компьютеров, которые существуют сейчас, должна быть выбрана наиболее перспективная форма реализации квантовых компьютеров. Сейчас у исследователей есть выбор как минимум из пяти архитектур, на которых может строиться квантовый компьютер:

1. Системы, основанные на одиночных фотонах;
2. Ультра-холодные атомы;
3. Сверхпроводящие цепи;
4. Спины в полупроводниках;
5. Захваченные ионы [5].

Можно назвать следующие основные направления приложений научных усилий в области квантовых вычислений:

1. Обработка больших данных, машинное обучение и искусственный интеллект. Квантовые нейронные сети, используемые для такого анализа, опираются на реализацию кубитов и их соединений способом, похожим на связи нейронов и дендритов в мозге человека. За счет этого квантовые компьютеры и нейронные сети могут применяться для обнаружения скрытых паттернов в больших наборах данных [4].

ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ



Источник: ЦСР «Северо-Запад» по материалам форсайт-сессии

2. Создание эффективной квантовой памяти, что является вызовом, так как квантовое состояние кубита легко нарушить. В последнее время была предложена оптическая техника, позволяющая принципиально решать данную проблему путем использования возможностей эффекта электромагнитно-индуцированной прозрачности) и демонстрации кубита на топологическом материале.

3. Разработки в области топологических квантовых вычислений позволят существенно уменьшить количество ошибок, а также сделать эти системы отказоустойчивыми [10].

4. Обеспечение проведения оптических квантовых вычислений при комнатной температуре сделает их более практичными для повседневного применения. Сейчас квантовые вычисления могут осуществляться при температурах не больше сотой доли Кельвина, что делает их чрезвычайно дорогостоящими.

5. Решение задач, в которых классический компьютер не применим. Такими задачами, как правило, являются варианты оптимизация систем, размеры которых заведомо превышают предел досягаемости обычных компьютеров: например, моделирование химических реакций и обучение квантовых нейросетей [6]. Поскольку квантовый компьютер может быть использован для моделирования взаимодействия электронов в сложной молекуле, он позволит строить все более сложные модели, которые будут отображать, как молекулы собираются и кристаллизуются. Можно имитировать и анализировать атомные взаимодействия с большой точностью, что в свою очередь приведет к созданию новых и более эффективных материалов [13]. Исследователи на ранних этапах смогут понять, будет ли молекула обладать желаемыми свойствами, например, будет ли она связываться с ферментом или белком или катализировать определенные реакции [14]. Это позволит в будущем найти и создать лучшие сверхпроводники и источники энергии, более мощные магниты, и т.д. [15]

6. Поиск способов масштабирования квантового компьютера. Какие есть препятствия для этого? Например, помехи могут стать фундаментальной проблемой [8]. Кроме того, ещё не найден простой способ управления сложными системами кубитов [9].

7. Работа с полиномиальным алгоритмом для решения задач факторизации, что может оказать революционное воздействие на кибербезопасность во всем мире. Факторизация простых чисел является задачей, в которой у квантовых компьютеров есть существенное преимущество перед обычными, что создает целый спектр производных задач в области криптографии и защиты данных. Так, например, на взлом PIN-кода к банковской карте у обычного компьютера уйдёт 10 миллиардов лет, а квантовый компьютер справится с этим примерно за три года [7].

8. Создание и оптимизация для дальнейшего использования квантовых денег. В настоящее время квантовые деньги моделируются только в лабораторных условиях. Их очевидным достоинством является высокая защищенность от несанкционированной подделки, но есть и недостатки. Главный из них

заключается в особой чувствительности. Код со временем может меняться под воздействием внешних факторов [18].

9. Миниатюризация и персонализация квантового компьютера. Хотя ученые предсказывают, что после 2040 г. мы будем, вероятно, жить в мире, в котором квантовый компьютер станет массовым и универсальным, сейчас единственной компанией, продающей коммерческие квантовые компьютеры (не являющиеся, впрочем, в полной мере квантовыми), является канадская D-Wave. Стоимость 2000-кубитного компьютера этой фирмы в 2017 г. составляла около 15 миллионов долларов [3], а размеры превышают 15 м<sup>3</sup>.

## 2. КВАНТОВЫЕ СЕНСОРЫ

Квантовые сенсоры (КС) могут иметь приложения в областях с большими рынками и общественным значением и, возможно, будут способствовать изменениям в регулировании и стандартизации. Однако их влияние критически зависит от практического превосходства новых квантовых сенсоров, измерителей и датчиков над альтернативными методами [4].

Вызовом для развития этого направления является высокая стоимость создания квантовых сенсоров.

Среди основных направлений научных исследований и разработок в области квантовых сенсоров можно назвать:

1. Использование дефектных алмазов как основы для сверхчувствительных квантовых сенсоров. Дефектными считаются алмазы, в которых есть пустоты, со временем заполняющиеся атомами азота. Азотные пустоты ведут себя как «супер-атомы», встроенные в решетку алмаза. Они обеспечивают полный контроль их взаимодействия с окружающими ядерными спинами, что позволяет создавать крупномасштабные запутанные состояния между электронами и ядрами. Такие состояния могут обеспечить высокоточные измерения электромагнитного поля на наномасштабе [5].

Одно из применений этой технологии – создание квантовых нейроинтерфейсов. Сверхчувствительные сенсоры магнитного поля для магнитокардиографии уже созданы, но на пути к серийному производству и переходу на уровень мозга предстоит еще много сделать: нужно, например, заставить сенсоры не «слышать» магнитное поле Земли, поля электрических и электронных приборов – весь тот магнитный шум, который нас постоянно окружает. Плазмонные датчики могут обеспечить необходимое для этого микронное пространственное разрешение, но за это надо будет платить снижением чувствительности [21].

2. Разработка многоспектральных сенсоров во всех диапазонах, например, для неразрушающего строительного контроля. На основе этих технологий могут быть разработаны квантовые гравитационные поля и датчики наклона. Они могут использоваться для построения 3D-карты плотности материала вокруг них, что окажет значительное влияние на строительный и нефтегазовый сектор, позволяя рабочим насквозь просматривать землю для выявления скрытых объектов, которые невозможно обнаружить с использованием альтернативных технологий [10].

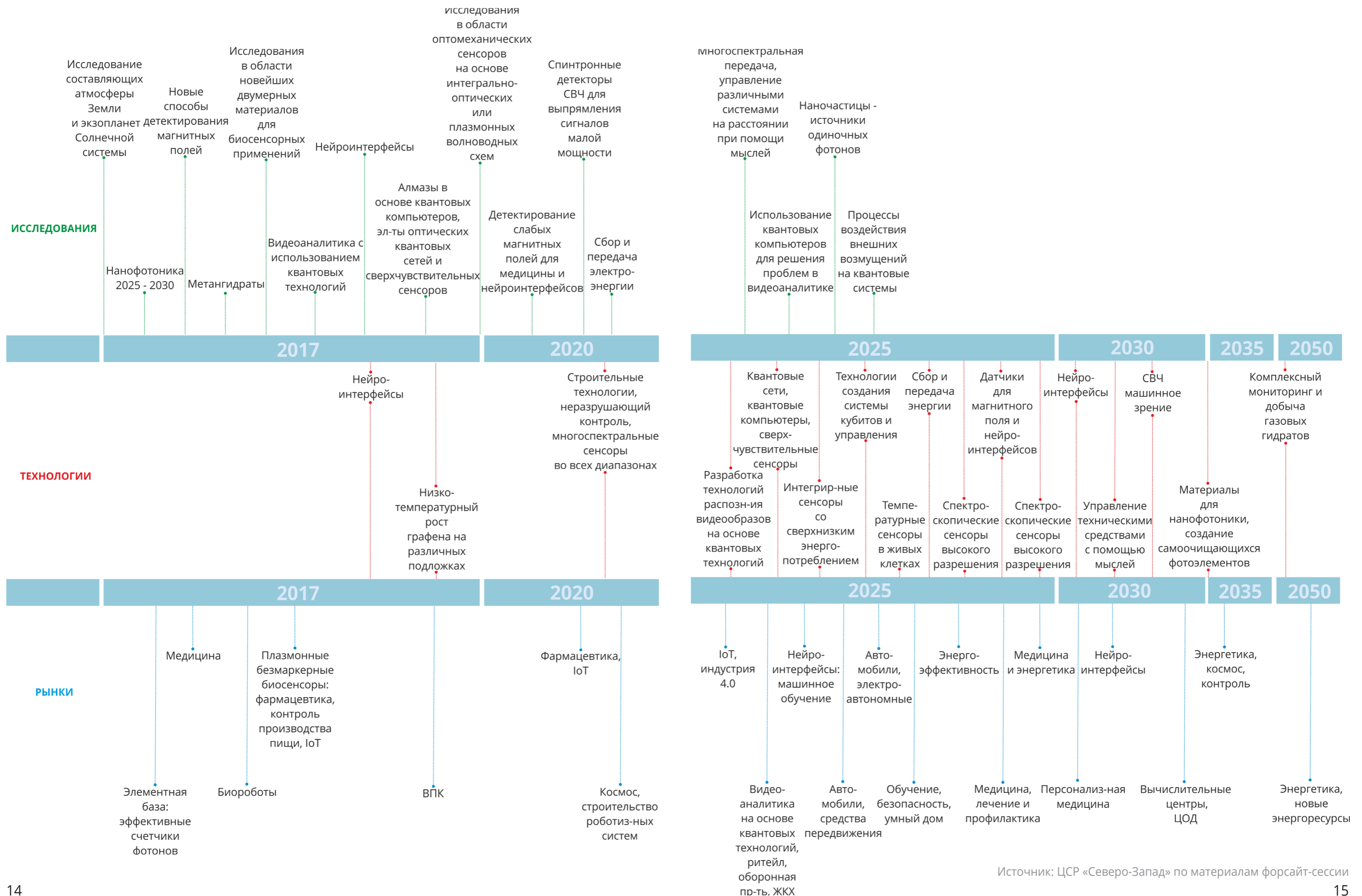
3. Полноценное распознавание видеообразов на основе квантовых технологий. Оно основано на сложных математических алгоритмах, которые преобразуют изображения в данные. Далее специальное ПО может определять, являются ли наблюдаемые события нормальными, или они должны быть помечены как требующие оповещения сотрудников службы безопасности или полиции или, например, содержат важные данные для бизнеса [7].

Квантовые сенсоры смогут найти применение в медицине, фармацевтике, интернете вещей, оборонной промышленности, в космосе и при создании роботов, ЖКХ, ритейле, системах «умного дома», электрических автономных автомобилях, а также различных вопросах безопасности.

МАГИСТРАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ		ПРОРЫВ	
Двумерные материалы	Наноплатоника и наноплазмоника	Создание гетероструктур на различных двумерных материалах при низких температурах (5-10 лет)	Магнотроника (5-10 лет)
Физика низкоразмерных систем	Спинтроника	Молекулярные функциональные элементы (20 лет)	Спинорбитроника (5-10 лет)
Lab-on-Chip			
ЗРЕЛАЯ НАУКА		ФАНТАСТИКА	
MEMS, NEMS	Квантовая оптика	Диагностика и лечение заболеваний на клеточном уровне	Lab-on-molecula
Полупроводниковые твердотельные сенсоры	Оптические сенсоры		
	Сверхпроводимость		

Источник: ЦСР «Северо-Запад» по материалам форсайт-сессии

ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ КВАНТОВЫХ СЕНСОРОВ



Источник: ЦСР «Северо-Запад» по материалам форсайт-сессии



### 3. КВАНТОВЫЕ КОММУНИКАЦИИ

Квантовые коммуникации (КК) открывают новые возможности в области передачи и защиты данных.

Среди перспективных направлений для разработок в области квантовых коммуникаций:

1. Квантовый блокчейн. Сегодня уже разработана платформа блокчейна, в рамках которой можно использовать квантовое распределение ключей. При определенных конфигурациях сети это позволяет отказаться от элементов блокчейна, которые уязвимы к атакам с помощью квантового компьютера [15].

2. Квантовый интернет, основным преимуществом которого будет полная безопасность коммуникации. В первую очередь подобная защищенная сеть необходима для финансового сектора, госструктур и военной сферы, поскольку у них самая высокая потребность в безопасной передаче данных [11].

3. Технологии безопасности на базе квантовых коммуникаций: например, квантово-защищенные подписи для физических лиц.

4. Передача энергии на расстоянии. В основе возможности сбора и передачи энергии с помощью квантовых технологий лежит идея о том, что при квантовой телепортации измерение на первой частице вводит квантовую энергию в систему. Предполагается, что, тщательно выбирая измерение для второй частицы, можно извлечь исходную энергию. Это возможно, потому что существуют квантовые флуктуации в энергии любой частицы. Процесс телепортации позволяет вводить энергию квантов в одну точку Вселенной, а затем использовать квантовые энергетические колебания, чтобы извлечь ее из другой точки. Разумеется, энергия системы в целом не меняется [8].

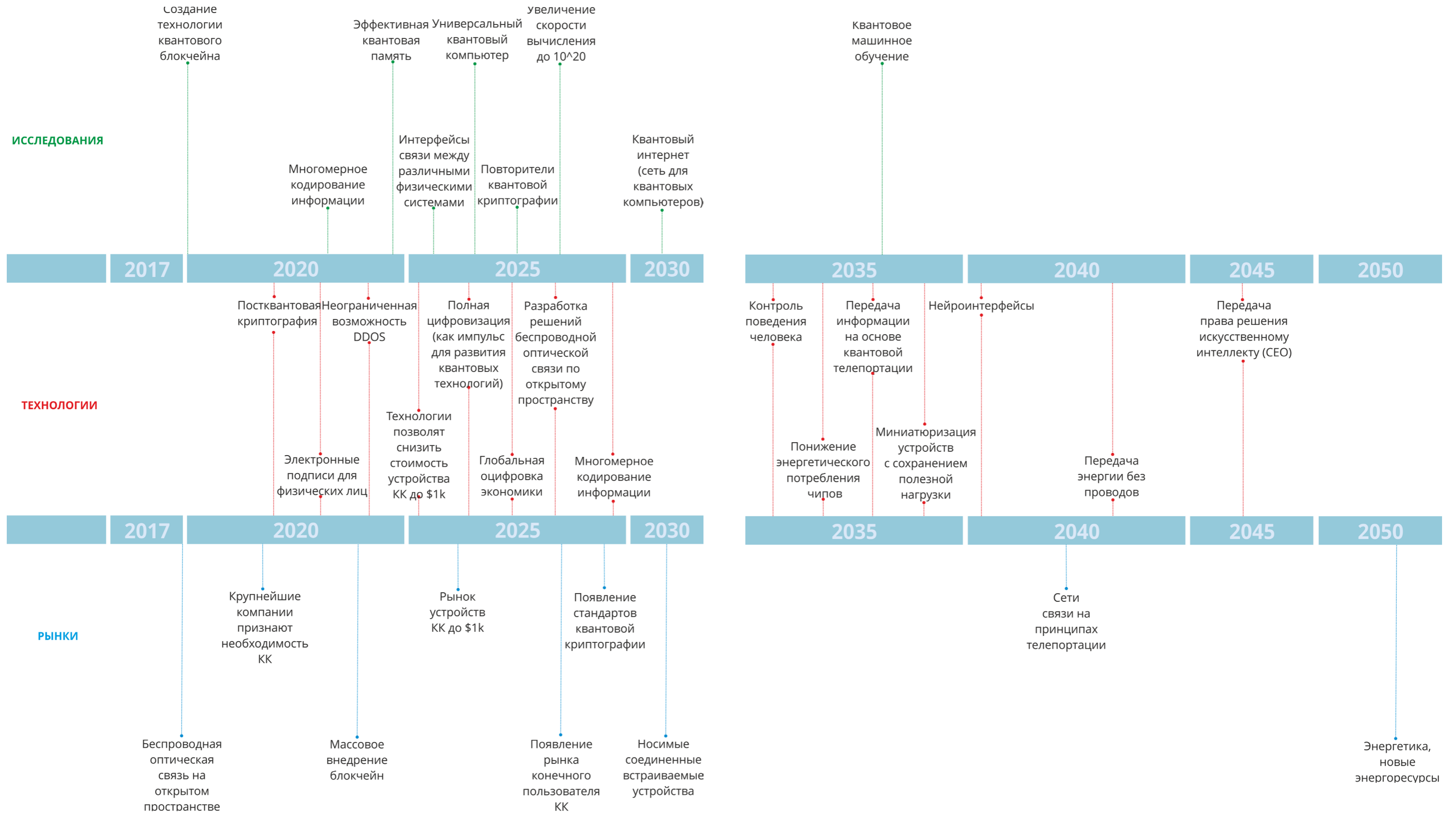
5. Беспроводная оптическая связь на открытом пространстве и на большие расстояния. Здесь в основе лежит принцип квантовой телепортации.

Квантовые технологии начинают играть центральную роль в широком спектре технологических направлений. Квантовая криптография – это уже реальность, с которой мы неизбежно столкнемся. Следующий шаг – квантово-защищенные коммуникации. Измерители и датчики, технологии визуализации уже достигают квантовых пределов. Смогут ли эти технологии изменить нашу жизнь? – зависит от того, как мы распорядимся созданным исследовательским потенциалом.

МАГИСТРАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ		ПРОРЫВ	
Адиабатические квантовые компьютеры	Квантовые сети	Квантовые симуляторы	Пост-квантовая криптография
V2C		Источники сложных квантовых состояний по требованию $F > 90\%$	Универсальный квантовый компьютер на 10-20 кубит
Квантовая криптография		Стойкость к алгоритмам Шора и Гровера на квантовом компьютере	Эффективная квантовая память $\tau = 10^{-3} \text{ с}$ , $F > 90\%$ , $\eta > 10\%$
		Универсальный квантовый компьютер на 100 кубит	Квантовые повторители
			Квантовый блокчейн
ЗРЕЛАЯ НАУКА		ФАНТАСТИКА	
Квантовые коммуникации «сервер-сервер»	Фундаментальный исследования по квантовой телепортации	Квантовое машинное обучение	Квантовый интернет (для квантовых устройств)
Базовые алгоритмы пост-квантовой криптографии 1984	Генераторы истинно случайных чисел	Google, IBM, NASA, Microsoft, D-Wave	Универсальный квантовый компьютер на 1000 кубит
Базовые алгоритмы пост-квантовой криптографии 1970		Телепортация атомов	
		Эффективная квантовая память $\tau = 1 \text{ с}$ , $F > 95\%$ , $\eta > 50\%$	

Источник: ЦСР «Северо-Запад» по материалам форсайт-сессии

ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ



Источник: ЦСР «Северо-Запад» по материалам форсайт-сессии

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы и прогнозы статьи основаны на форсайт-исследовании, выполненном Фондом "Центр стратегических разработок "Северо-Запад" и Российским квантовым центром в апреле 2017 г.

Комплекс мероприятий форсайт-исследования проводился по методологии «Disruptive Foresight», разработанной ЦСР «Северо-Запад». Метод позволяет спрогнозировать, когда и при каких условиях произойдет сдвиг долгосрочных тенденций развития научных тематик.

В мероприятиях форсайта квантовых технологий приняли участие представители ведущих научно-исследовательских учреждений и университетов страны: институтов РАН, Сколковского института науки и технологий, Томского политехнического университета, СПбГУ, МФТИ, ИТМО, ННГУ им. Н. И. Лобачевского, а также представители бизнеса из таких компаний, как Oracle, Росэлектроника, Kaspersky Lab, Сберинвест, Т8. Кроме того, в работе сессии приняли участие представители Российской венчурной компании, Фонда перспективных исследований, Фонда Сколково (Кластер ядерных технологий) и Экспертного совета по гособоронзаказу при ФАС России.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ И ЛИТЕРАТУРЫ:

- [1] Abidi C. Qubit Manipulation In Quantum Computers With Application To Artificial Intelligence // University of Pittsburgh Swanson School of Engineering <http://www.pitt.edu/~budny/papers/245.pdf> (Просмотрено 18.07.2017)
- [2] Google is Closer Than Ever to a Quantum Computer Breakthrough // Futurism <https://futurism.com/google-is-closer-than-ever-to-a-quantum-computer-breakthrough/> (Просмотрено 13.07.2017)
- [3] Katsnelson A. Tiny temperature sensors // Chemical & Engineering News <http://cen.acs.org/articles/95/i23/Tiny-temperature-sensors.html> (Просмотрено 25.07.2017)
- [4] Lewis A.M., Krämer M., Travagnin M. Quantum Technologies: Implications for European Policy // European Union <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC101632/lbna28103enn.pdf> (Просмотрено 13.07.2017)
- [5] Lloyd S., Englund D. Future Directions of Quantum Information Processing [http://www.acq.osd.mil/rd/basic\\_research/references/docs/Future\\_Directions\\_Quantum.pdf](http://www.acq.osd.mil/rd/basic_research/references/docs/Future_Directions_Quantum.pdf) (Просмотрено 18.07.2017)
- [6] Miller K. Mind Uploading // Something Possible <https://www.somethingpossible.com/mind-uploading-5.html> (Просмотрено 18.07.2017)
- [7] Nillson F. Intelligent Video: The Key to Analyzing Big Video Data // Upside <https://upside.tdwi.org/articles/2017/03/24/intelligent-video-key-to-analyzing-big-video-data.aspx> (Просмотрено 21.07.2017)
- [8] Physicist Discovers How to Teleport Energy // MIT Technology Review <https://www.technologyreview.com/s/417362/physicist-discovers-how-to-teleport-energy/> (Просмотрено 21.07.2017)
- [9] Physicists discover a new approach for building quantum computers // ScienceDaily <https://www.sciencedaily.com/releases/2016/07/160722104135.htm> (Просмотрено 26.07.2017)
- [10] Quantum gravity sensing devices // UK National Quantum Technologies Programme 2017 <http://uknqt.epsrc.ac.uk/applications/quantum-gravity-sensing-devices/> (Просмотрено 13.07.2017)
- [11] Quantum Internet and Networked Computing // QuTech <https://qutech.nl/roadmap/quantum-internet/> (Просмотрено 26.07.2017)
- [12] Reuell P. New way to model molecules // Harvard gazette <http://news.harvard.edu/gazette/story/2016/08/new-way-to-model-molecules/> (Просмотрено 18.07.2017)
- [13] Skuse B. The trouble with quantum computing // The Institution of Engineering and Technology <https://eandt.theiet.org/content/articles/2016/11/the-trouble-with-quantum-computing/> (Просмотрено 18.07.2017)
- [14] Белокопытова В. В России появится первая сеть квантового интернета // Известия <http://iz.ru/news/625841> (Просмотрено 25.07.2017)
- [15] В России запустили первый в мире квантовый блокчейн // Ferra.ru <https://www.ferra.ru/ru/techlife/news/2017/05/26/russian-quantum-blockchain/> (Просмотрено 25.07.2017)
- [16] Королев В. D-wave начала продажи 2000-кубитного квантового вычислителя // N+1 <https://nplus1.ru/news/2017/01/26/d-wave-2000> (Просмотрено 26.07.2017)

- [17] Королев В. Пятьдесят кубитов и еще один // N+1 <https://nplus1.ru/material/2017/07/18/51-qubit-text> (Просмотрено 18.07.2017)
- [18] Кузнецов А. Есть ли польза от квантовых компьютеров обычным людям? [https://www.iguides.ru/main/gadgets/google/est\\_li\\_polza\\_ot\\_kvantovykh\\_kompyuterov\\_obychnym\\_lyudyam/](https://www.iguides.ru/main/gadgets/google/est_li_polza_ot_kvantovykh_kompyuterov_obychnym_lyudyam/) (Просмотрено 18.07.2017)
- [19] Лихачев Н. IBM объявила эру квантовых компьютеров запуском своего облачного сервиса вычислений // ИД «Комитет» <https://tjournal.ru/27490-ibm-obyavila-eru-kvantovyh-kompyuterov-zapuskom-svoego-oblachnogo-servisa-vychisleniy> (Просмотрено 26.07.2017)
- [20] Ферапонтов И. Как читать мысли: устройство из Российского квантового центра // Популярная механика <https://www.popmech.ru/made-in-russia/189901-na-puti-k-mielofonu/> (Просмотрено 25.07.2017)
- [21] Физики представили квантовые деньги будущего // Naked Science <https://naked-science.ru/article/hi-tech/fiziki-predstavili-kvantovye-dengi> (Просмотрено 18.07.2017)
- [22] Хель И. 10 невероятных последствий развития квантовых технологий // Hi-News.ru <https://hi-news.ru/technology/10-neveroyatnyx-posledstvij-razvitiya-kvantovyh-texnologij.html> (Просмотрено 18.07.2017)