



СОЗДАНИЕ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ КВАНТОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕЙ: РОССИЙСКИЙ ОПЫТ

ВАЛЕНТИН ТОЛСТЫХ, руководитель проекта
ДМИТРИЙ ПЛОХОВ, менеджер проектов
ООО «КуСпэйс Технологии»

При поддержке



ГАЗПРОМБАНК

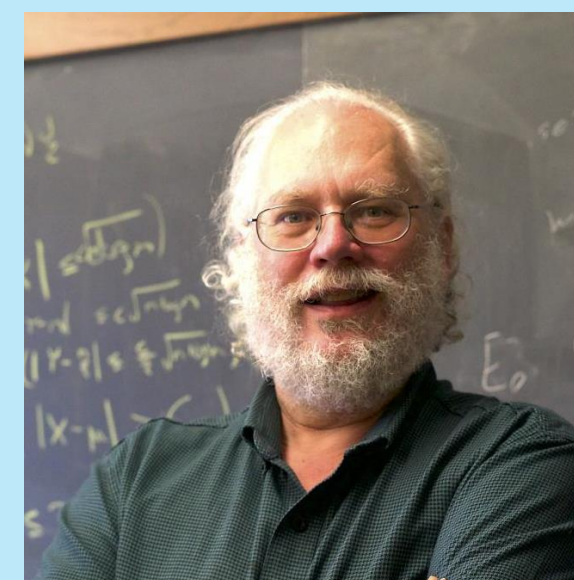
КВАНТОВЫЙ КОМПЬЮТЕР: ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ И УГРОЗА ДЛЯ СИСТЕМ ШИФРОВАНИЯ

ВЫЗОВЫ

Уязвимость алгоритмов асимметричного шифрования [1] перед квантовыми компьютерами (КК)

1994 г

Питер Шор предложил эффективный алгоритм факторизации больших чисел для квантового компьютера



2001 г

В лаборатории IBM на квантовом компьютере с 7 кубитами успешно продемонстрировано разложение числа 15 при помощи алгоритма Шора

Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance

Lieven M. K. Vandersypen^{††}, Matthias Steffen^{††}, Gregory Breyta^{*}, Costantino S. Yannoni^{*}, Mark H. Sherwood^{*} & Isaac L. Chuang^{††}

^{*} IBM Almaden Research Center, San Jose, California 95120, USA
^{††} Solid State and Photonics Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305-4075, USA

Источник: [Nature](#)

Квантовые компьютеры становятся мощнее и всё ближе к практической применимости [2]

Прогресс в разработках

Демонстрируется ежегодный кратный рост числа кубитов в квантовых компьютерах
В дорожной карте IBM на 2023 г запланирована демонстрация КК Condor с 1121 кубитами



Источник IBM

Защита информации — критический фактор для безопасности граждан, государств и компаний

на 150%

Выросло число атак на российскую критическую инфраструктуру в первом полугодии 2021 года по сравнению с 2020 годом

Источник : оценка Group-IB

Кибератаки приняты на вооружение

Атаки на критическую инфраструктуру активно используются против государств и отдельных организаций

Кейсы: [How the cyberwar between Iran and Israel has intensified](#),
[Nation-State Hacker Attacks on Critical Infrastructure](#)

Хакинг как услуга

В 2022 г значимую роль стали играть кибератаки, организованные в интересах третьих лиц (*Ransomware-as-a-Service – RaaS*)

Источник: [Insights Into ICS/OT Cybersecurity 2022](#),

[1] Алгоритмы типа RSA, DSA, Diffie-Hellman и т.п. ; [2] В 2019 г. исследователи из Google объявили о достигнутом квантовом превосходстве (Quantum supremacy using a programmable superconducting processor)

КВАНТОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КЛЮЧЕЙ (КРК) ДЛЯ ЗАЩИТЫ КРИТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Потенциал для решения заложен в квантовой физике

Квантовые коммуникации

Технология кодирования и передачи информации, использующая квантовые состояния частиц

Квантовое распределение ключей

Специальный вид квантовой связи, позволяющий двум удаленным пользователям безопасным образом выработать и распределить симметричные криптографические ключи для дальнейшего шифрования данных [1]

ДОВЕРИЕ ОСНОВАНО НА ДОВЕРИИ К ФУНДАМЕНТАЛЬНЫМ ЗАКОНАМ ФИЗИКИ

Биты ключа кодируются состояниями одиночных фотонов

Неизвестное квантовое состояние отдельной частицы невозможно скопировать [2]

Неортогональные квантовые состояния неразличимы при измерении [3]

Попытка перехвата (измерения) изменяет квантовые состояния, создавая ошибки при распределении и обнаруживается



Защита от перехвата ключа гарантирована законами физики

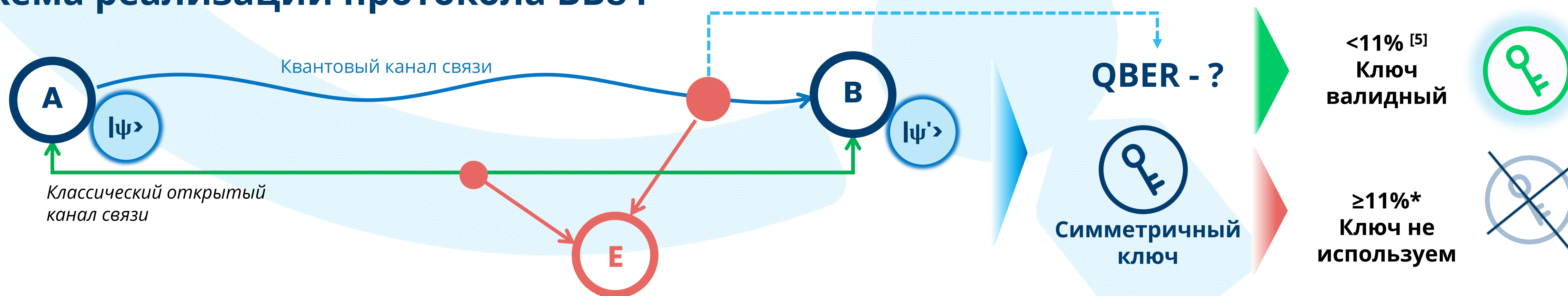


Шифр-ключ не подвержен взлому квантовым компьютером



Доказанная абсолютная криптостойкость [3]

Схема реализации протокола BB84 [4]



[1] Глоссарий по квантовым технологиям

[2] Теорема о запрете клонирования состояний квантовых частиц, [3] По принципу неопределённости Гейзенберга

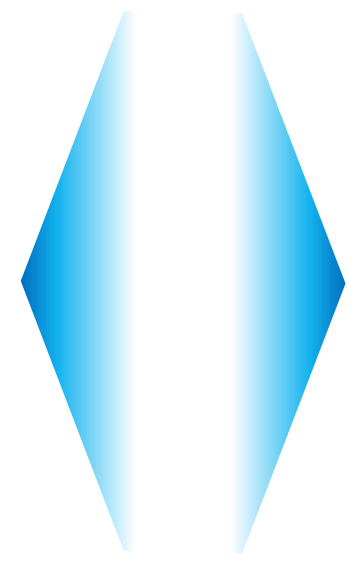
[4] С. Н. Bennett and G. Brassard. "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing"; [5] Shor P.W., Preskill J. Simple proof of security of the BB84 quantum key distribution protocol // Phys. Rev. Lett. - 2000. - Vol. 85, 441

ОСОБЕННОСТИ КВАНТОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ В ОТКРЫТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

ВИДЫ РЕАЛИЗАЦИИ :

В космическом пространстве **Атмосферные**
Смешанные

В водной толще

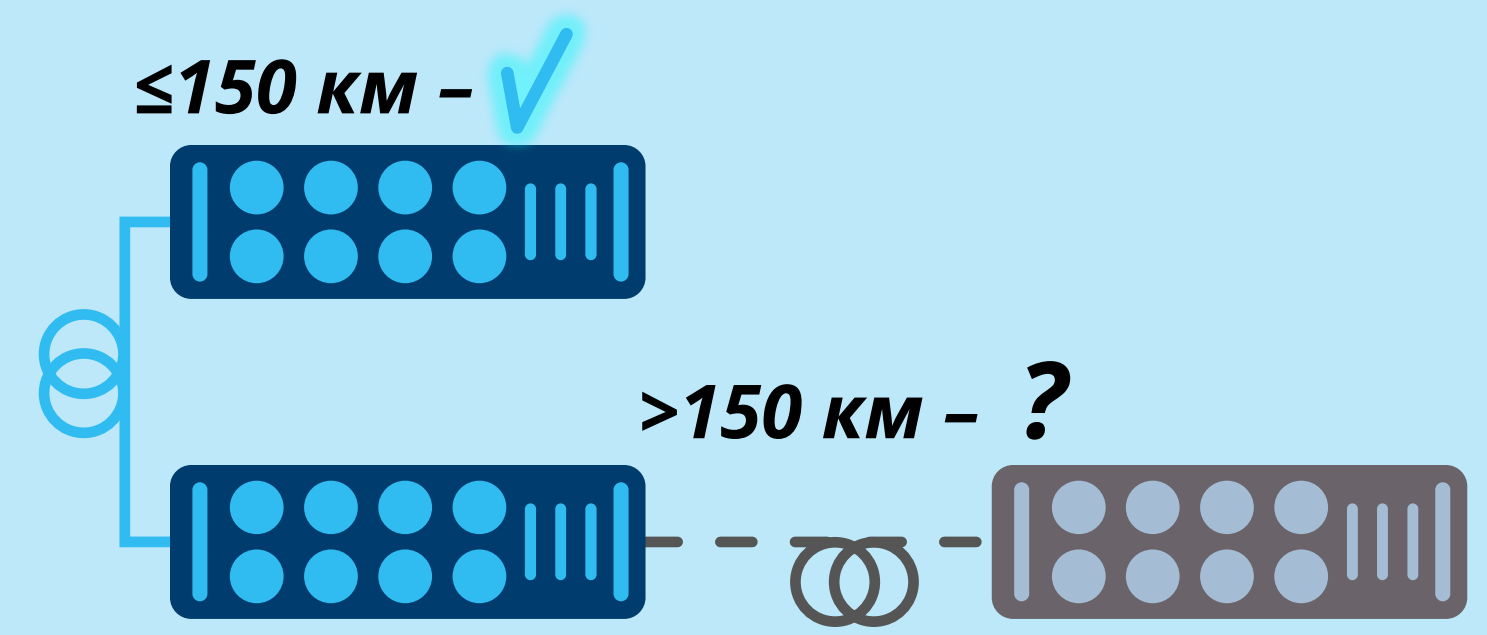


КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР, ВЛИЯЮЩИЙ НА ТЕХНИЧЕСКУЮ РЕАЛИЗАЦИЮ – СРЕДА

- Потери в нижних слоях атмосферы (турбулентность)
- Поглощение и рассеяние фотонов в атмосфере (облачность, туман, смог и т.п.)
- Дифракционные потери $\sim L^2$ [1]
- где L – расстояние между передатчиком и приемником

МЕНЬШИЕ ПОТЕРИ НА БОЛЬШИХ РАСТОЯНИИХ ОПРЕДЛЯЮТ ПРЕИМУЩЕСТВО СПУТНИКОВОЙ КВАНТОВОЙ СВЯЗИ ПЕРЕД ОПТОВОЛОКОННЫМИ СИСТЕМАМИ

Системы КРК для оптоволоконных каналов



- Относительно просто интегрируются в магистральные оптоволоконные сети
- Для больших расстояний нужны узлы-повторители

Спутниковые системы КРК



- Глобальное покрытие
- Решение проблемы доверенных узлов

Но при этом:

- Влияние атмосферы
- Сложная инженерная задача для реализации

[1] Для сравнения: поглощение фотонов в веществе (оптоволокне) $\sim \text{EXP}(L)$

СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ КРК МОГУТ ДОПОЛНЯТЬ И РАСШИРЯТЬ ВОЗМОЖНОСТИ ОПТОВОЛОКОННЫХ СИСТЕМ

Нет ограничения по расстоянию для передачи ключей

1

Решение проблемы обновления (передачи) ключей шифрования на автономные и Изолированные объекты

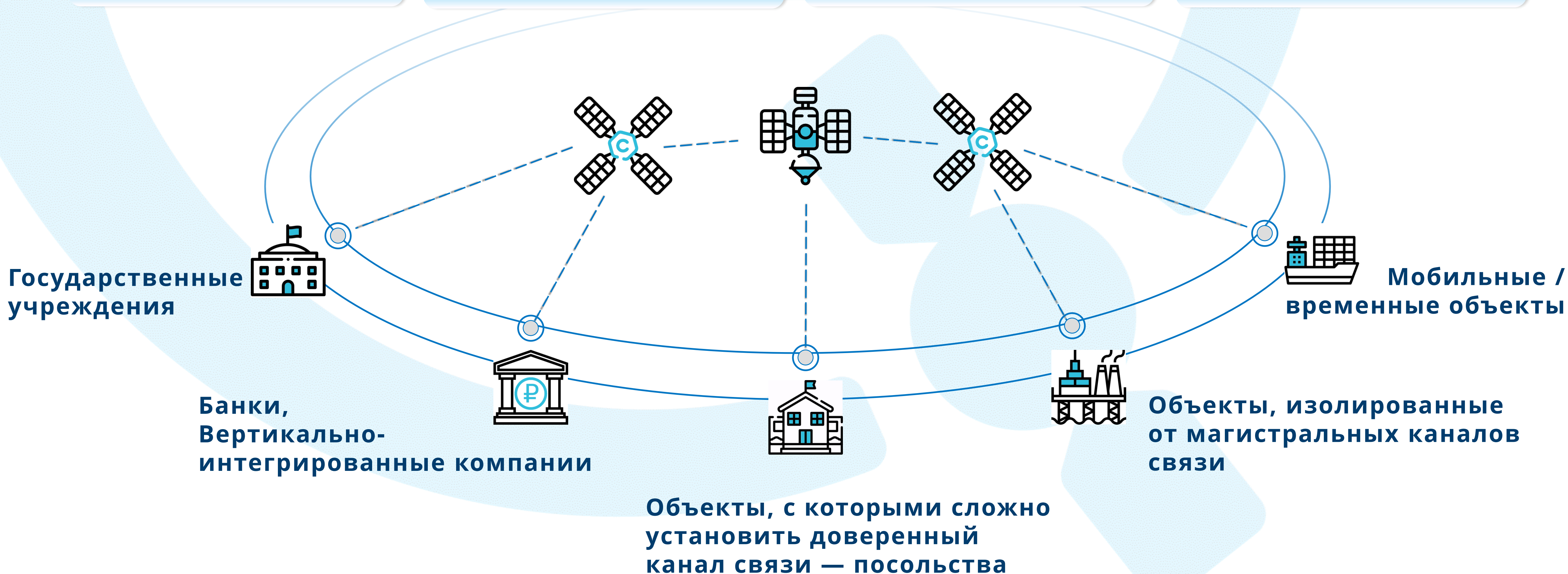
2

Снижение инфраструктурных затрат — не нужны промежуточные доверенные узлы

3

Интеграция с классической лазерной связью

4



В МИРЕ РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ СПУТНИКОВЫХ КРК ПЕРЕХОДЯТ ИЗ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ПРОЕКТОВ В СТАРТАПЫ И ДЕМОНСТРАТОРЫ

Дополнительная информация по активным спутниковым инициативам в приложении

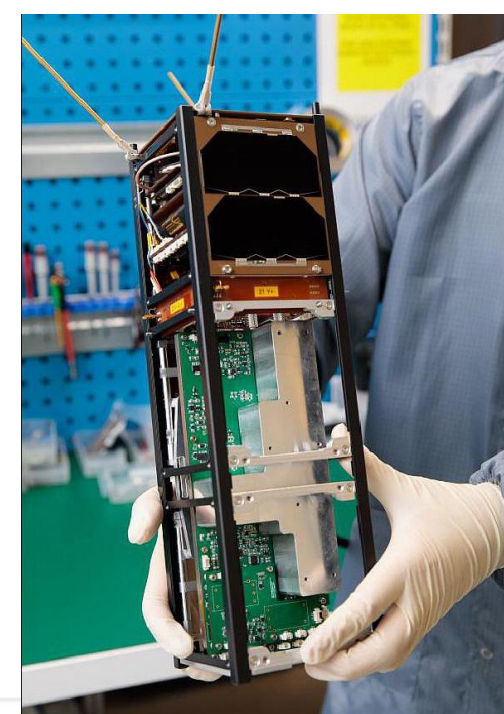
QUESS – Micius (Китай, 2016)

Первый в мире спутник квантовой связи
Установка канала связи между Пекином и Веной (~7500 км), защищенного по протоколу BB84



SprooQu 1 (Сингапур, 2019)

Первый в мире квантовый кубсат
Генерация пар запутанных фотонов (проверка протокола E91). Спутник формата CubeSat 3U



Jinan-1 (Китай, 2022)

Развитие миссии QUESS – Micius
Уменьшение размера квантового передатчика на спутнике, масштабирование наземной сети приемных станций

China / Science

China launches new satellite in ‘important step’ towards global quantum communications network

- Jinan 1 will conduct key distribution experiments in lower-Earth orbit after a month of testing
- More launches planned for near future to support quantum communication for over 100 users

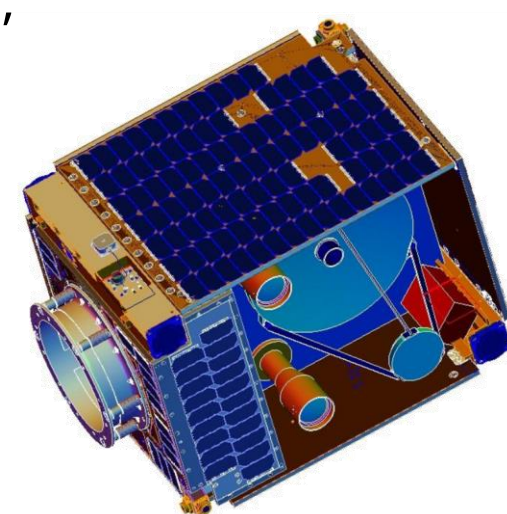
Источник: [SCMP.com](https://www.scmp.com)



QEYSSat (Канада, 2024/2025)

Демонстрация квантовой связи «Земля-КА» и «КА-Земля» + Оптическая лазерная связь

Технологический партнер (контрактор): Honeywell Aerospace
Интегратор спутника: Loft Orbital;
Платформа: YAM-4 (до 90 кг полезной нагрузки) от Blue Canyon Technologies



SpeQtral-1 (SpeQtral, 2024)

Коммерческая система спутникового КРК
Спин-офф CQT NUS. В основе результаты полученные в миссии SprooQu 1. Привлеченное венчурное финансирование > \$10 М



Параллельный проект SPEQTRE (совместно с RAL SPACE/ ISISPACE / ESA / UK Space Agency). Цель – разработка демонстратора СКРК с запуском в 2024-2025 г

Коллаборация с Rivada Space Networks (создание защищённых спутниковых каналов связи)

EAGLE-1 (ЕС, 2024)

СКРК для развертывания суверенной защищенной информационной инфраструктуры Европейского союза (инициатива EuroQCI)

Разрабатывается консорциумом из 20 компаний во главе с SES с поддержкой ESA



СПУТНИКОВЫЕ И АТМОСФЕРНЫЕ СИСТЕМЫ КРК В РОССИИ: ЛАНДШАФТ УЧАСТНИКОВ

ФОИВЫ, Госкомпании



Минцифры
России



Держатель
Дорожной карты

Исследовательские организации



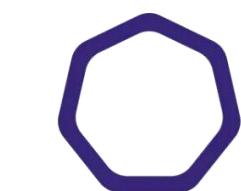
РКЦ



МИСИС
УНИВЕРСИТЕТ



Центр
Квантовых
Технологий



МТУСИ



УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Частные компании



МОСТКОМ

Коммерсантъ

Наука
16.03.2022, 16:37
534 5 мин.

Кибербезопасность по воздуху

В Москве прошел эксперимент по беспроводной передаче квантового ключа шифрования в открытом пространстве на 180 и 3100 метров

Эксперимент осуществлен совместными усилиями ученых Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ) и специалистами компаний QRate и «Мостком». Цель работы заключалась в том, чтобы совместить оборудование квантовой защиты информации с технологией лазерной передачи данных и оценить влияние погодных условий на качество их синхронизации.



ЦЕНТР КВАНТОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МГУ РАЗРАБОТАЛ АППАРАТУРУ ДЛЯ КВАНТОВОЙ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

13.05.2022 12:30

1508 Добавить в закладки

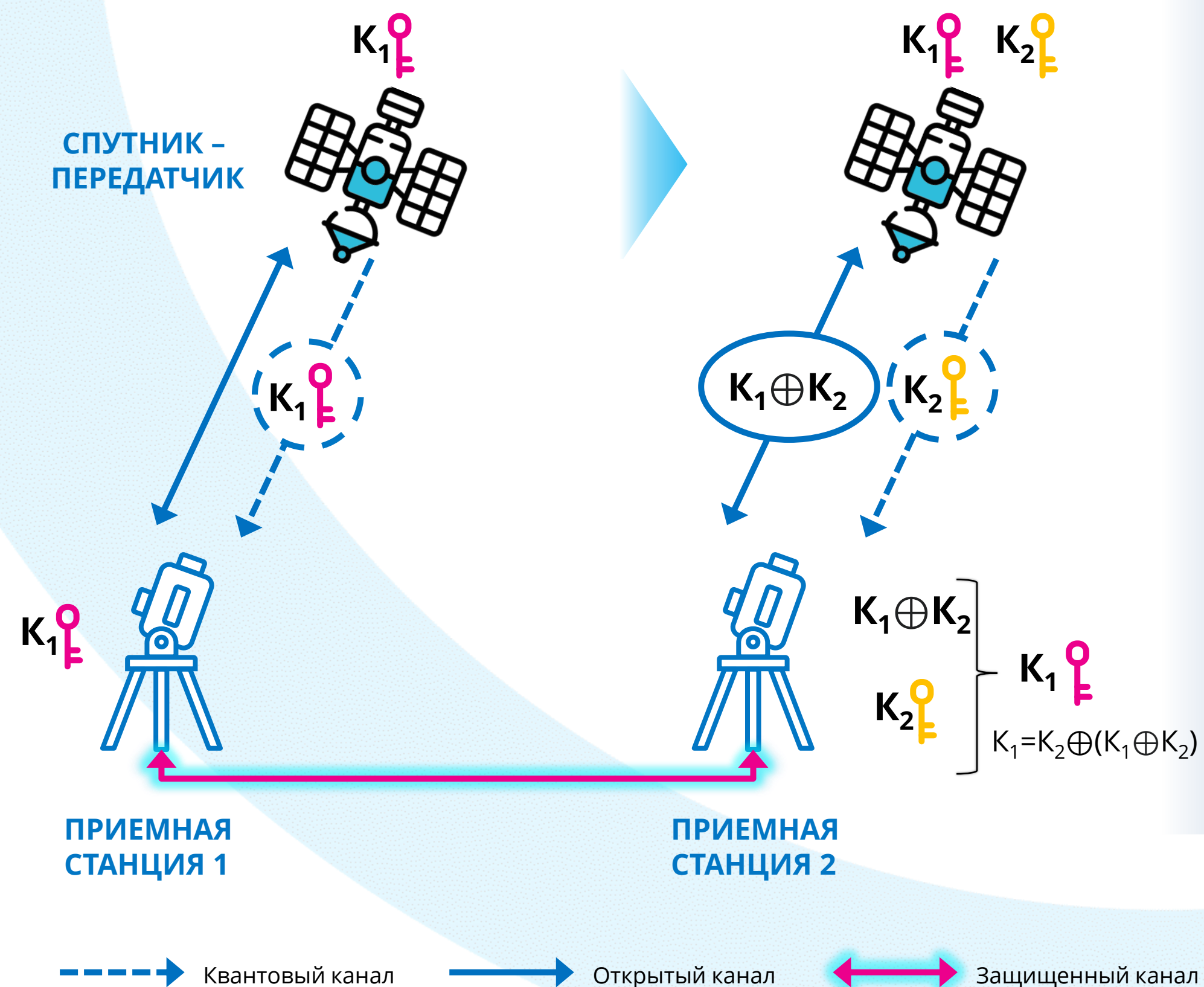


Ученые Центра НТИ — Центра квантовых технологий физического факультета МГУ протестировали аппаратуру для передачи квантовых ключей и информации, защищенной квантовыми ключами, по атмосферным каналам связи. В

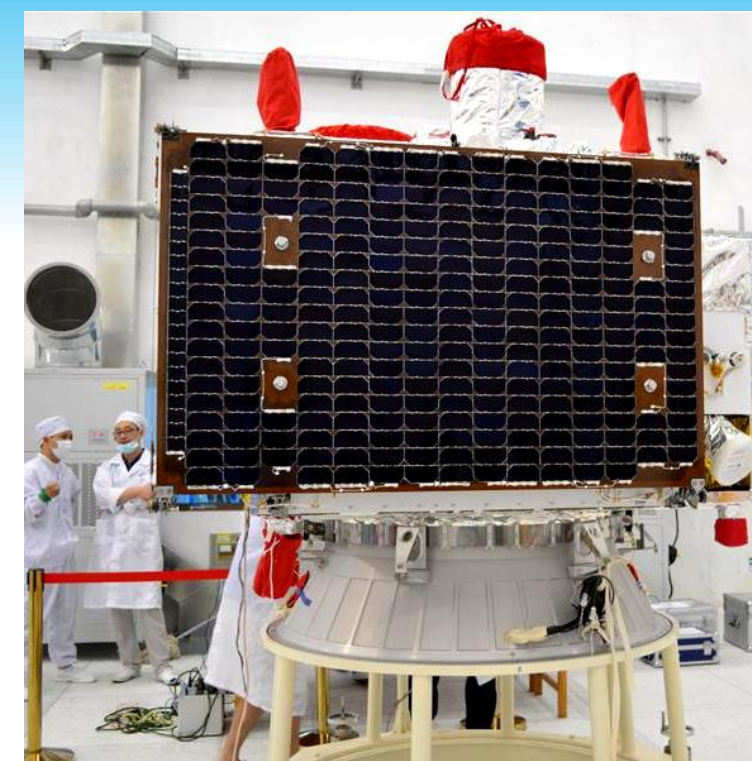
рамках тестирования был запущен сегмент беспроводной квантово защищенной сети между главным зданием МГУ и одним из зданий на проспекте Вернадского.

СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА КРК: АРХИТЕКТУРА

Схема КРК между двумя приемными станциям (протокол BB84) ¹



Космический сегмент



QUESS – Micius, масса 600 кг, Китай

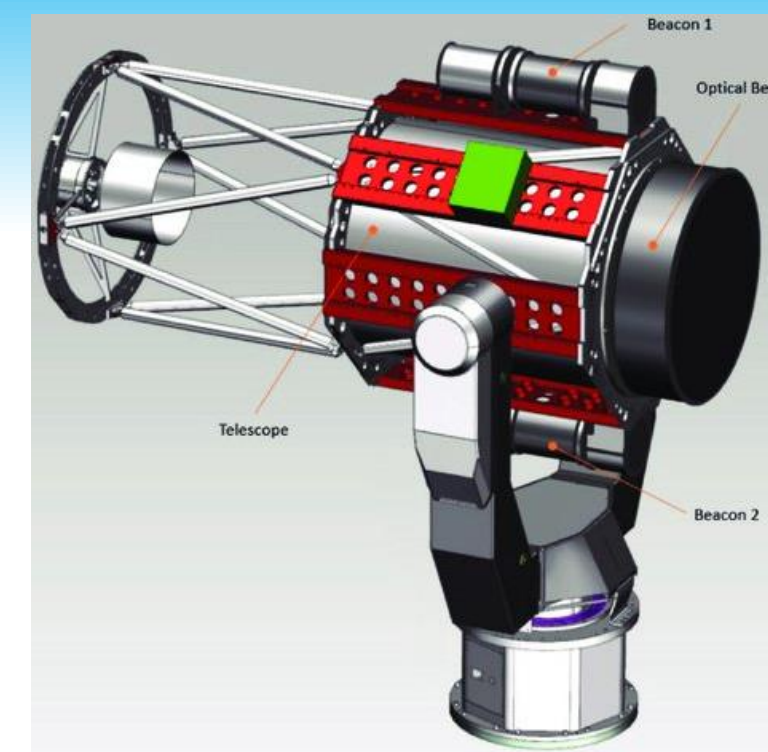


SPEQTRE (QKD Cubesat), CubeSat 12U, Великобритания / Сингапур ^[2]



Импульс-2, CubeSat 16U, Россия

Наземная часть



Наземный терминал КРК (общий вид)



Мобильный наземный терминал



Стационарный наземный терминал

НА ПЕРВОЕ МЕСТО ВЫХОДИТ СИСТЕМНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ:

Кроме реализации квантового протокола важны согласование требований ко всем системам и интеграция

[1] Wang, J.; Chang, L.; Chen, H.; Zhu, Z. *Networking Feasibility of Quantum Key Distribution Constellation Networks*

[2] <https://www.nanosats.eu/sat/speqtre>

Особенности:

Автоматическое наведение и сопровождение телескопом по TLE - координатам (эфемеридам) спутника и по опорному сигналу от передатчика на КА

Отправка опорного сигнала для системы стабилизации передатчика на КА

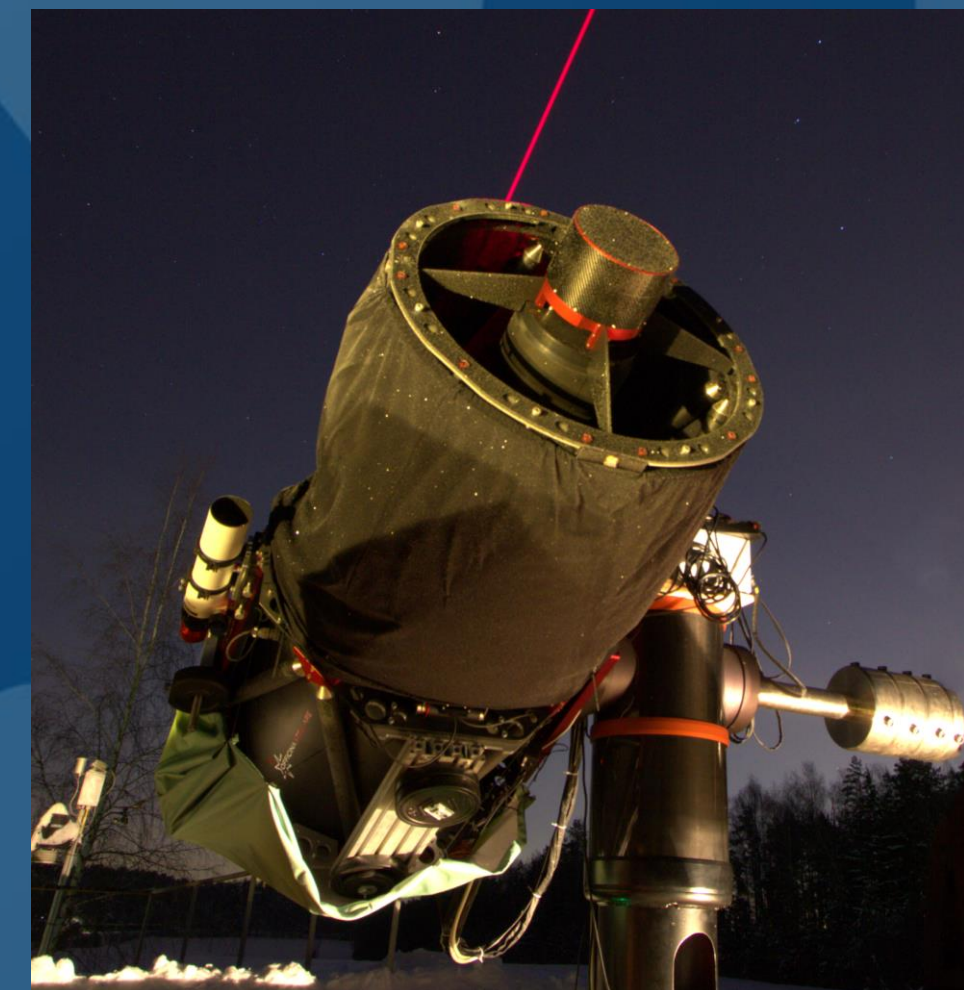
Разделение опорного («маяк») и квантового сигналов по длине волны

Мобильный приемный оптический модуль



- Частота входного оптического сигнала: до 100 МГц
- Входной диаметр оптической системы: 305 мм
- Фокусное расстояние главного зеркала: 620 мм
- Поле зрения (по волокну 100 мкм): ± 69 мкрад (± 15 ")
- Полная масса установки: 150 кг

Стационарный приемный оптический модуль (Звенигородская обсерватория)



- Частота входного оптического сигнала: до 100 МГц
- Входной диаметр оптической системы: 600 мм
- Фокусное расстояние главного зеркала: 4800 мм
- Поле зрения (по волокну 100 мкм): ± 14 мкрад (± 3 ")

В 2022 г ПРОТОТИП НАЗЕМНОЙ СТАНЦИИ УСПЕШНО ПРОТЕСТИРОВАН В ЭКСПЕРИМЕНТЕ С КА QUESS - MICIUS

ЦЕЛИ:

- Квантовое распределение ключа со спутника Micius и оценка ошибки (QBER)
- Апробация наземного приемного терминала собственной разработки
- Отработка алгоритмов наведения наземного терминала на спутник в реальных условиях
- Тестирование алгоритмов постобработки квантового ключа

РЕЗУЛЬТАТЫ:

В 2021-2022 г проведено более 10 сеансов обмена между Micius и станцией в Звенигороде

Полностью реализована программа тестирования и апробации алгоритмов и систем



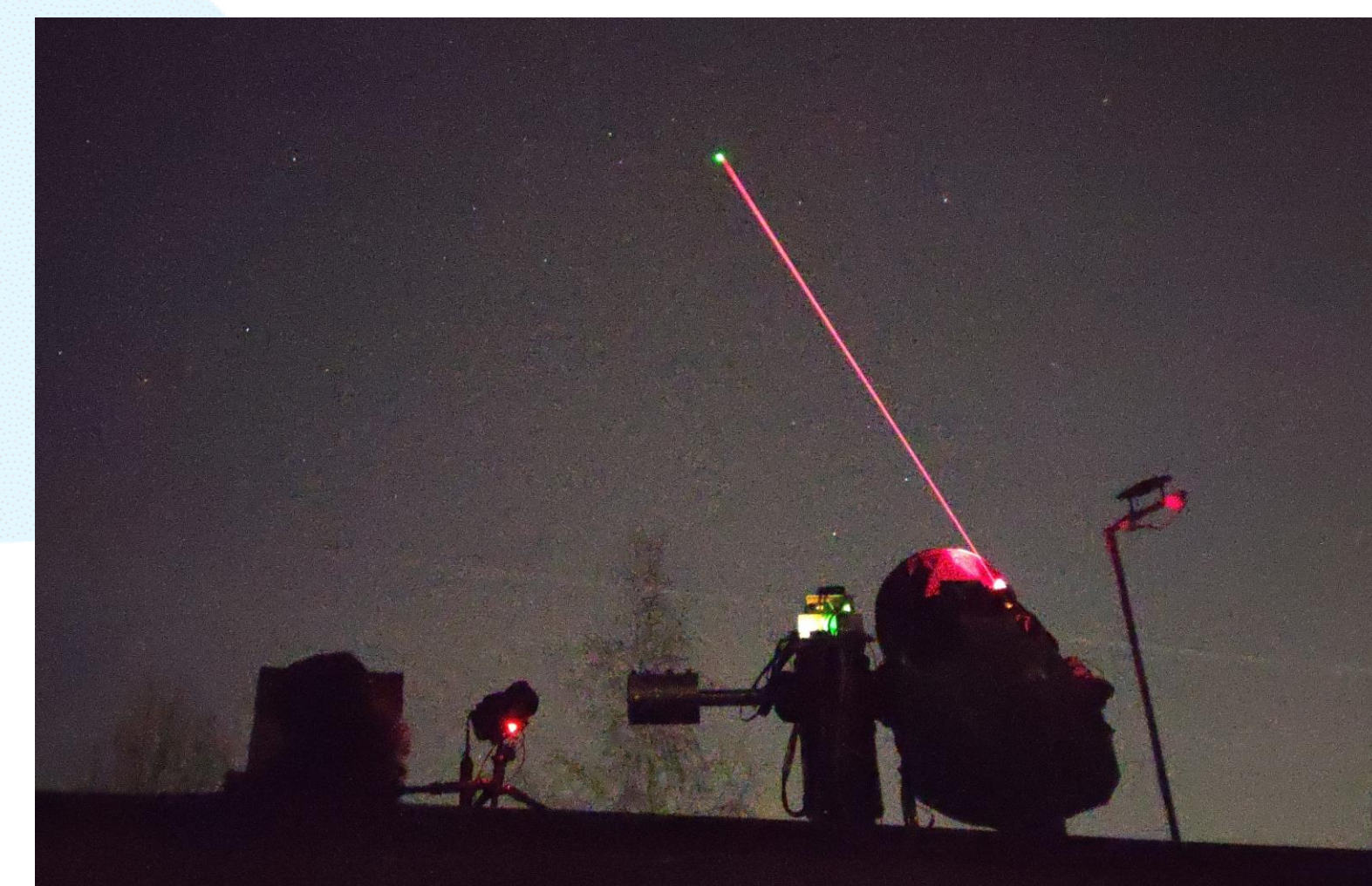
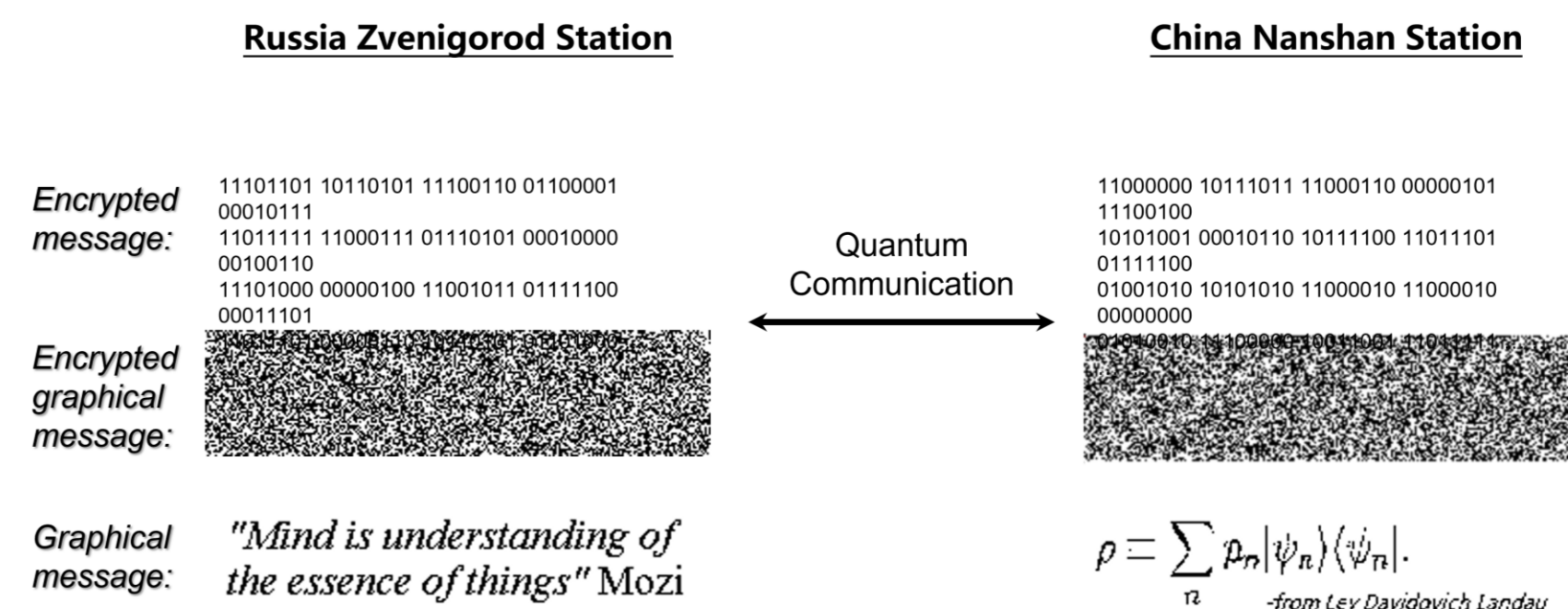
РЕЗУЛЬТАТЫ ОДНОГО ИЗ СЕАНСОВ

Распределенный ключ:
570 кбит

Скорость распределения
2,6 кбит / с

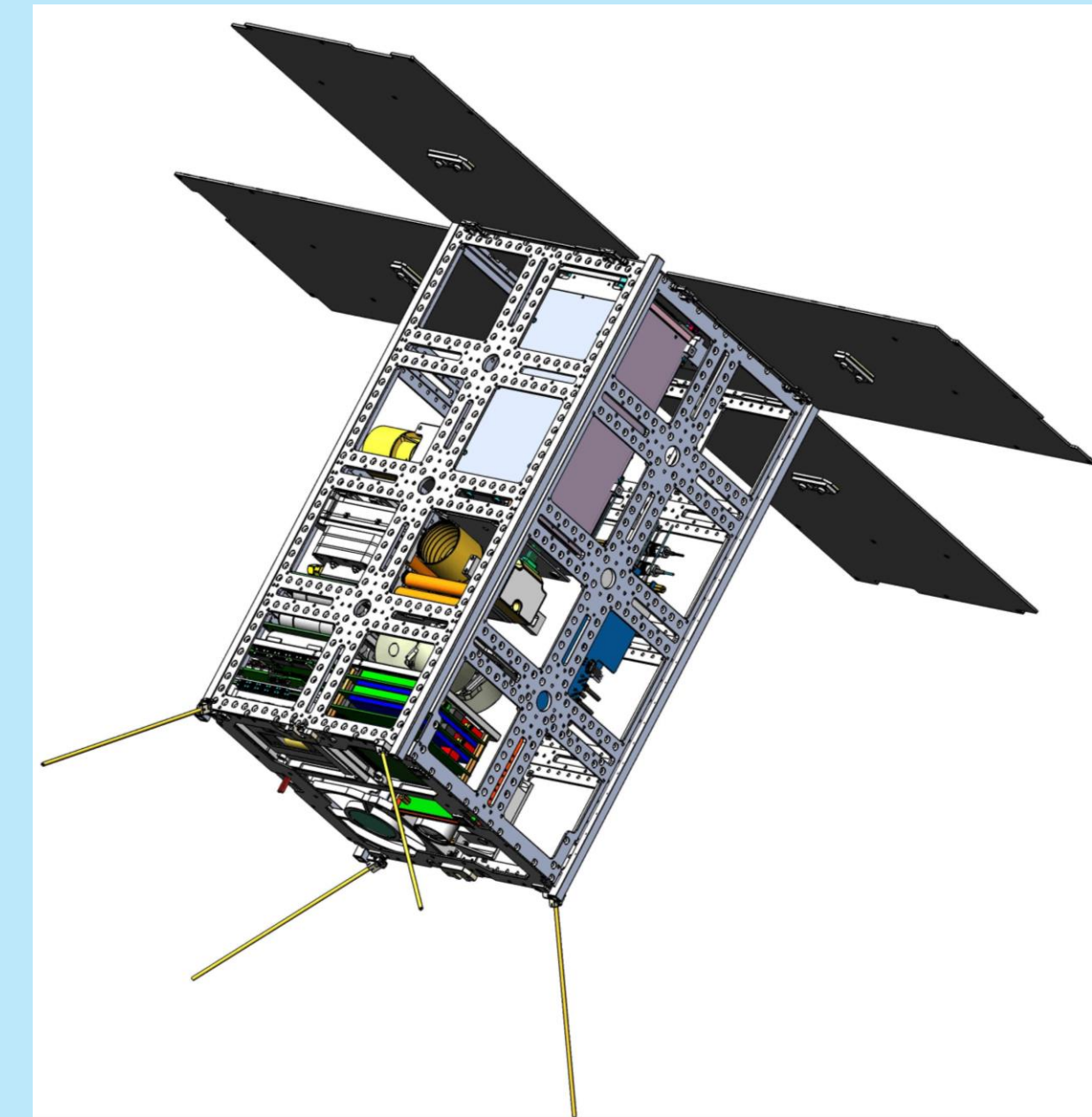
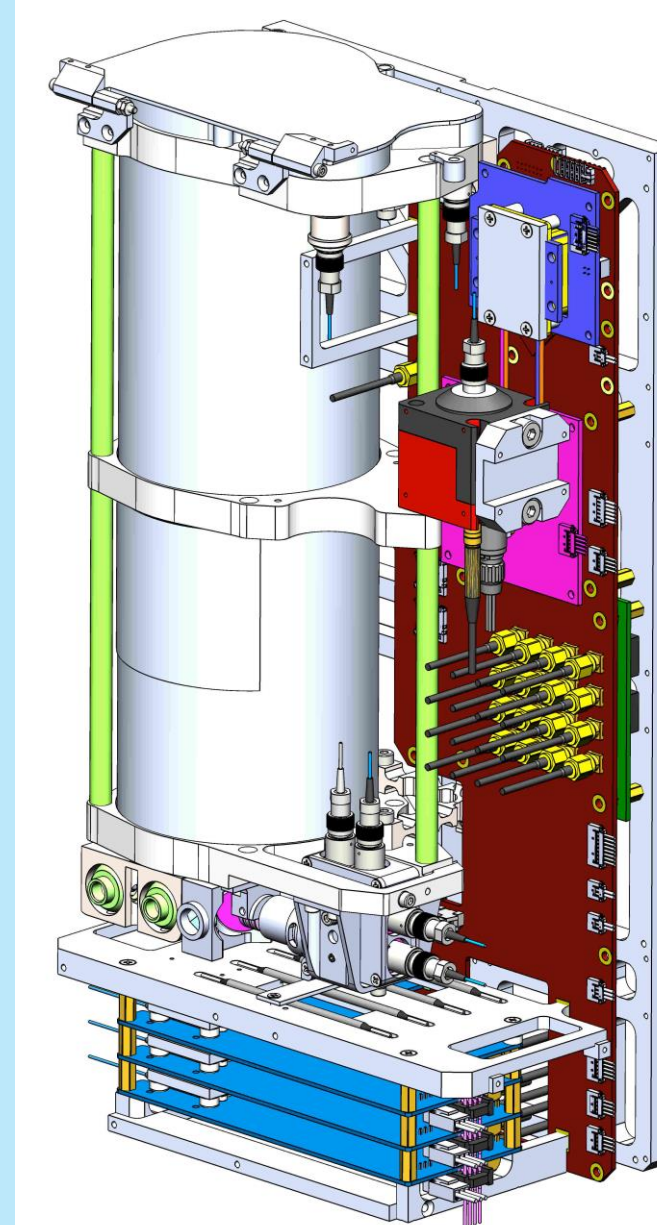
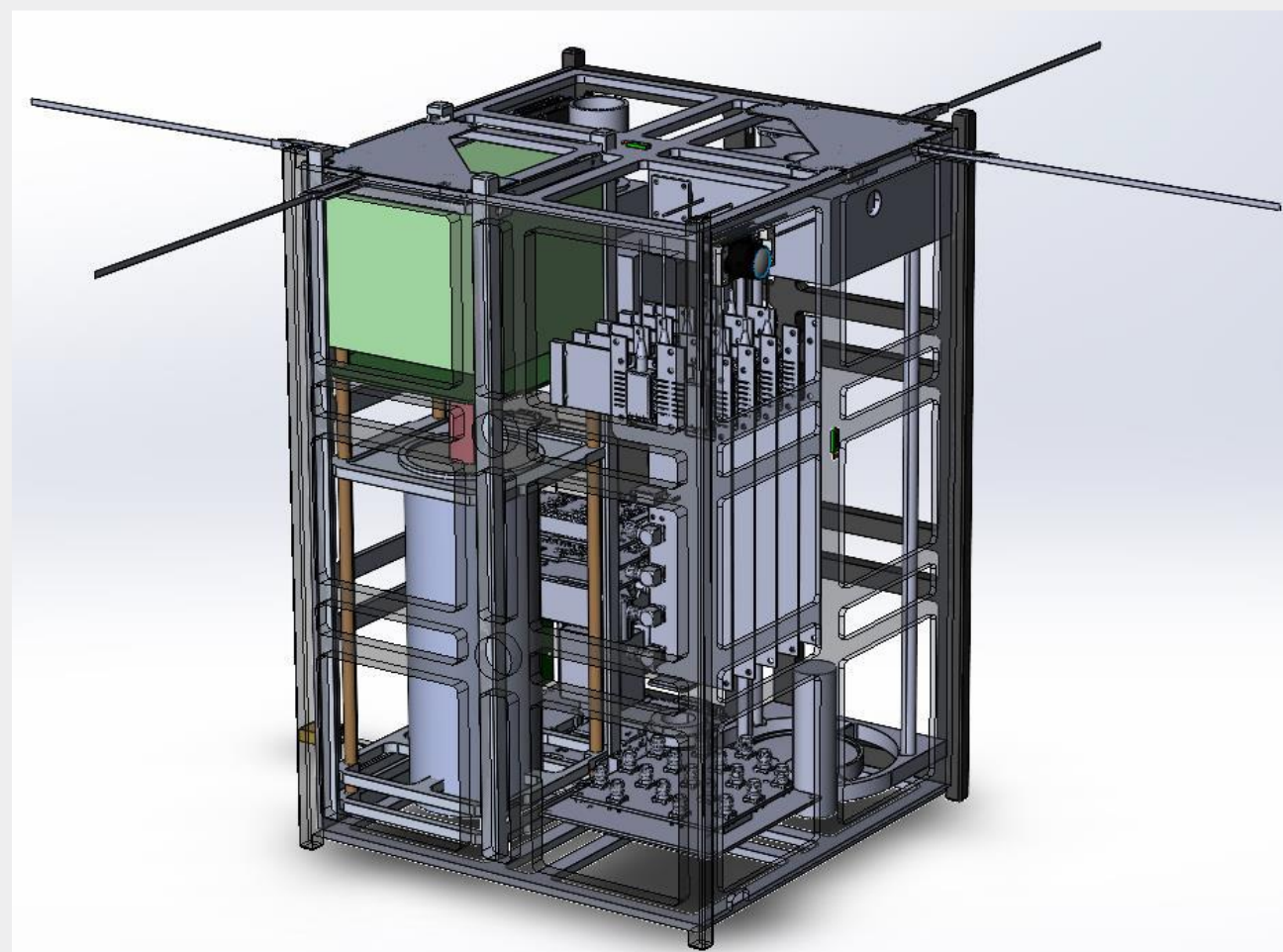
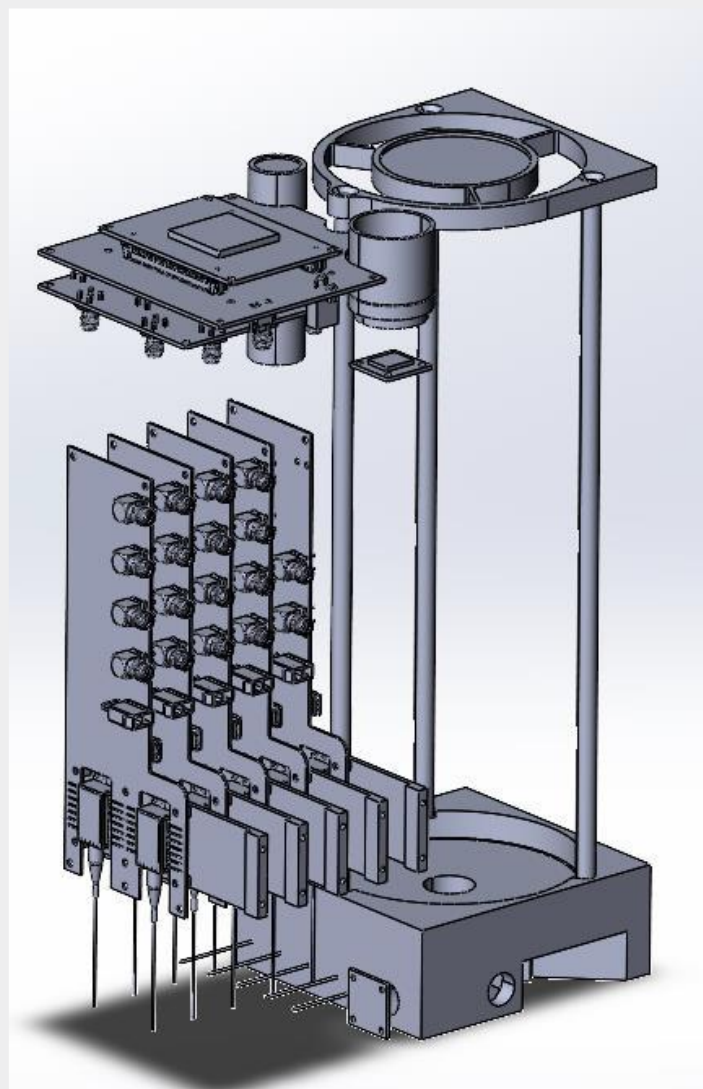
QBER
0,94%

ПОЛУЧЕННЫЙ КЛЮЧ ИСПОЛЬЗОВАН ДЛЯ ОБМЕНА МЕЖДУ QSPACE И USTC



Сеанс приема со спутника:
зеленая «звезда» – спутник; красный луч – маяк

В 2021-2022 г ПРОРАБОТАН ДЕТАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ МКА ИМПУЛЬС-2 ФОРМАТА CubeSat С ПЕРЕДАТЧИКОМ КРК



КВАНТОВЫЙ ПЕРЕДАТЧИК «БАЗИС» (полезная нагрузка)

Габариты	6U	7U
Масса	до 7,5 кг	до 9,5 кг
Энергопотребление	до 30 Вт ¹	до 110 Вт ¹
Режимы работы	Генерация квантового ключа, Телеком	Генерация квантового ключа, Телеком

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ

Габариты	12U	16U
Масса	до 14,5 кг	не более 22 кг
Энергопотребление (пиковое)	до 40 Вт	до 115 Вт

[1] на активном участке

[2] 1U (юнит) – объем в виде условного куба с размерами 100x100x100 мм

НАЗНАЧЕНИЕ:

1

Демонстрация технологии распределения квантового ключа каналу «спутник-Земля» (протокол *BB84*)

2

Отработка технологии передачи информации со спутника по оптическому (лазерному) каналу

3

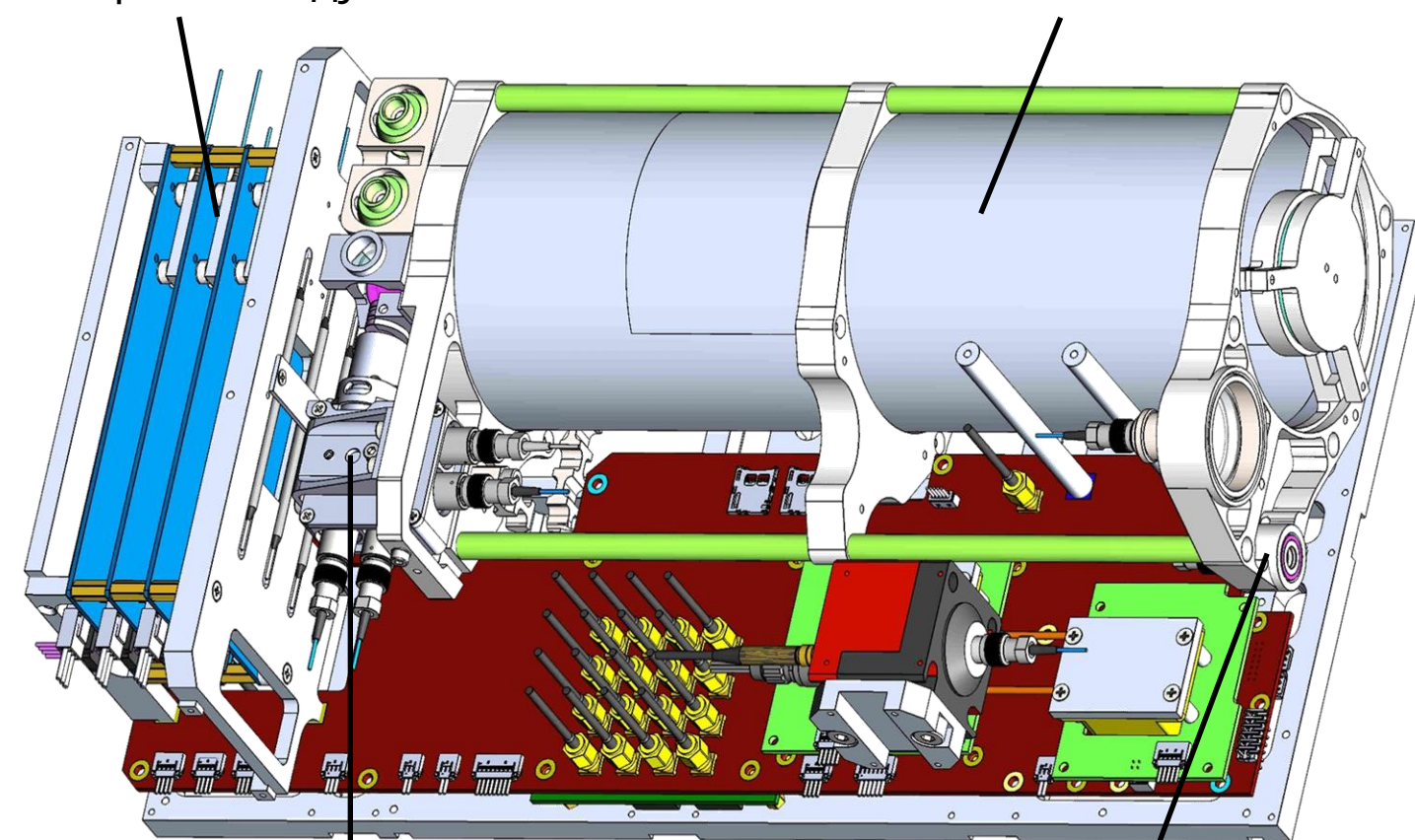
Съемка Солнца для мониторинга солнечной активности и прогноз космической погоды ¹

ПОЛЕЗНАЯ НАГРУЗКА - ПРОТОТИП ПЕРЕДАТЧИКА «БАЗИС»

РАЗРАБОТЧИК	«КуСпэйс Технологии»
ГАБАРИТЫ / МАССА	До 7U / 9 кг
ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ	До 110 Вт
АПЕРТУРА	90 мм
ДЛИНА ВОЛНЫ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ	852 нм \ 532 нм
ЧАСТОТА ВЫХОДНОГО ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА	до 100 МГц (квантовый) до 1 ГГц (телеком)

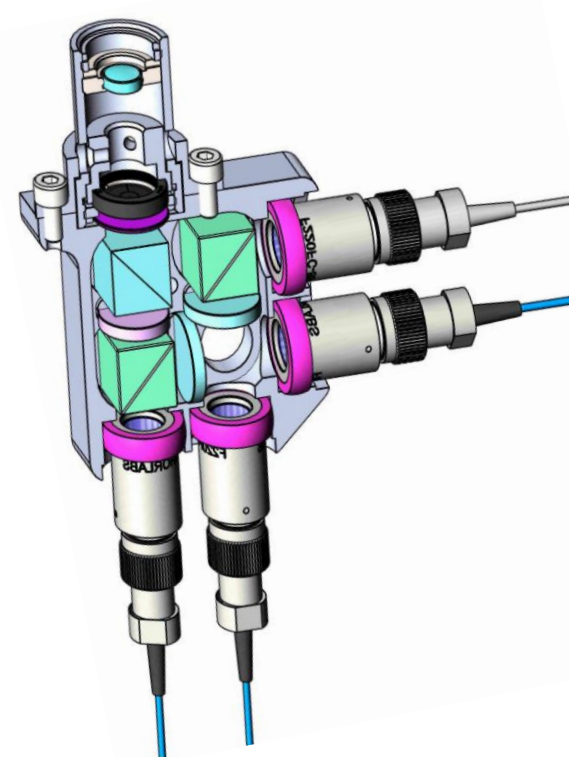
Лазерные модули

Телескопическая система



BB84-модуль кодирования фотонов

Объектив лазера-маяка



BB84-модуль кодирования фотонов

ПЛАТФОРМА - CubeSat 16U

РАЗРАБОТЧИК	«Орбитальные Системы»
ЦЕЛЕВАЯ ОРБИТА МКА	Круговая солнечно-синхронная орбита, 550-650 км
ГАБАРИТЫ / МАССА МКА	226,3 x 226,3 x 454 мм / 22 кг max
СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ	Точность ориентации: Трёхосная ориентация: $\pm 0,1^\circ$, $14''/с$; Солнечная ориентация: 5° Датчики: Звездные и солнечный датчики, магнитометр, GPS/ГЛОНАСС-приемник Исполнительные органы: Магнитные катушки, маховики
РАДИОКОМПЛЕКС	
служебный обмен	УКВ, полудуплекс, прием / передача 2400-38400 бит/с
передача целевой инф-и	S-диапазон, полный дуплекс, передача 1-4 Мбит/с, прием 0,5-2 Мбит/с

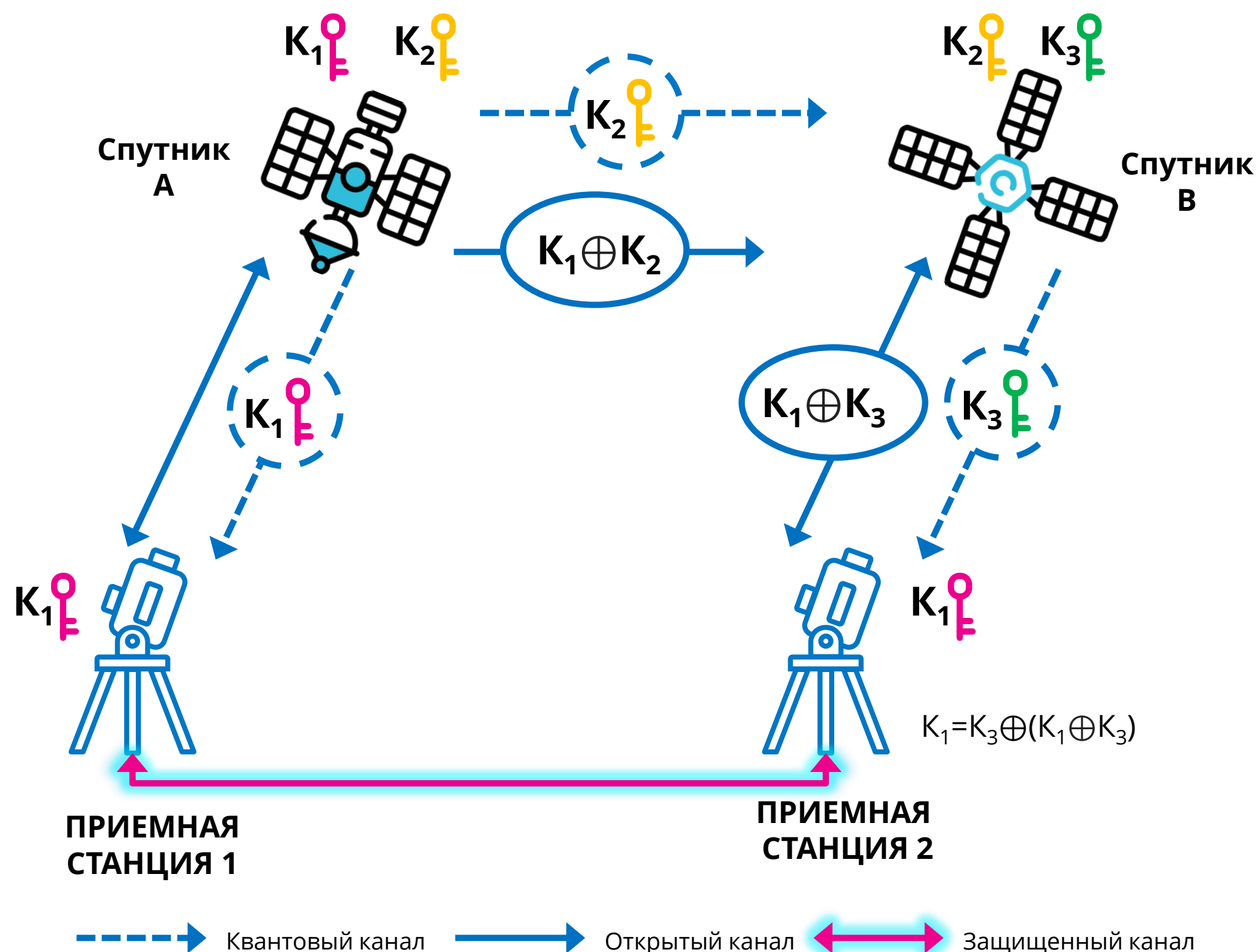
Результаты: Завершен технический проект

- Определены ключевые функциональные, схемные и конструкторские решения, подтверждены модельными расчетами
- Определены конфигурации прибора и платформы
- Ведется разработка управляющей электроники
- Проведены испытания макетов отдельных систем передатчика и МКА: вибродинамические, тепловые

[1] Обеспечивается прибором второй полезной нагрузки – солнечным телескопом (разработка ИСЗФ СО РАН)

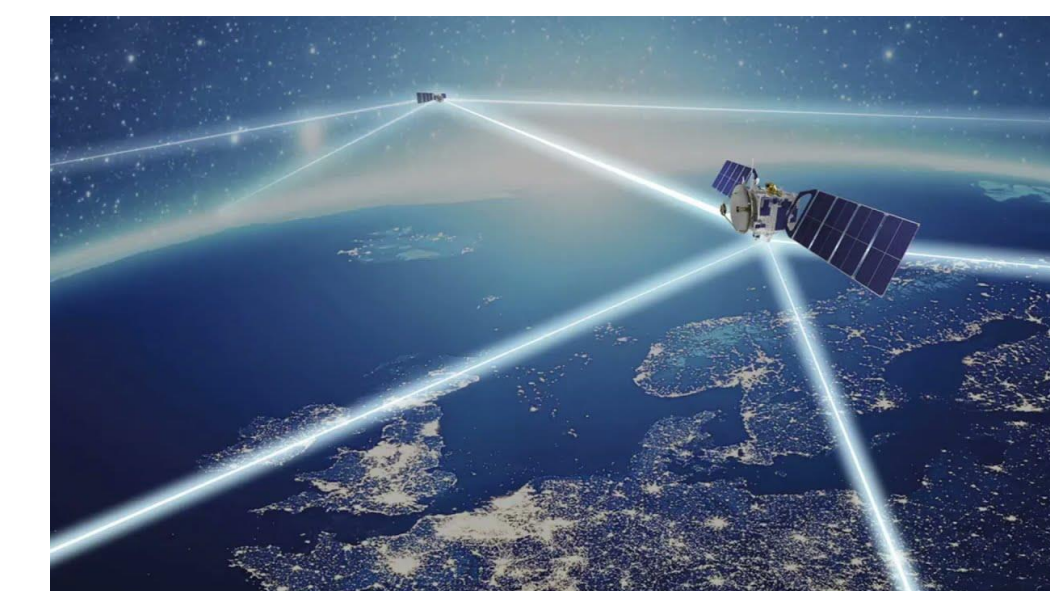
ПОЛНОЦЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СКРК ВОЗМОЖНА ТОЛЬКО В ВАРИАНТЕ ГРУППИРОВКИ СПУТНИКОВ

Обмен ключами по каналам «Спутник – Пользователь» и «Спутник – Спутник»¹



Результаты моделирования группировки из 6 /16 КА для случая «передача ключей в посольства (G20)»²

G20	6 satellites				16 satellites			
	Message size [Mbit]				Message size [Mbit]			
Location	SSO	60deg 2p/3s	60 deg 3p/2s	60 deg 16p/1s	SSO 1p/16s	SSO 1p/16s ISL	60 deg	60deg 1p/6s ISL
Ankara	49.55	40.86	38.47	39.97	129.73	182.76	102.43	157.91
Beijing	42.01	34.48	35.37	34.38	106.62	170.66	94.54	157.91
Brasilia	41.81	37.00	36.58	38.55	109.64	182.76	102.06	157.91
Brussels (Europe)	23.82	26.97	26.72	27.92	61.68	122.57	72.53	143.71
Bueno Aires	45.48	39.02	38.44	39.58	121.02	182.76	99.46	157.91
Canberra	43.61	39.31	38.44	37.43	118.44	182.13	104.22	157.91
Delhi	42.50	37.54	36.10	36.79	112.53	178.17	97.34	157.91
Jakarta	24.89	22.43	22.40	22.94	66.49	131.33	59.02	118.03
Mexico City	51.99	46.07	47.02	47.28	143.21	182.76	124.05	157.91
Moscow	17.83	26.90	25.85	27.24	47.05	94.10	74.31	146.06
Ottawa	32.51	30.11	31.10	28.59	87.89	140.69	79.39	155.66
Pretoria	54.26	48.42	48.69	47.47	143.50	182.76	125.99	157.91
Riyadh	68.12	59.46	59.39	58.74	182.76	182.76	157.91	157.91
Seoul	37.91	34.36	34.69	32.16	99.07	151.31	90.08	157.91
Tokyo	33.65	29.60	28.87	31.56	90.37	143.32	80.14	156.34
Washington	37.97	34.77	34.16	35.86	108.45	178.29	93.76	157.91
Average	40.49	36.71	36.39	36.65	108.03	161.82	97.33	153.55



Использование межспутниковых связей (ISL) увеличивает пропускную способность группировки на 20-100%

НЕКОТОРЫЕ АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, КОТОРЫЕ УЖЕ НУЖНО УЧИТЫВАТЬ ПРИ РАЗРАБОТКЕ:

- Схема (модель) использования сервиса (Use case)
- Оптимальный размер и конфигурация группировки
- Группировка – это сеть связанных спутников, или независимые КА?

[1] Wang J, Chang L, Chen H, Zhu Z. Networking Feasibility of Quantum Key Distribution Constellation Networks. Entropy

[2] Vergoossen T., Loarte S., Bedington R., Hans Kuiper H., Ling A., Modelling of satellite constellations for trusted node QKD networks

СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА КРК МОЖЕТ БЫТЬ ПОСТРОЕНА НА БАЗЕ АППАРАТОВ ФОРМАТА CubeSat



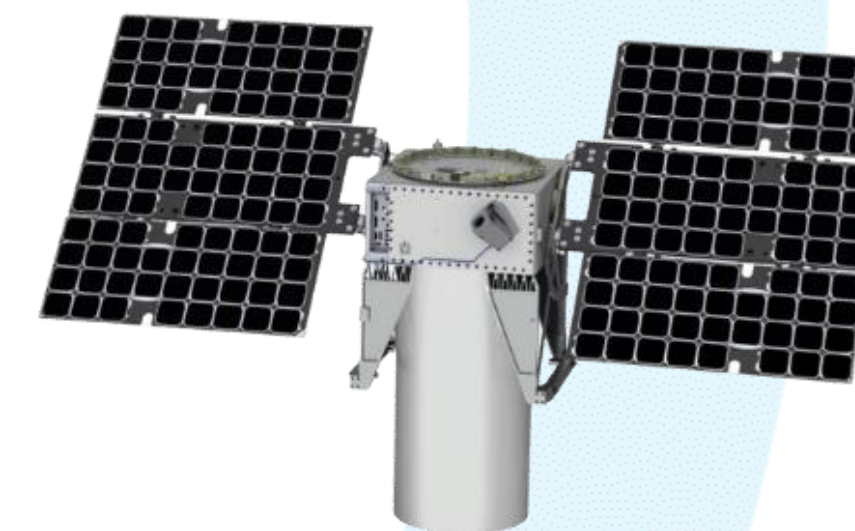
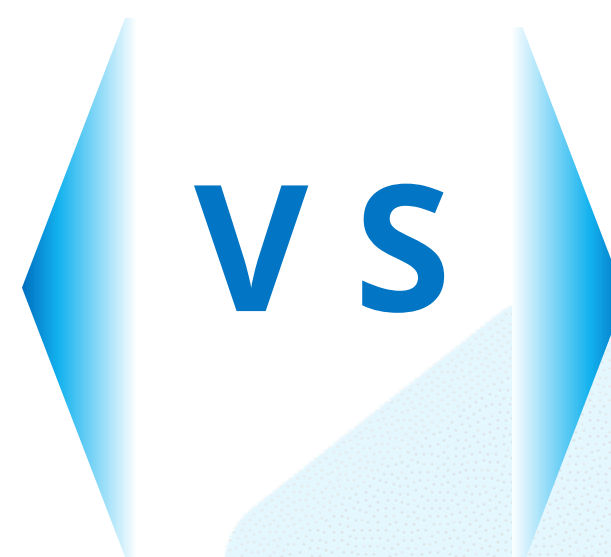
Спутник CubeSat 12U ¹

ПОЛЕЗНАЯ НАГРУЗКА

Объем ПН / МАССА	9U max / 16 кг max
ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ	100 Вт (пиковая)
ИНТЕРФЕЙСЫ	I2C, UART, CAN, SPI, 100BASE-TX Ethernet port, RS422

ПЛАТФОРМА

РАЗМЕР	322x215x215 мм
МАССА ПЛАТФОРМЫ	6,5 кг
ПОТРЕБЛЕНИЕ СЛУЖЕБНЫХ СИСТЕМ	7 Вт
СРОК АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ	2-3 года



Малый спутник ²

Объем ПН / МАССА	520,7 x 424,18 x 685,8 см / 70 кг
Доступная мощность	222 / 444 Вт (пиковая)

МАССА ПЛАТФОРМЫ	40-50 кг
СРОК АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ	2-5 лет

ПРЕИМУЩЕСТВА:

- Меньшая стоимость: ориентированы на унифицированные компоненты (COTS)
- Меньший размер КА – быстрее /дешевле вывод и развертывание группировки

НО ПРИ ЭТОМ:

- Меньший объем для размещения ПН: ограничения на оптическую часть, меньше возможностей для резервирования
- Меньше доступная мощность
- Меньший срок существования КА

ПРЕИМУЩЕСТВА:

- Большой доступный объем и мощность
- Возможность для резервирования систем
- Возможность для кастомизации и установки доп.систем по индивидуальные требования
- Большой срок существования КА

НО ПРИ ЭТОМ:

- Дороже
- Больший сроки разработки / производства / испытаний
- Больше ограничений на пусковые опции

1. Квантовые компьютеры все ближе к практической применимости. Их использование в качестве средства для взлома неизбежно
2. Технология КРК может стать ответом на квантовую угрозу
3. Системы КРК в свободном пространстве могут стать дополнением оптоволоконным системам КРК
4. Технологии спутниковых КРК еще только предстоит дорасти до практически применимого продукта, для чего нужно решить много инженерных задач
5. Прогресс в квантовых инициативах стран-лидеров позволяет говорить, что реально применимые спутниковые системы КРК могут появиться в течение 10-15 лет
6. Спутниковые технологии связи и защиты информации (включая КРК) рассматриваются как часть «обеспечения» защиты суверенитета
7. В России есть свои разработчики систем КРК: есть подтвержденный опыт в создании наземного сегмента СКРК, ведутся работы по созданию спутника-демонстратора с передатчиком КРК
8. Для реализации всех возможностей, заложенных в технологии КРК, потребуется создание спутниковых группировок. Эта отдельная многопараметрическая задача, которую потребуется решить



Системы спутниковой оптической связи и квантовой криптографии

Валентин Толстых

Руководитель проекта
«КуСпэйс Технологии»

+7 910 404-12-97

v.tolstykh@goqrate.com

Дмитрий Плохов

Менеджер проектов
«КуСпэйс Технологии»

+7 926 096-43-77

d.plokhov@goqrate.com



КуСпэйс ТЕХНОЛОГИИ:

Спин-офф и часть квантовой экосистемы Российского квантового центра



РКЦ

- Фундаментальные и прикладные исследования
- Коммерциализация Технологий
- Трансфер технологий



2010 – год основания. 19 современных лабораторий. Более 900 научных публикаций

8 компаний спин-оффов

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗРАБОТОК КуСпэйс

Системы КРК в свободном пространстве:

Космические, атмосферные

Классическая лазерная связь:

Атмосферная, спутник-спутник, спутник - Земля



Партнёры:



Приложения

СПУТНИКОВЫЕ КВАНТОВЫЕ ИНИЦИАТИВЫ В АКТИВНОЙ СТАДИИ

ДАННЫЕ НА 08.2022

	Инициатива	Страна / Компания	Финансирование	Старт	Запуск	Текущий статус	Формат космической части	Особенности проекта
ПРАВИТЕЛЬСТВО / НАУКА	QUESS – Micius ^{1,2}	Китай	Грант, \$100 М ¹	2011	2016	Запущен, функционирует	Легкий спутник, 630 кг	Первый в мире спутник квантовой связи. Установка канала связи между Пекином и Веной (~7500 км), Протокол BB84
	SpoQy 1 ^{3,4,5}	Сингапур	Грант ? \$0,1 М (только компоненты)	2013	2019	Запущен, не функционирует	CubeSat 3U, 2,6 кг	Запуск с борта МКС, протокол E91 (на запутанных фотонах)
	SEAQUE ⁶	США	Грант ?	?	2022 / 23 (?)	Подготовка прибора к отправке на МКС	Отдельный модуль (прибор), для установки на МКС	Эксперимент NASA по тестированию КПК с борта МКС. Демонстрация квантового кодирования на запутанных состояниях (протокол E91)
	QEYSSat ^{7,8,9}	Канада	Грант, 2017 - \$1,4 М ⁴ ; 2021 - \$22,8 М ⁵ Ожидаемая стоимость - \$61,5М ⁴	2013	2024 / 25	Технический проект	Специально спроектированная платформа YAM-4, до 90 кг полезной нагрузки	Передача квантового сигнала с Земли на спутник, интеграция с лазерной связью Технологические партнеры Honeywell Aerospace (контрактор), Loft Orbital (интегратор спутника), Blue Canyon Technologies (платформа)
	SPEQTRE / QKD Qubesat ^{10,11,12}	Великобритания, Сингапур	\$11,6М	2018	2023 / 24	Выполнен технический проект (CDR)	CubeSat 12U	RAL SPACE (интегратор), ISISPACE (платформа), SpeQtral (квантовая часть)
	Jinan-1 ¹³	Китай	>\$15М	?	2022	Запущен, функционирует	Миниспутник, около 100 кг	Продолжение проекта QUESS – Micius . Протокол на запутанных фотонах
	EAGLE-1	Евросоюз	?	2024-2025	2022	2024-2025	Миниспутник	В рамках программы EuroQCI с финансированием. Реализуется консорциумом во главе с SES. Среди участников Airbus, Arianespace, Eutelsat, Hispasat, OHB, Orange, Telespazio, Thales Alenia Space
ПРАВИТЕЛЬСТВО / БИЗНЕС	Next Gen Satellite QKD / QKDSat ^{14,15,16,17,18,19}	Великобритания	Более \$30 М (экспертно) Грант \$5,9 М + привлеченные инвестиции	2020	2023 / 24 (?)	?	Миниспутник, 300 кг	Основной участник Arqit. Технологические партнеры: BT, Toshiba Research labs, Fraunhofer UK Research, ESA, Northrop Grumman, British Telecommunications, Virgin Orbit Собственный протокол ARC19 Цель: создать квантовый модуль для интеграции в спутниковые платформы. Результаты будут использованы в разработках Arqit второго поколения, и потенциально в OneWeb План: запуск 2 спутников, создание сети QuantumCloud
	ROKS / QUARC ^{20,21,22,23}	Craft Prospect (Великобритания)	2021 - \$2,6М (+ \$2,6М в совместный проект с Quantum Dice по созданию КГСЧ) ²²	2018	2023 / 24	Технический проект?	CubeSat 6U	Технологический партнер Craft Prospect (интегратор, проектирование платформы) Концепт предполагает создание спутниковой системы КПК из 15 МКА ¹⁷
	QUBE / QUBE II ^{24,25,26}	Германия	\$14,6М	2022	2025	Концепция	CubeSat 12U, около 10 кг	Консорциум: во главе с OHB System AG, Zentrum für Telematik Продолжение проекта QUBE Результаты должны позволить развернуть сеть из 10-20 МКА, обеспечивающих квантовую защиту связи
БИЗНЕС	SpeQtral-1 ²⁷	SpeQtral (Сингапур)	Собственные / привлеченные инвестиции	2022	2024	Технический проект?	?	Развитие проекта SpoQy 1, протокол E91
	Базис (Импульс-2)	QSpace (Россия)	Привлеченные инвестиции + гранты	2021	2025 / 26	Технический проект, компоненты частично разработаны и испытаны	CubeSat 16U Есть вторая полезная нагрузка (условия «Универсат»)	Протокол BB84 Технологические партнеры: Орбитальные системы (разработка платформы и контейнера, интеграция), Дефан. Научный партнер: МИСиС, РКЦ пуск по программе «Универсат»

1. Micius

1. <https://www.aerospace-technology.com/projects/micius-quantum-communication-satellite/>
2. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/q/quess>
Обзор результатов эксперимента см. Lu C.-Y. et al. "Micius quantum experiments in space", Rev. Mod. Phys. 94 (2022)

2. SpooQy 1

3. Работы проводились по гранту NRF-CRP12-2013-02 (принято за старт проекта), первая публикация в 2015 г
4. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/spooqy-1>
5. System design and orbit analysis for SpooQySat-1. A QKD experiment satellite (<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A7becfcc6-6cd7-4da3-a654-fd3a08023ffc>), §3.4.2
Обзор результатов см. Villar A. et al. Entanglement demonstration on board a nano-satellite, Optica 7, 734-737 (2020)

3. SEAQUE

6. <https://spaceexplored.com/2022/03/22/nasa-to-test-quantum-experiment-using-the-nanoracks-airlock-on-the-iss/>

4. QEYSSat

7. <https://uwaterloo.ca/institute-for-quantum-computing/qeyssat>
8. <https://spaceq.ca/canadian-qeyssat-quantum-satellite-program-gets-next-round-of-funding/>
9. <https://spaceq.ca/honeywell-aerospace-wins-30-million-contract-to-build-qeyssat-satellite/>

5. SPEQTRE / QKD Qubesat

10. <https://www.quantumlah.org/about/highlight/2018-09-singapore-uk-quantum-communications-networks>
11. <https://www.isispace.nl/news/isispace-selected-to-develop-12-unit-cubesat-platform-for-emerging-quantum-key-distribution-mission/>
12. <https://www.isispace.nl/news/quantum-encryption-spacecraft-closer-to-launch/>

6. Jinan-1

13. <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3186802/china-launches-new-satellite-important-step-towards-global>

7. Next Gen Satellite QKD / QKDSat (Arqit)

14. <https://www.ukri.org/wp-content/uploads/2021/09/UKRI-280921-UKQuantumTechnologiesChallengeTheDirectory.pdf>
15. <https://www.space.com/arqit-quantum-key-distribution-space>
16. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/q/qkdsat>
17. <https://virginorbit.com/the-latest/virgin-orbit-to-launch-quantum-encryption-satellites-for-arqit/>
18. <https://www.newspace.im/constellations/arqit>
19. <https://spacenews.com/arqit-raising-400-million-with-a-spac-to-launch-quantum-encryption-satellites-in-2023>

8. ROKS / QUARC (Craft Prospect)

20. <https://pressat.co.uk/releases/craft-prospect-limited-announce-major-investment-from-c4c-plc-7c2790c9f275b560bd585b538e1e3f41/>
21. <https://www.mdpi.com/2410-387X/4/1/7>
22. <https://www.insider.co.uk/news/glasgow-space-company-secures-funding-25470388>
23. <https://www.space.ox.ac.uk/news/oxford-spin-out-announces-completion-of-their-2m-pre-seed-funding>

9. QUBE / QUBE II

24. <https://www.telematik-zentrum.de/en/projects/qube/>
25. <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4081&context=smallsat>
26. <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/qube-2>

10. SpeQtral-1

27. <https://speqtral.space/speqtral-announces-speqtral-1-quantum-satellite-mission-for-ultra-secure-communications/>

11. EAGLE-1

28. <https://www.eoportal.org/other-space-activities/euroqci#next-steps-for-the-euroqci>
29. <https://www.aviaport.ru/digest/2021/06/07/677005.html>
30. <https://www.aviaport.ru/digest/2021/06/07/677005.html>