

Технологии энергоперехода 4.0

Андрей Осипцов, д.ф.-м.н.

Профессор

Директор проектного центра по энергопереходу и ESG, Сколтех



Москва - 2022

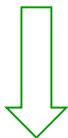
- Экономические последствия углеродного налогообложения
- Технологический спектр энергоперехода 4.0
- Приоритетные направления технологического развития для РФ

Paris Agreement

- Temperature increase well below 2°C by 2100
- Low carbon economy
- 194 countries signed (out of 197)
- Russia signed in 2019 (Order N666 as of 04.11.2020)

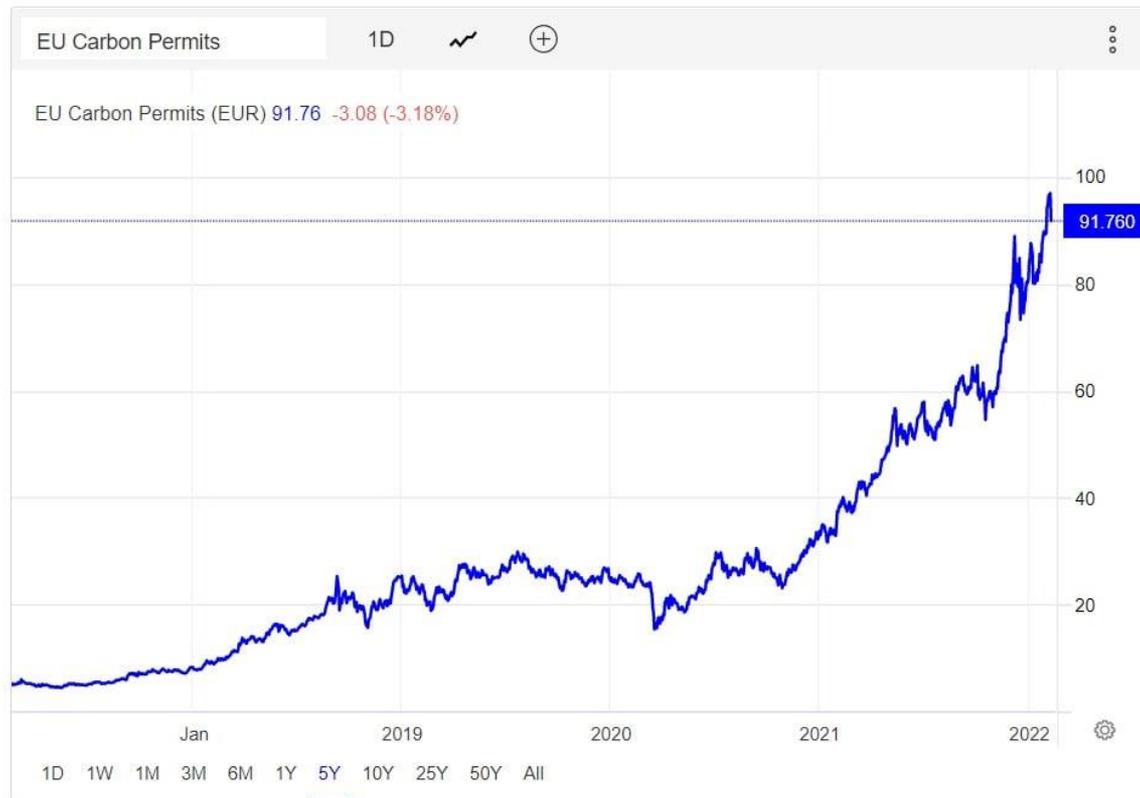
European Green Deal

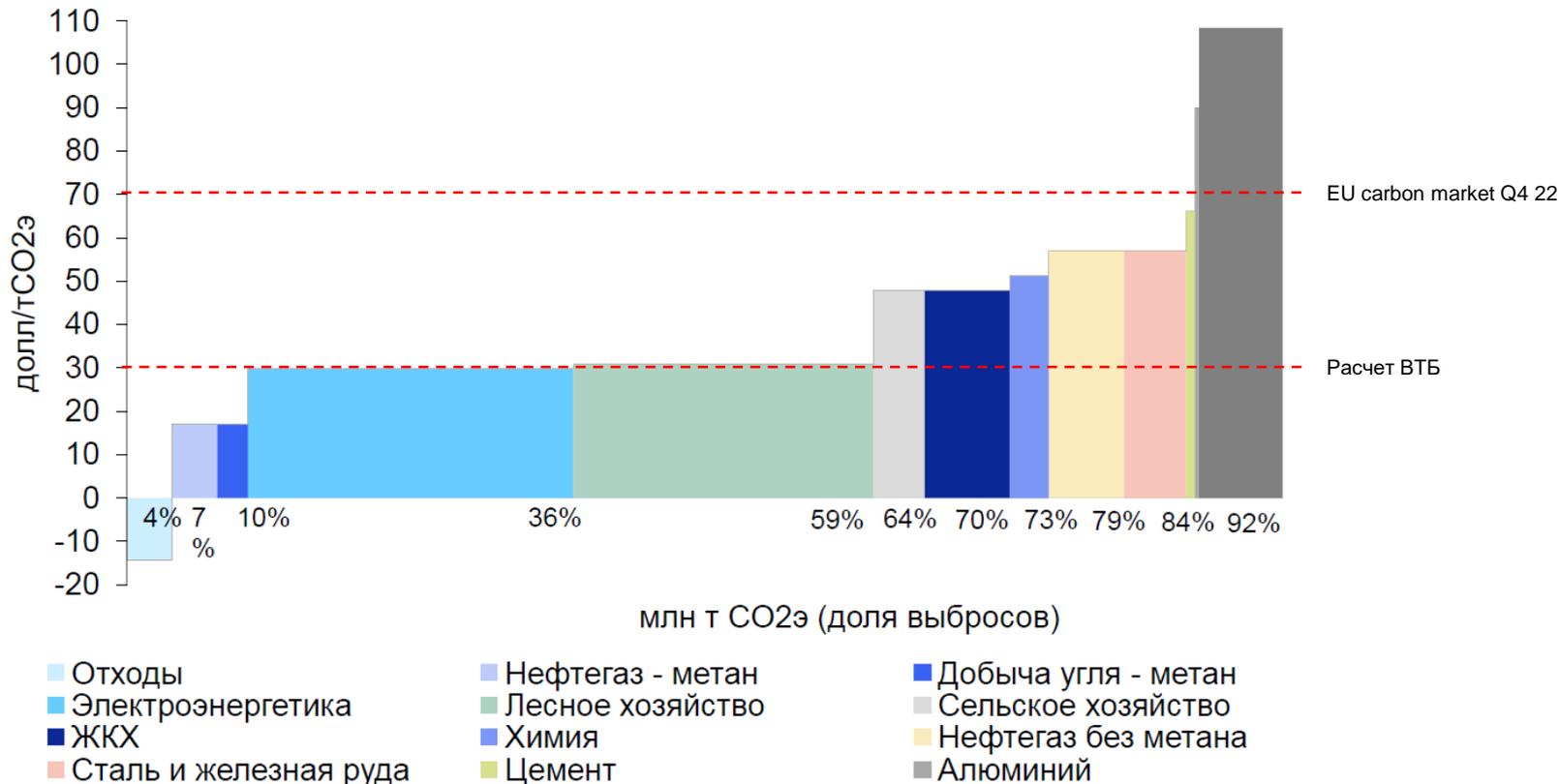
- no net emissions of greenhouse gases by 2050
- economic growth is decoupled from resource use
- no person and no place is left behind



Jul 2021: EU carbon border tax ~50 EUR/ton CO₂

Potential loss estimates vary from \$3bn a year (Russian natural resources ministry) to a KPMG forecast of about \$60bn between 2022 and 2030.





Целевой сценарий: эффект на цены в РФ от введения углеродного налогообложения

Введение углеродного ценообразования в России приведет к росту затрат производителей.
В результате вырастут конечные цены на эту продукцию.

Прирост цен на продукцию относительно текущих цен на каждые 700 руб. / т CO₂-экв. при введении углеродного ценообразования:

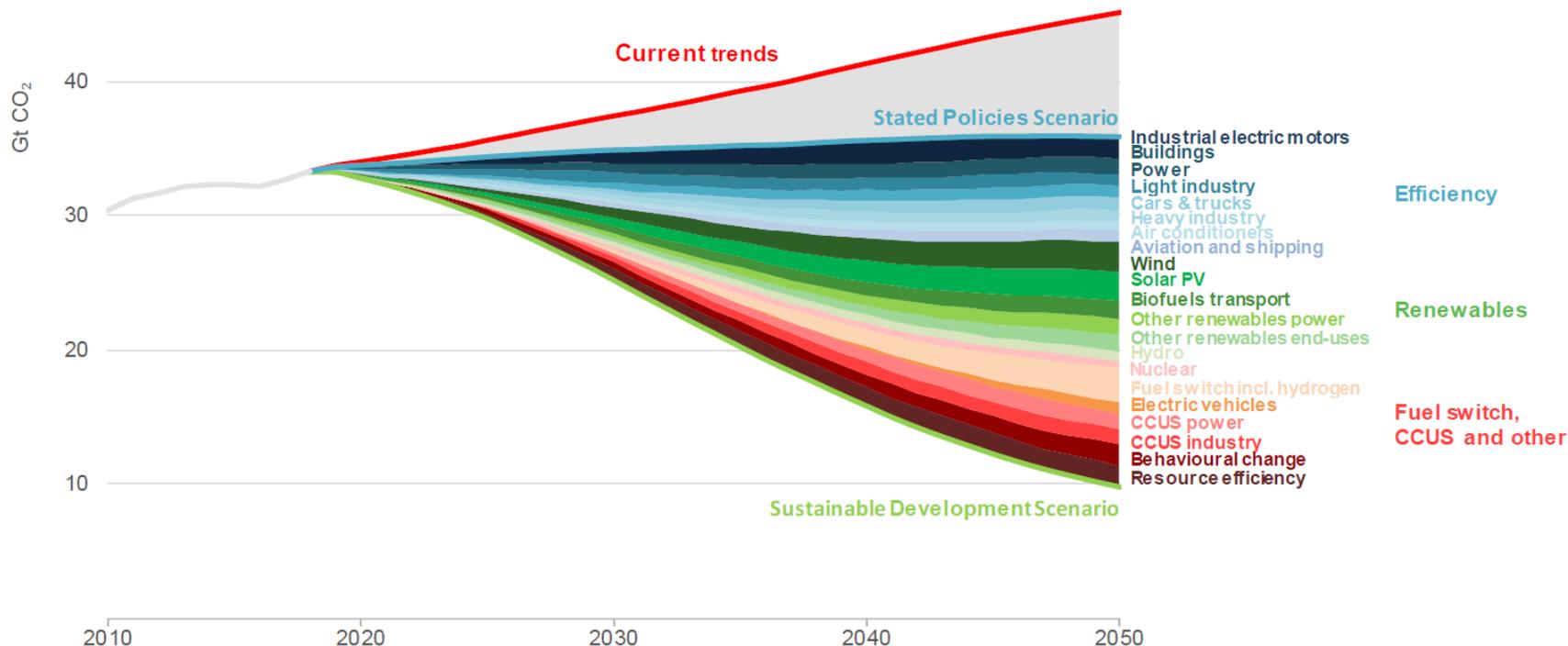
	Ед. измерения	Текущая цена в России, 2021	Прирост цен при введении цен на углерод в размере 700 руб. / т CO ₂ -экв.		Цена в России при введении цены на углерод	При цене 70 \$/тCO ₂
Электроэнергия	руб./кВтч	5	0,2	4,9%	5,2	34%
Тепло	руб./Гкал	1 390	217	15,6%	1 607	109%
Нефть	руб./т	34 560	89	0,3%	34 649	4%
Бензин-92	руб./л	45,3	0,2	0,4%	45,5	3%
Природный газ	руб./тыс. куб. м	5 430	113	2,1%	5 543	15%
Уголь	руб./т	2 280	89	3,9%	2 369	27%
Сталь	руб./т	53 630	1 965	3,7%	55 595	26%
Цемент	руб./т	3 970	252	6,3%	4 222	44%
Азотные удобрения	руб./т	14 310	1 240	8,7%	15 550	61%

Инфл. +6%

Средневзвешенный прирост цен в экономике (разовая надбавка к инфляции): 0,8%

	Ближний горизонт 2025	Средний горизонт 2035	Дальний горизонт 2060
Социум	Удаленная работа, Атомизация общества Падение доходов, рост неравенства Развилка: “реальная” или “псевдо”-экология Последствия демографического провала 90х	Осознанное самоограничение vs недовольство соц. статусом Сокращение доли трудоспособных граждан <50% Треть населения пожилого возраста (44млн) ESG (социальный) рейтинг человека + ИИ	Географическое и социальное расслоение Появление топливной бедности (fuel poverty) Идеал для 2/3 семей РФ – индивидуальное жилье
Жилье	Рост тарифов ЖКХ при введении углеродного налога в РФ При 70\$/tCO2: стоимость отопления удвоится	Спрос на ИЖС (ипотека на типовые дома) Альтернативные технологии отопления (тепловые насосы + геотермальные источники) Энергоэффективность в строительстве многоквартирных домов Индивидуальный учет потребления тепла	Укрупнение агломераций при ускорении транспорта В центре городов – жилье арендуемое и дорогое “Одноэтажная Россия”
Автотранспорт	От владения к использованию Кибербезопасность, AI / AR / VR Развилка: бензин vs газомоторное топливо?	Электромобили (до 350км) Дефицит кобальта и лития для производства батарей Ниша для водородных автомобилей (дальние перевозки)	Владение автомобилем – роскошь
Трансформация инфраструктуры	Адаптация энергосетей под ВИЭ Рост количества зарядных станций для электромобилей	Адаптация энергосетей под ВИЭ Появление водородных заправок (ГТС+пиролиз?) Развитие ВСМ между центрами и городами-спутниками	Снижение востребованности инфраструктуры ДВС
Энергетика	Энергоэффективность Рост доли ВИЭ, системы накопления CCUS как новая отрасль Метан-водородные газотурбинные установки (ГТУ)	Энергоэффективность Развитие водородной энергетики Микро ГТУ (10-30кВт на одно домохозяйство) Позаэтапный отказ от угля CCUS: прием CO2 из-за рубежа для хранения	Отказ от угля Сохранение газа в электрогенерации и отоплении ВИЭ, АЭС и гидро доминируют в энергобалансе DAC (direct air capture), последняя миля декарбонизации
Экологизация и декарбонизация	Глобальное принуждение к декарбонизации (трансграничный углеродный налог – CBAM) Биржа углеродных единиц (квот на выбросы CO2) в РФ	Лесоклиматические проекты Ставка заемного финансирования привязана к ESG-рейтингу Налог на выбросы парниковых газов в РФ	Углеродная нейтральность как баланс выбросов и поглощения Газ, ВИЭ, АЭС, водород vs. Леса и экосистемы

Energy-related CO₂ emissions and CO₂ emissions reductions by measure in the SDS



Электрификация

- Электромобили
- Накопители

ВИЭ

- Солнечная энергетика
- Ветрогенерация
- Гидрогенерация
- Адаптация энергосетей

Агротехнологии

- “Молоко без коровы”, снижение выбросов метана
- Искусственное мясо
- Многолетние зерновые

CCUS (улавливание и хранение углерода)

- Улавливание CO₂ из дымовых газов
- Транспортировка CO₂ по трубам
- Геологическая секвестрация (закачка в подземные пласты)
- Прямое улавливание из воздуха DACS

Водород

- Голубой водород из метана с улавливанием CO₂
- Бирюзовый водород (пиролиз)
- Зеленый водород (ВИЭ)
- Транспортировка и хранение
- Крупнотоннажный экспорт
- Метан-водородные ГТУ

Повышение энергоэффективности



Повышение энергоэффективности производственных процессов

- Применение более энергоэффективного оборудования
- Мониторинг и оптимизация работы оборудования
- Повышение доли возобновляемых источников энергии в потребляемой электроэнергии
- Замена покупки электроэнергии на свои собственные энергетические мощности с более высоким КПД



Оптимизация энергопотребления зданий

- Применение светодиодных ламп для освещения помещений
- Цифровые двойники зданий
- Интеллектуальное управление системами HVAC
- Demand-response регулирование
- Оптимизация дневного энергопотребления при помощи накопителей энергии

CCS - Улавливание и хранение углерода

Суть технологии CCS – улавливание и хранение диоксида углерода:

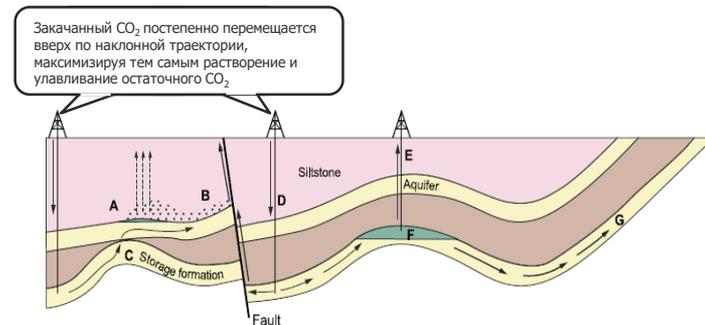
- Улавливание CO₂ из дымовых газов с помощью аминовой очистки или мембранных технологий
- Сжижение и транспортировка CO₂ по трубам
- Закачка по скважинам в геологические пласты на глубине 1-3 км для долгосрочного хранения в виде раствора или осадка в порах

Основные направления применения:

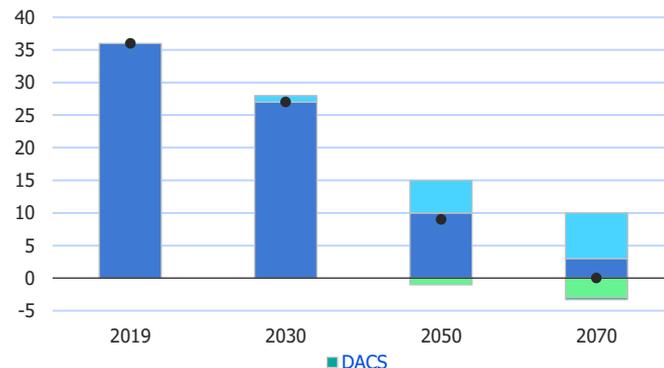
- Продление жизни тепловой энергетики и декарбонизация тяжелой промышленности
- Новый бизнес для нефтегазовых компаний, монетизирующий их компетенции: знание геологии, технологий бурения и закачки в пласт

Ключевые оценки:

- | | |
|---|-------------------------------------|
| • Выбросы GHG в мире в целом: | 34-36 Гт CO ₂ экв. / год |
| • Российская Федерация: | 1.6-1.8 Гт CO ₂ в год |
| • 2020: суммарная мощность проектов CCS | 50 Мт CO ₂ / год |
| • 2030: прогноз суммарной мощности CCS | ~170 Мт CO ₂ / год |
| • 2050: прогноз суммарной мощности CCS | ~5 Гт CO ₂ / год |



Прогноз по выбросам и потенциал снижения за счет CCS*



* в рамках Sustainable Development Scenario

Принципиальная схема CCUS



Точечные источники выбросов CO₂ в промышленности

CO₂, содержащийся в выбросах от промышленных предприятий (цемент, сталь), производства водорода из ископаемого топлива или производства электроэнергии улавливается до того, как он достигнет атмосферы, а затем сжимается и закачивается в пористые горные породы.

Биоэнергетика с улавливанием и хранением углерода (BECCS)

Отходящие газы

Прямое улавливание углерода из воздуха и его хранение (DACCS)

Атмосферный воздух

Химическое разделение

Технологии чистых отрицательных выбросов имеют ключевое значение для достижения нулевых, а затем и отрицательных чистых выбросов. Технология BECCS предусматривает удаление CO₂ из атмосферы растениями, а затем его извлечение из продуктов сгорания при сжигании биомассы. При использовании технологии DACCS CO₂ улавливается прямо из воздуха.

Водоносные пласты для депонирования CO₂

Минерализованные водоносные пласты – это геологические формации, содержащие рассол в пористой породе на глубине более 1 км. CO₂ может закачиваться в породу для депонирования.

Перекачиваемая порода

Закачивание CO₂

Увеличение нефтеотдачи пластов (EOR)

EOR – это группа методов, позволяющих увеличить объемы добычи нефти и газа, одновременно обеспечивая хранение CO₂. В зависимости от практического решения, объем хранимого CO₂ может превышать содержание CO₂ в добываемых углеводородах.

Перекачиваемая порода

CO₂

Зона смешивания

Дополнительная добыча нефти

Решения для использования углерода

Строительные материалы Заполнители, бетон	Химиаты Метанол, этанол	Пластмассы Полимеры	Минерализация Карбонаты
---	-----------------------------------	-------------------------------	-----------------------------------

Использование углерода может раскрыть коммерческий потенциал проектов CCUS в промышленном, сталелитейном, цементном и химическом секторах. Улавливаемый CO₂ может быть использован в качестве сырья для производства ряда продуктов, таких как бетон, метанол, этанол, карбонаты, пластмассы и т. д.

Повышение информированности

Признание CCUS в качестве жизнеспособного варианта действий в области уменьшения воздействия на климат и учет его при разработке национальных планов.

Принятие

Разработка и интеграция мер политики, позволяющих в полной мере коммерциализировать технологии CCUS.

Финансирование

Создание механизма финансирования CCUS и прямых инвестиций в модернизацию энергетической инфраструктуры.

CCUS – опыт США

2020: Федеральные инвестиции от МинЭнерго США (US DOE) в R&D:

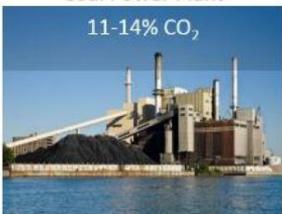
- Carbon capture (улавливание) \$117 млн / год
- Carbon storage (геол. хранение) \$ 79 млн / год
- Utilization (полезное использование) \$ 21 млн / год
- Цель 2030: себестоимость CCUS 30 \$ / тCO₂

Меры налогового стимулирования

- US Section 45Q Tax Credit 12-50 \$ / тCO₂ (налоговая льгота)

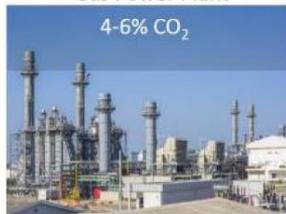
Coal Power Plant

11-14% CO₂



Gas Power Plant

4-6% CO₂



Air Capture

0.04% CO₂



NG Processing Plant

99% CO₂



CO₂ vent

Ammonia Plant

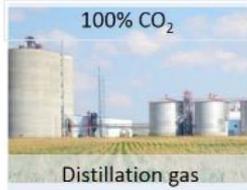
99% CO₂



Stripping vent

Ethanol Plant

100% CO₂



Distillation gas

Cement Plant

~22.4% CO₂



Kiln off-gas

Cost of Capturing CO₂ from Industrial Sources, January 10, 2014, DOE/NETL-2013/1602

Lab-Scale Unit



Bench-Scale Unit

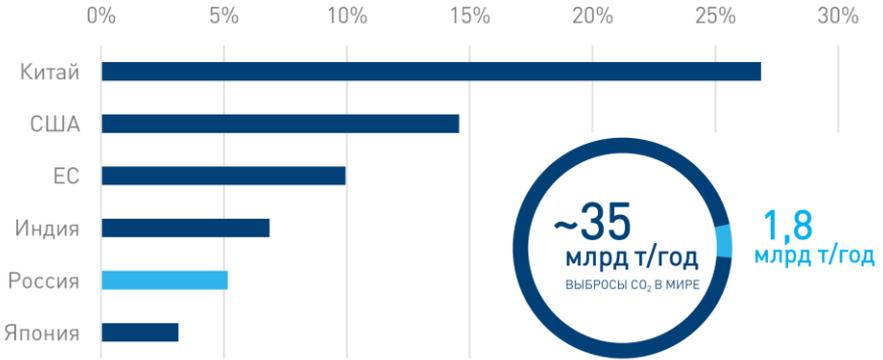


Small Pilot-Scale

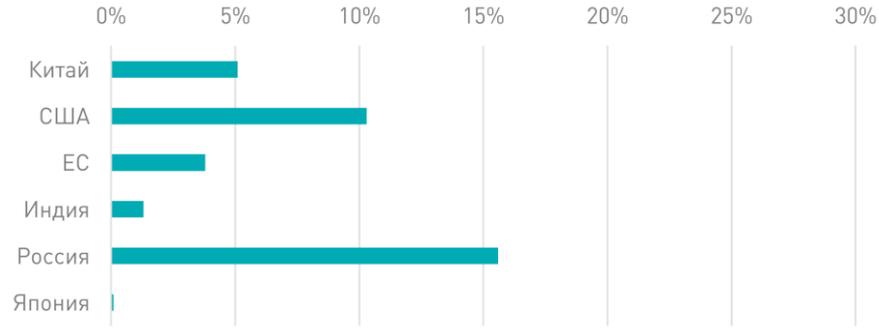
World-class testing capabilities at the National Carbon Capture Center

Структура выбросов в мире в целом

ДОЛЯ ВЫБРОСОВ CO₂ ОСНОВНЫХ СТРАН-ЭМИТЕНТОВ В 2018 Г., %

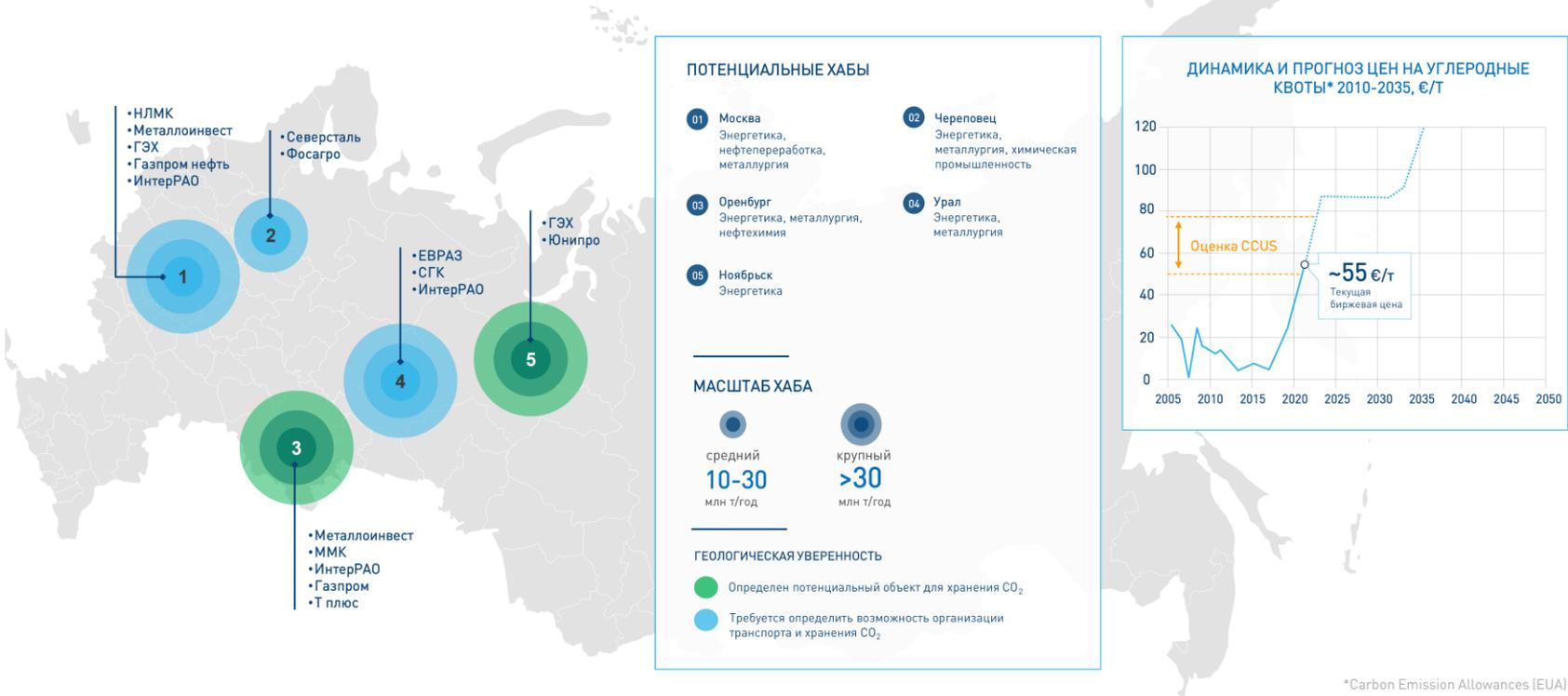


ДОЛЯ В РЕЗЕРВУАРАХ ХРАНЕНИЯ CO₂ В 2018 Г., %



CCUS как новая отрасль в РФ

Клиенты – крупные эмитенты парниковых газов (металл, удобрения, цемент, нефть и газ)



Источник: ПАО Газпром нефть

Декарбонизация металлургического сектора

- **Проблема**

- Металлургия с использованием угля дает вклад 8% в глобальные выбросы парниковых газов
- HYBRIT initiative in which SSAB, LKAB, and Vattenfall collaborate on a process where steel will be produced from iron ore using hydrogen instead of coal
- HYBRIT, short for Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology
- Замена угля электричеством и зеленым водородом

- **Компания H2 Green Steel (Швеция) – пионер в секторе производства “зеленой” стали**

- Ожидаемая мощность 5 млн тонн
- Объем инвестиций 2.6 млрд долл
- ЕС 2030: ожидаемый спрос ~40-60 млн тонн, ожидаемое предложение 30-40 млн тонн

- **Оценки стоимости прямого восстановления железа водородом**

- Полная стоимость производства безуглеродной стали 360-640 EUR/ton
- Высокая чувствительность к стоимости электричества
- Технология становится конкурентноспособной при налоге на выбросы CO₂ на уровне от 34-68 EUR/tCO₂ и стоимости электричества <40 EUR/МВтч



HYBRIT: Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology

- **Альтернативные подходы к производству стали**

- Традиционная доменная печь vs. HYBRIT (Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology)

- **Производство железорудных окатышей**

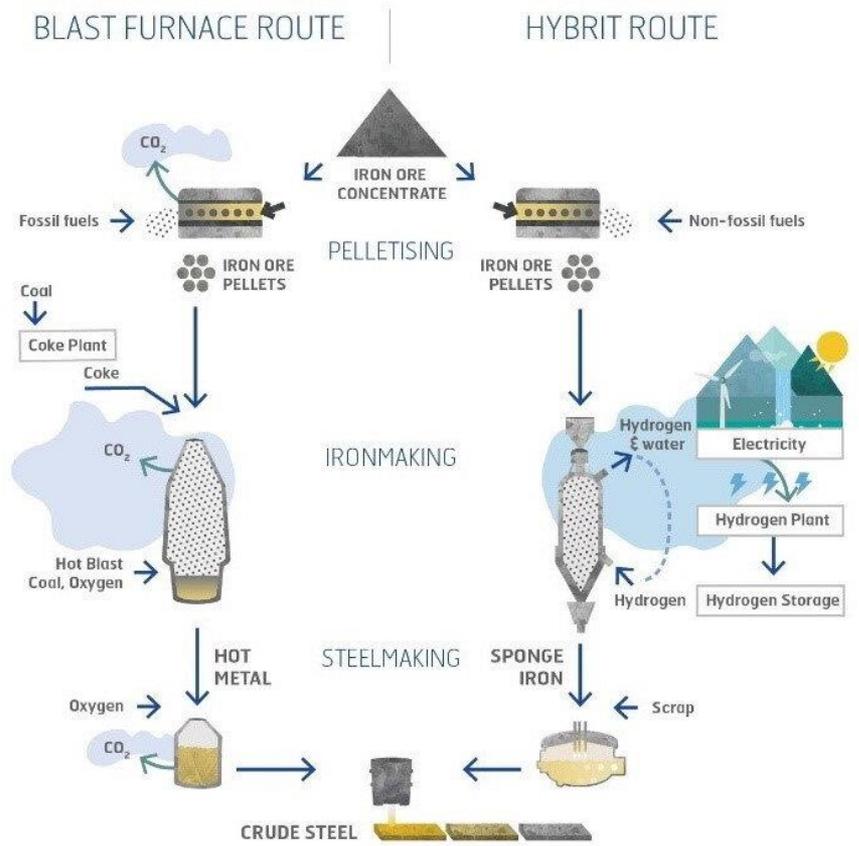
- Использование ископаемых топлив с выбросом CO2 при сжигании vs. использование неископаемого топлива

- **Производство чугуна**

- Каменноугольный кокс получаемый путем спекания каменного угля при температурах ~1000°C без доступа кислорода
- vs. Прямое восстановление железа водородом

- **Производство стали**

- Использование кислорода для удаления избытка углерода с выбросом CO2
- vs. Использование водорода без выбросов CO2



Водородная энергетика: образ будущего в РФ

• Внешний рынок – крупнотоннажный экспорт

- Западный кластер: экспорт метана в Германию, там конверсия в голубой водород.
- Интересы ЕС и Газпрома совпадают (защита рабочих мест в ЕС, контроль за CCUS).
- Восточный кластер: зеленый (ВИЭ, гидро) и желтый (АЭС) водород методом электролиза воды
- Транспортировка CO₂ в РФ для захоронения
- Северный поток-2: две ветки, по одной водород/метан на запад, по другой CO₂ в РФ

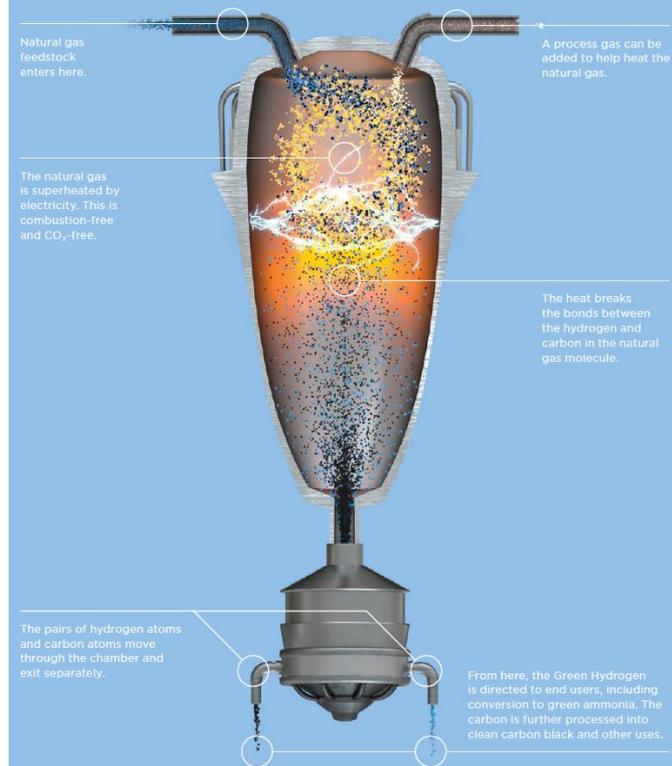
• Внутренний рынок

- Конверсия метана в водород максимально близко к потребителю, минимизация логистического плеча
- Существующая газотранспортная сеть, пиролиз метана для генерации бирюзового водорода и твердого углерода (без выбросов CO₂)
- Водородный транспорт для крупных перевозок на большие расстояния
- Массовое распространение водородомобилей ограничено по соображениям безопасности
- НИОКР по пиролизу: ТПУ, ИНХС РАН, Центр Келдыша (Роскосмос), Сколтех

Технологические вызовы

- Дешевые материалы для трубного транспорта и для физического хранения (емкости)
- Материалы для электролизеров
- Масштабирование технологии пиролиза метана

How Methane Pyrolysis Works



- **Технологии обеспечения экономической и энергетической безопасности РФ**
 - Голубой водород (паровая конверсия метана + CCUS) для крупнотоннажного экспорта по трубам в смеси с метаном
 - Бирюзовый водород: требуется отечественная технология пиролиза метана (партнерства, M&A)
 - Прием CO₂ из-за рубежа для захоронения в РФ: потенциал 1-3 Гт CO₂, рынок 10-100 млрд долл
 - Адаптация инфраструктуры к росту доли ВИЭ
 - Газификация регионов: снижение углеродного следа электрогенерации, конверсия в водород (без выбросов CO₂)
- **Технологии обеспечения конкурентноспособности бизнеса**
 - Новая отрасль CCUS: декарбонизация промышленности, требуется локализация технологии улавливания CO₂ (партнерства, M&A)
 - Прямое восстановление железа водородом
 - Энергоэффективность: цифровизация vs. декарбонизация
 - Снижение углеродного следа электрогенерации: метан-водородные ГТУ (Силовые машины ГТЭ-65В)
 - Биржа углеродных единиц, торговля квотами на выбросы (лесоклиматические проекты)
- **Технологии для сглаживания социальных последствий энергоперехода**
 - Как избежать топливной бедности? Энергоэффективность, тотальный учет/контроль, новые технологии отопления
 - Ипотечные программы для ИЖС, партнерства с застройщиками, типовые проекты индивидуальных домов

Устойчивое
развитие

Раскрытие
нефинансовой
информации

Управление
ESG рисками

ESG
рейтинг

Климатические
и переходные
риски

Технологии
энергоперехода



Skoltech
ESG

Project Center for
Energy Transition
and ESG



Андрей Осипцов, д.ф.-м.н.

**Профессор, руководитель
проектного центра по
энергопереходу и ESG,
Сколковский институт науки
и технологий**

Контакты:

Email: a.osiptsov@skoltech.ru

Cell: +7-926-185-37-85

Whats App, Telegram



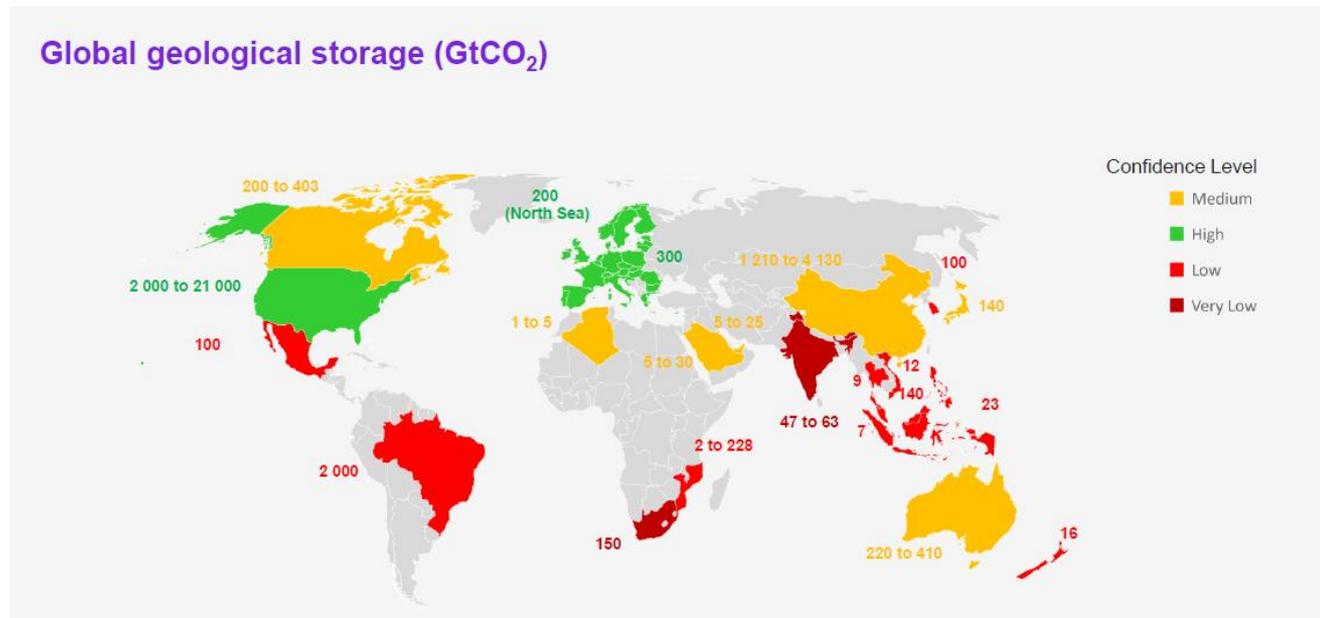
Back up

Повышение энергоэффективности

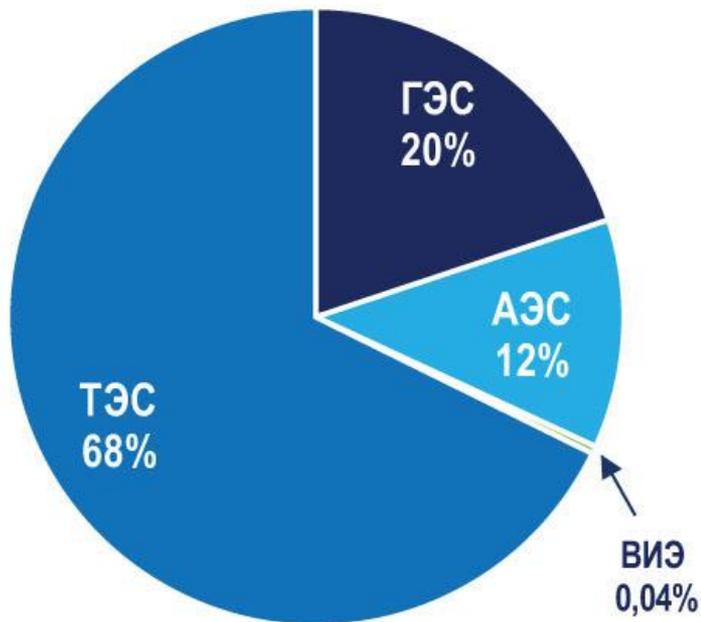
Около 40% общемирового потребления электроэнергии и выбросов приходится на энергосистемы зданий (> 10 ГтСО₂ в 2020 г.). В частности, на заводы, офисы и другие коммерческие здания приходится 14% всех мировых выбросов. По мнению ведущих энергетических агентств именно сектор зданий обладает наибольшим потенциалом для снижения выбросов, который можно достичь с помощью передовых технологий и методик оптимизации энергетических систем



- Актуальная оценка мощностей для захоронения CO2 от 6800 до 30000 Гт CO2
- Для достижения целей Парижского соглашения необходимо достичь уровня 2 Гт CO2/год к 2060



Структура установленной мощности в ЕЭС России



ДИАПАЗОН ЦЕН ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ПРОЕКТОВ НОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА, РУБ. ЗА КВТ-Ч

Источник: YGON Consulting



Key hydrogen technology options

Color coding

Gasification of black coal

Gasification of lignite

Steam methane reforming (SMR)

Steam methane conversion & CCUS

Plasma methane conversion

Electrolysis w/nuclear

Electrolysis w/renewables solar, wind

	NEAR-TERM	LONGER-TERM
Production	Gasification of coal, biomass, and waste with carbon capture, utilization, and storage Advanced fossil and biomass reforming/conversion Electrolysis (low-temperature, high-temperature)	Advanced biological/microbial conversion Advanced thermo/photoelectro-chemical H ₂ O splitting
Delivery	Distribution from on-site production Tube trailers (gaseous H ₂) Cryogenic trucks (liquid H ₂)	Widespread pipeline transmission and distribution Chemical H ₂ carriers
Storage	Pressurized tanks (gaseous H ₂) Cryogenic vessels (liquid H ₂)	Geologic H ₂ storage (e.g., caverns, depleted oil/gas reservoirs) Cryo-compressed Chemical H ₂ carriers Materials-based H ₂ storage
Conversion	Turbine combustion Fuel cells	Advanced combustion Next generation fuel cells Fuel cell/combustion hybrids Reversible fuel cells
Applications	Fuel refining Space applications Portable power	Blending in natural gas pipelines Distributed stationary power Transportation Industrial and chemical processes Defense, security, and logistics applications Utility systems Distributed CHP Integrated energy systems

*US DOE Hydrogen program plan, 2020

Gasification is a process that converts organic or fossil-based carbonaceous materials at high temperatures (>700C), without combustion, with a controlled amount of oxygen and/or steam into carbon monoxide, hydrogen, and carbon dioxide.

SMR – steam methane reforming