



И.А. Башмаков

Декарбонизация глобальной и российской промышленности и низкоуглеродное регулирование

**Центр энергоэффективности – XXI век (ЦЭНЭФ-XXI)
Мы тратим свою энергию, чтобы экономить вашу!**

Если Ваша задача имеет решение – мы его найдем!
www.cenef-xxi.ru 8 (499) 120-9209

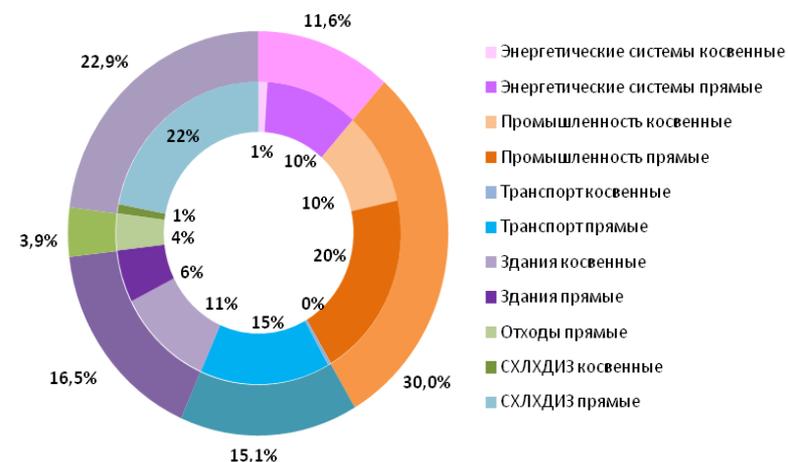
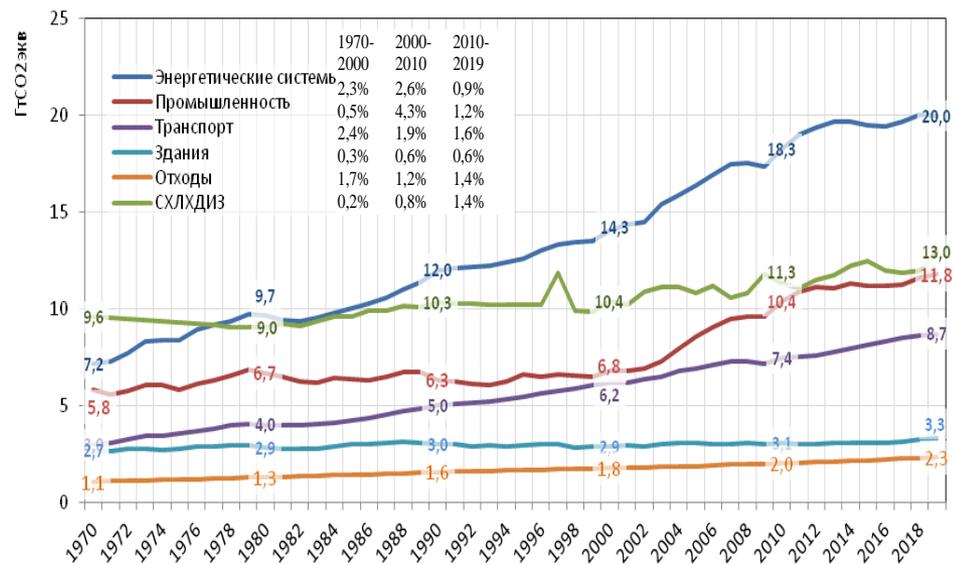
Семинар ИМЭМО РАН и ЦЭНЭФ-XXI «Декарбонизация глобальной и российской промышленности и низкоуглеродное регулирование». 27 декабря 2022 г.



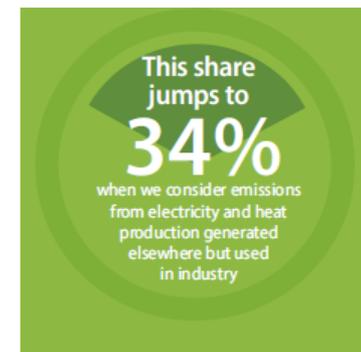
1. Тренды и факторы динамики выбросов ПГ от глобальной промышленности



Мировая промышленность – это сектор с самым быстрым ростом выбросов ПГ с 2000 г. и с ожидаемым самым медленным снижением выбросов к 2050 г.



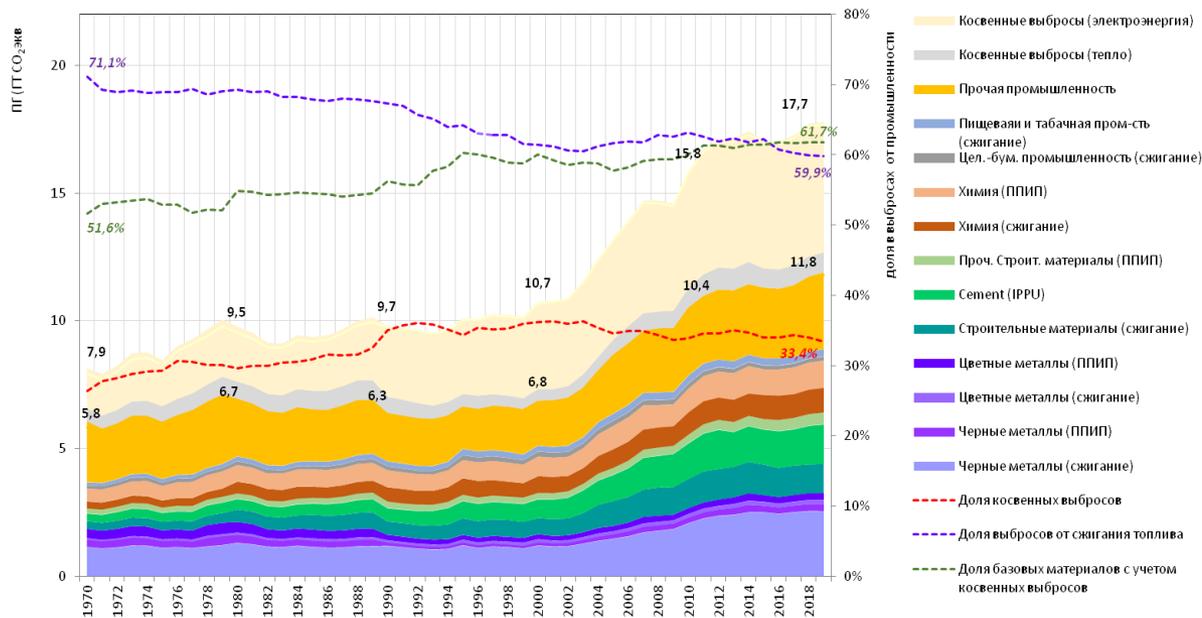
В 2019 году на долю промышленности приходилось 14,1 Гт CO₂-экв., или 24% прямых выбросов, а вместе с косвенными выбросами – 20 Гт CO₂-экв., или 34%.



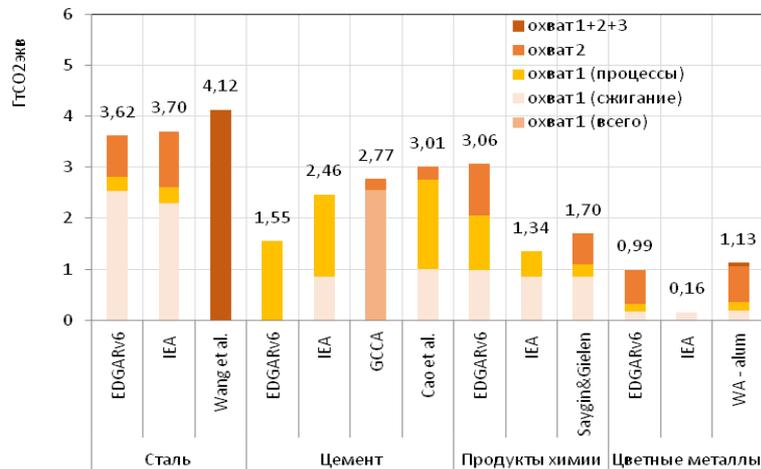
Без учета отходов прямые выбросы ПГ в промышленности достигли 11,8 Гт CO₂ экв., а в сумме с косвенными – 17,7 Гт CO₂ экв (30%).



На долю базовых материалов, в зависимости от уровней охвата источников выбросов ПГ, приходится 10,7-11,8 ГтСО₂экв., или 18-20% всех антропогенных выбросов ПГ



- доля выбросов от сжигания топлива снизилась с 71% до 60% в 1970-2019 гг.
- доля выбросов от промышленных процессов растет
- доля косвенных выбросов росла до 1990 г., а затем стала снижаться

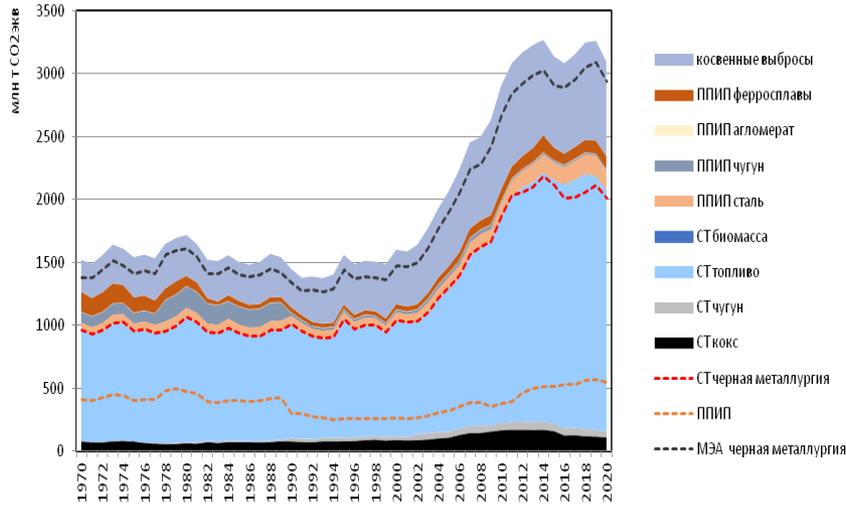


Почти половина всех базовых материалов производится в Китае. Поэтому резкий рывок в экономическом развитии Китая привел к росту суммы прямых и косвенных выбросов, сопряженных с процессами производства базовых материалов, с 6,4 ГтСО₂экв. в 2000 г. до 10,9 ГтСО₂экв. в 2019 г., или на 70%.

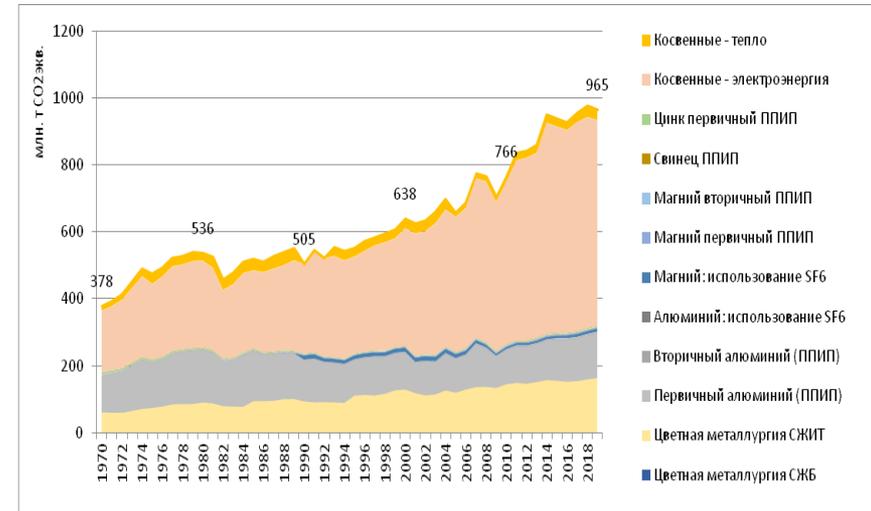


Выбросы заметно росли при производстве всех основных базовых материалов. На их транспортировку приходится еще 1 Гт CO2 выбросов

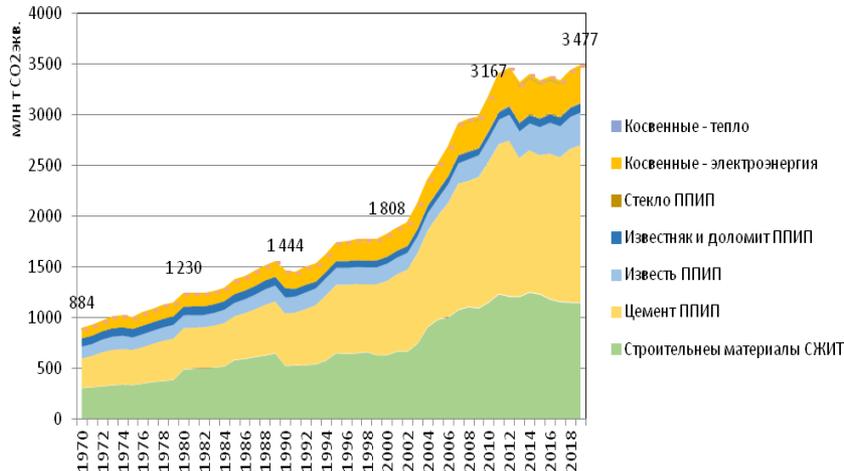
черная металлургия



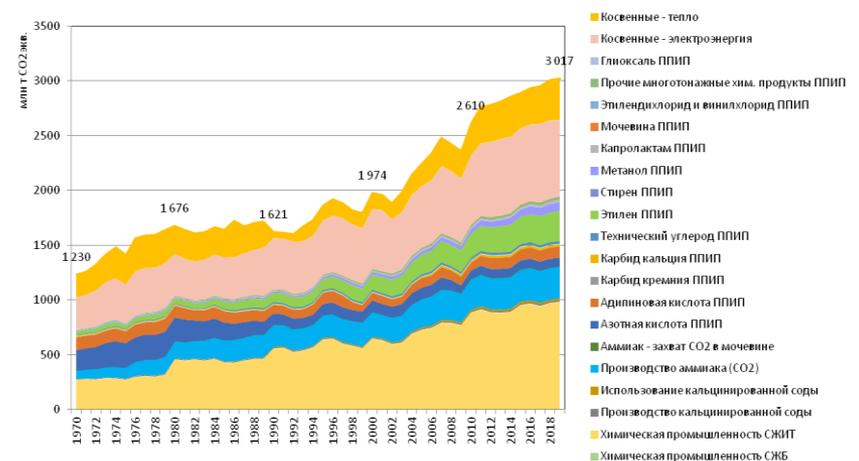
цветная металлургия



строительные материалы



химическая промышленность



$$GHG = POP \cdot \frac{GDP}{POP} \cdot \frac{MStock}{GDP} \cdot \left[\frac{MPR + MSE}{MStock} \cdot Dm \cdot \left(\frac{E}{(MPR + MSE)} \cdot \frac{(GHGed + GHGeind)}{E} + \frac{GHGoth}{MPR + MSE} \right) \right]$$

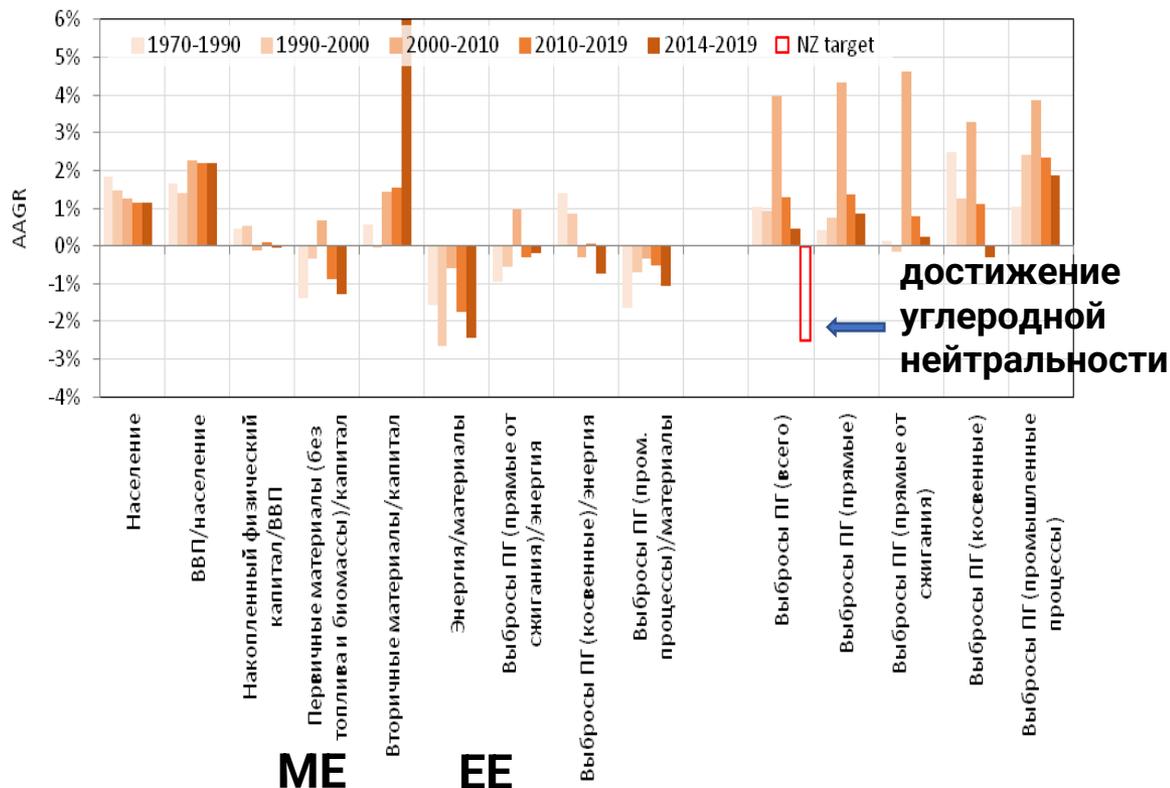
Драйверы динамики выбросов

Декарбонизация спроса	POP	population	demographic policies
	$\frac{GDP}{POP}$	services (expressed via GDP – final consumption and investments needed to maintain and expand stock) per capita	sufficiency and demand management (reduction)
	$\frac{MStock}{GDP}$	material stock ($MStock$ - accumulated in-use stocks of materials embodied in manufactured fixed capital) intensity of GDP	material stock efficiency improvement
	$\frac{MPR + MSE}{MStock}$	material inputs (both virgin (primary materials extraction, MPR) and recycled (secondary materials use, MSE)) per unit of in-use material stock	material efficiency, substitution and circular economy
	Dm	share of allocated emissions – consumption versus production emissions accounting (valid only for sub-global levels)*	trade policies including carbon leakage issues (localization versus globalization)
Декарбонизация производства	$\frac{E}{(MPR + MSE)}$	sum of energy use for basic material production (Em), processing and other operational industrial energy use ($Eoind$) per unit of material inputs	energy efficiency of basic materials production and other industrial processes
	$\frac{(GHGed + GHGeind)}{E}$	direct ($GHGed$) and indirect ($GHGeind$) combustion-related industrial emissions per unit of energy	electrification, fuel switching, and energy decarbonisation (hydrogen, CCUS-fuels)
	$\frac{GHGoth}{MPR + MSE}$	emissions from industrial processes and product use, waste, F-gases, indirect nitrogen emissions per unit of produced materials	feedstock decarbonisation (hydrogen), CCUS-industrial processes, waste and F-gases management



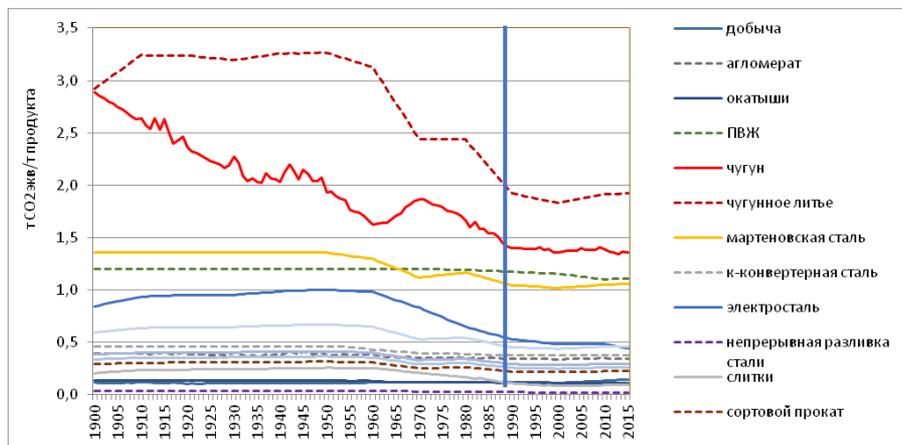
Долгое время энергоэффективность была единственным фактором, снижающим промышленные выбросы, но ...

- ➔ Большая часть потенциала энергоэффективности в промышленности уже использована
- ➔ Это резко контрастирует с глобальной эффективностью использования материалов, которая за последние 100 лет не продемонстрировала никакого прогресса
- ➔ Есть некоторый, но ограниченный прогресс в цикличности экономики, но только 10% от общего количества вводимых в оборот материалов представляют собой переработанные материалы

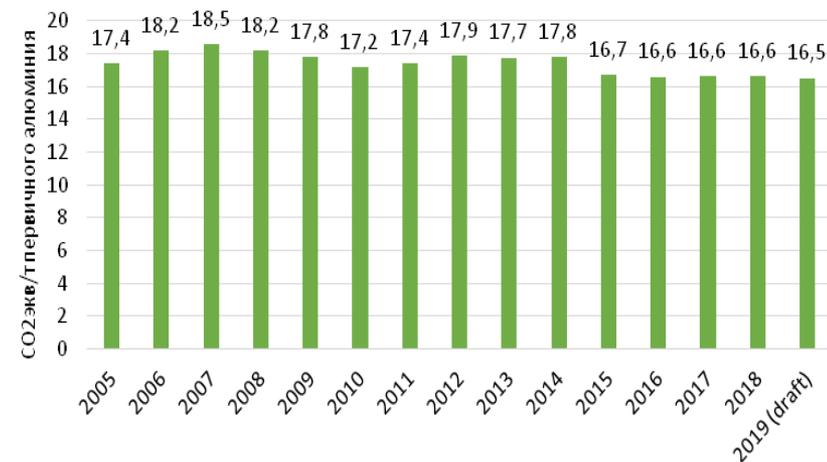


Углеродоемкость основных базовых материалов в последние 3 десятилетия практически стагнировала

черная металлургия. 1990-2015

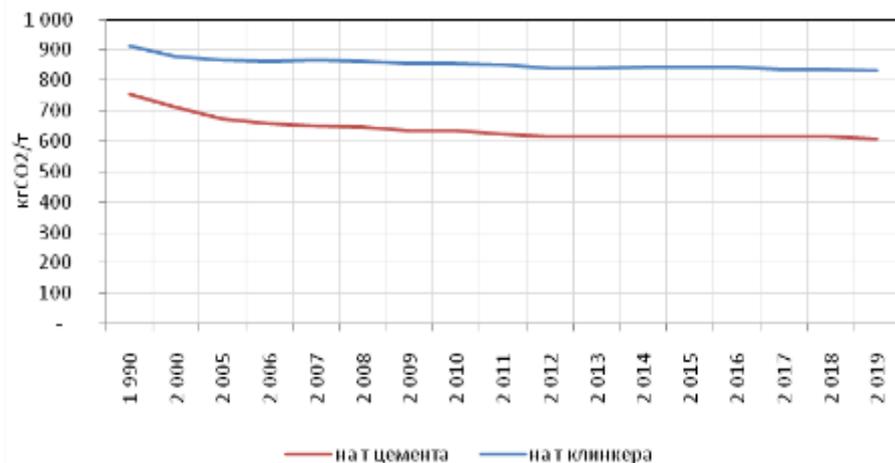


алюминий



Source: International Aluminium Institute

Цемент и клинкер



➔ **Вызов для промышленности – обеспечить переход от стагнации удельных выбросов ПГ в течение последних 3 десятилетий к нетто-нулевым выбросам в ближайшие 3-4 десятилетия.**



2. Масштабы и направления необходимых усилий по декарбонизации глобальной промышленности

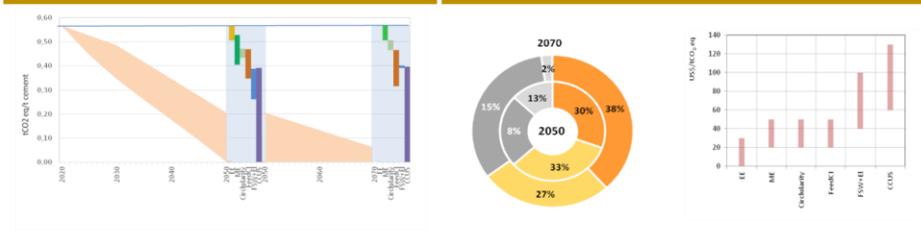


Чистые нулевые выбросы CO2 в промышленности возможны, но сложнодостижимы. Требуется сместить акцент с постепенных улучшений на трансформационные изменения

decarbonization options contribution by mitigation technologies readiness by mitigation costs ranges



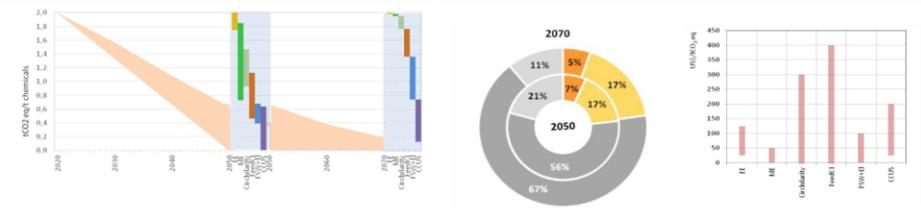
a) Cement Cost rise: cement – 35-115%; house – <1%



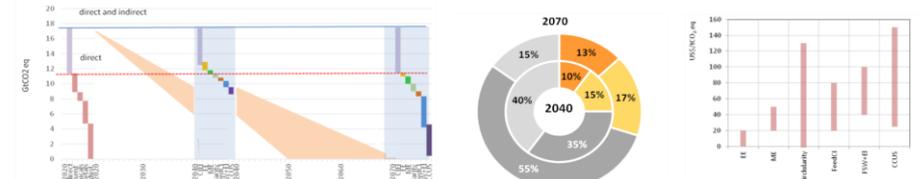
b) Steel Cost rise: steel – 10-50%; house or car – <1%



c) Primary chemicals Cost rise: primary chemicals – 15-115%; plastic bottle – <1%



d) Industry (waste excluded)



- ➔ Сокращение спроса – меньше продуктов на услугу
- ➔ МЭ – меньше материалов на продукт
- ➔ Цикличность – меньше первичных материалов на входе
- ➔ Для ЭЭ остается ограниченный потенциал (снижается - CCUS)
- ➔ Переход на другие виды топлива и сырья, биомассу (ограниченный ресурс) и водород
- ➔ Низкоуглеродная электрификация – в первую очередь для неуглеродоемких производств, но не только
- ➔ CCS и CCU станут основными вариантами смягчения последствий в некоторых отраслях к 2050 г.



Уже существуют и появляется все больше технологий, позволяющих заметно снизить углеродоемкость производства базовых материалов, но ...

- Требуется еще от 5 до 15 лет интенсивной коммерциализации инноваций и меры политики, обеспечивающие широкомасштабное внедрение
- Затраты на смягчение последствий находятся в диапазоне 50–150 долл. США/тCO₂-экв с большими колебаниями внутри и за пределами этого диапазона
- Это влияет на конкурентоспособность низкоуглеродных продуктов и требует поддерживающей политики

Последний момент – один из ключевых. В отличие от других секторов, продукция промышленности поступает во внешнеторговый оборот. Поэтому соображения конкурентоспособности выходят на первый план



Горячебрикетированное железо, полученное на пилотной установке в рамках проекта HYBRIT.
Фото Lars Nilsson

Черная металлургия будущего

- вывод к 2050 г. из эксплуатации всех установок технологического маршрута «доменная печь – кислородный конвертер» (обеспечивает 70% нынешнего выпуска стали с удельными выбросами 2-2,5 тСО_{2экв}./т стали). Все установки этого маршрута должны к 2030 г. выйти на самый высокий уровень энергоэффективности и обеспечить замену части кокса пылеугольным топливом
- практически полный переход к 2050 г. на сталь, производимую в электродуговых печах (с удельными выбросами 0,1-0,4 тСО_{2экв}./т стали) с использованием металлолома – до 7-79% (нижний уровень – для высокой доли ПВЖ)
- производство на основе ПВЖ с использованием:
 - водорода в качестве восстановителя – до 15-30%;
 - технологии электролиза железной руды – до 6%;
 - биогаза – до 5%;
 - природного газа – до 5%;
 - восстановительной плавки – до 25%;
 - восстановительной плавки с захватом и захоронением углерода – до 45% (оснащение всех установок с восстановительной плавкой системами CCUS к 2050 г.).

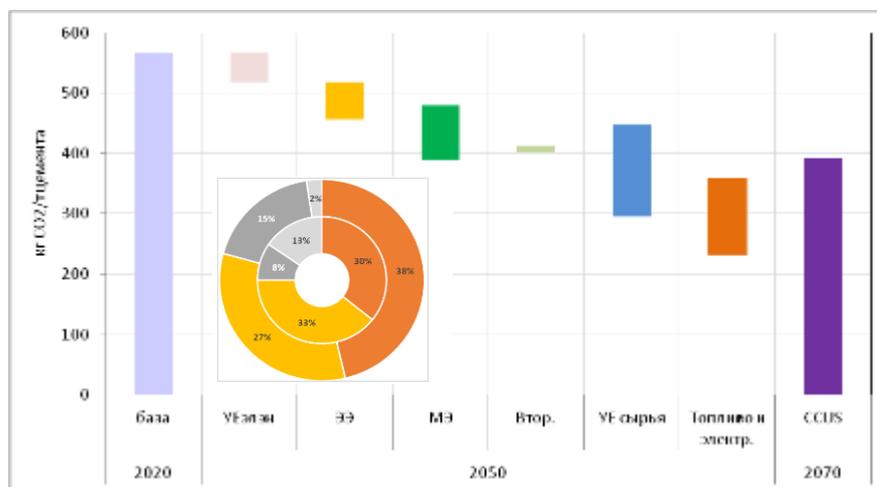
Такие условия позволят снизить удельные выбросы ПГ на 25-30% до 1,35 тСО_{2экв}./т стали к 2030 г. и на 95-100% до 0-0,134 тСО_{2экв}./т стали к 2070 г.



Цементная промышленность

Наименование показателя	Ед. изм.	Источник	2020 (факт)	2030	2050
Производство цемента	Мт	МЭА	4281	4350	4682
Соотношение «клинкер/цемент»	%	МЭА	72%	64%	60%
		CAT			50%
		GCCA	63%	58%	52%
Энергоемкость производства клинкера	ГДж/т клинкера	МЭА	3,5	3,3	3,1
		CAT		3,3-3,5	3,0-3,3
Электроемкость производства цемента	кВт-ч/т цемента	МЭА	91	87	79
Использование альтернативного топлива (биомасса, отходы)	%	МЭА	5,6%	17,5%	30%
		CAT			55-60%
		GCCA	6%	22%	43%
Доля улавливания CO ₂ при использовании технологии CCUS	%	CAT	-	10-12%	65-80%
Использование водорода	%	CAT	-	0,4-0,9%	6%
Удельные выбросы CO ₂ при производстве цемента	тCO ₂ /т цемента	МЭА	0,59	0,52	0,37

Источники: IEA, 2020: Energy Technology Perspective 2020; Climate Action Tracker, 2020: Paris Agreement Compatible Sectoral Benchmark. 67 pp. https://climateactiontracker.org/documents/753/CAT_2020-07-



Химия и алюминий

ХИМИЯ

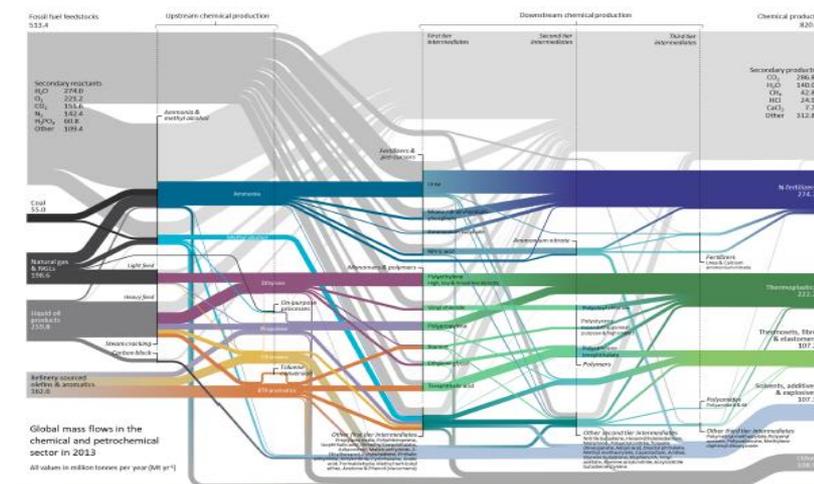
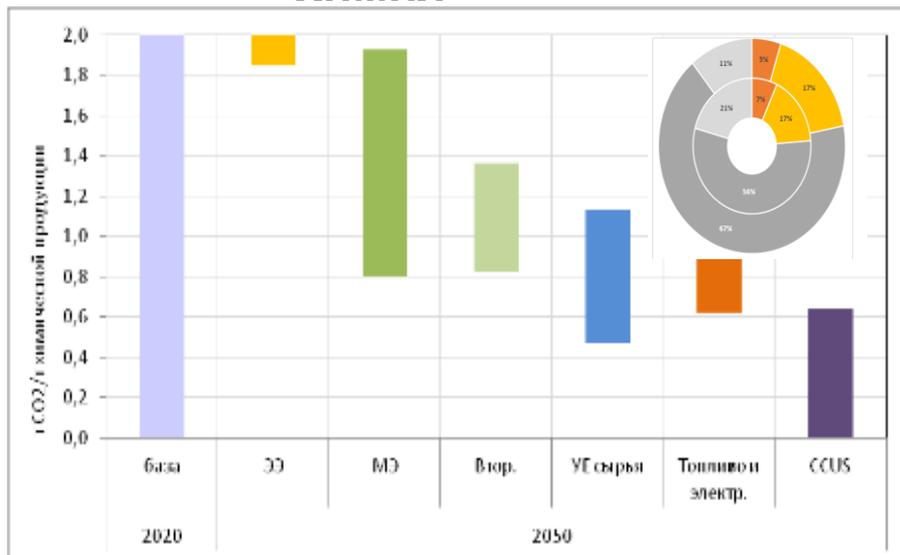
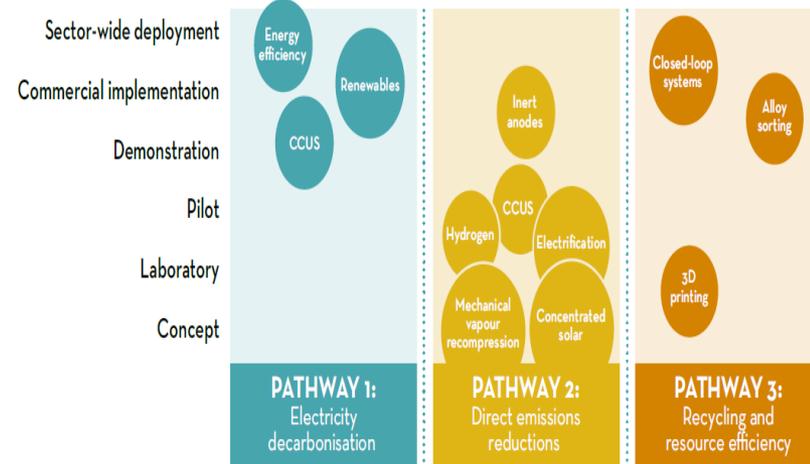
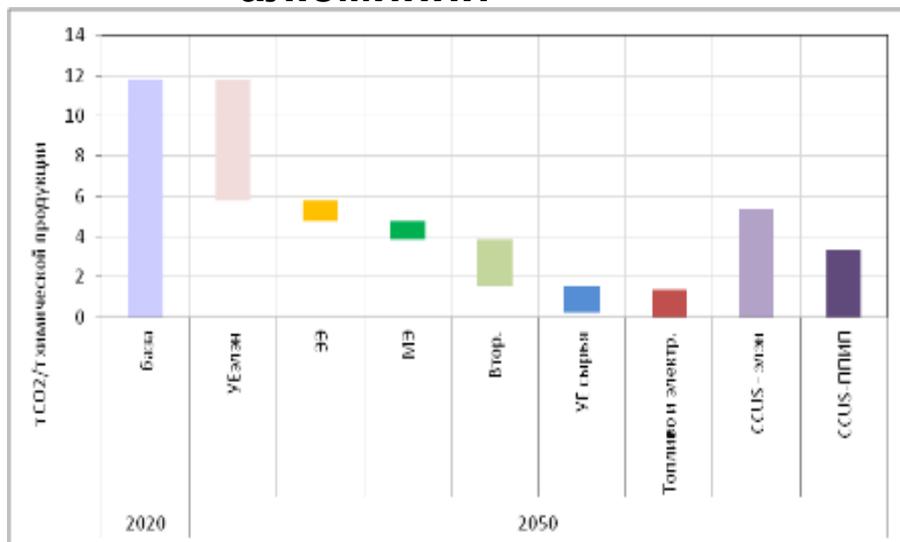


Figure 1. A Sankey diagram depicting the passage of feedstock through the chemical sector from fossil fuel feedstocks to chemical products. NGLs: Natural gas liquids, N-fertilizers: Nitrogenous fertilizers

алюминий



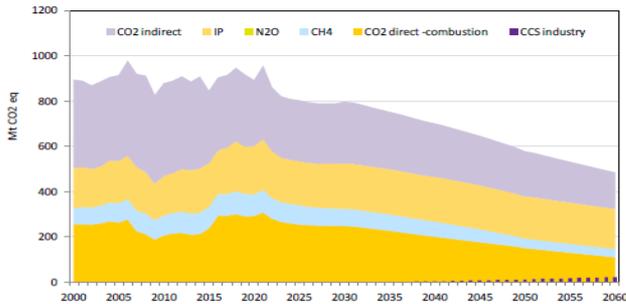


3. Масштабы и направления необходимых усилий по декарбонизации российской промышленности

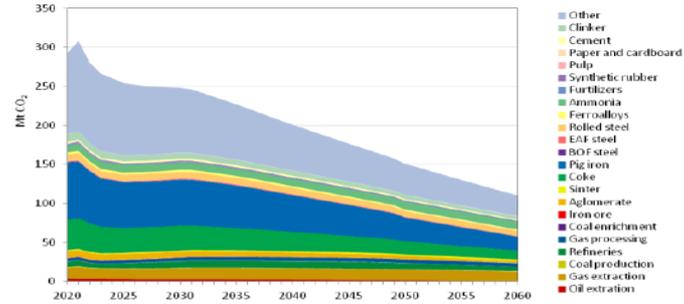


Выбросы ПГ от промышленности

4S

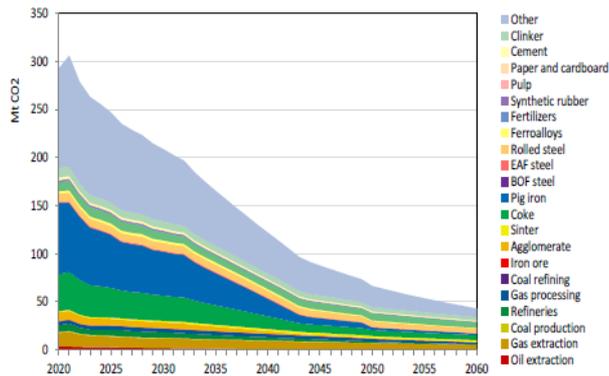


(a) прямые и косвенные выбросы

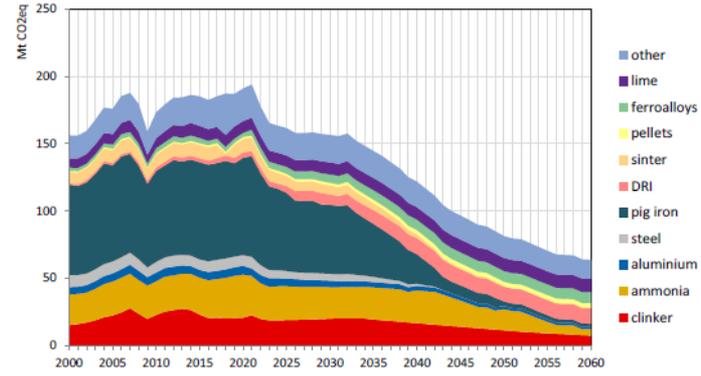


(b) выбросы от сжигания

4D



(a) выбросы от сжигания

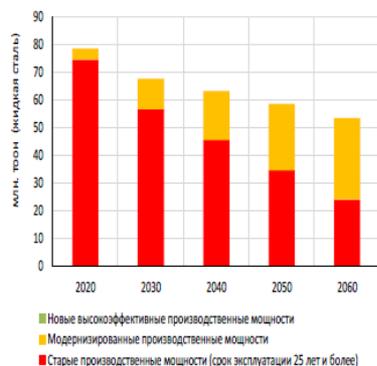


(b) выбросы от процессов

Source: CENef-XXI.



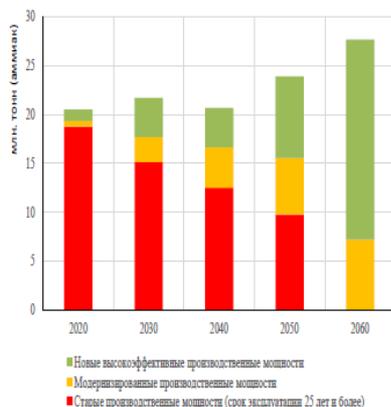
Промышленность. 4S



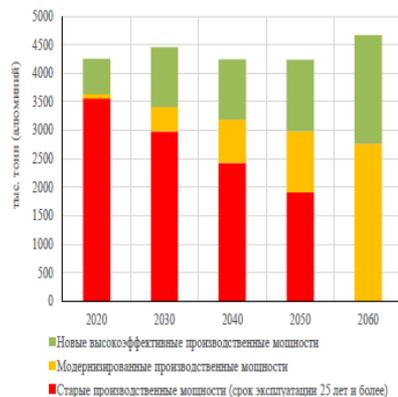
сталь



цемент



аммиак



алюминий

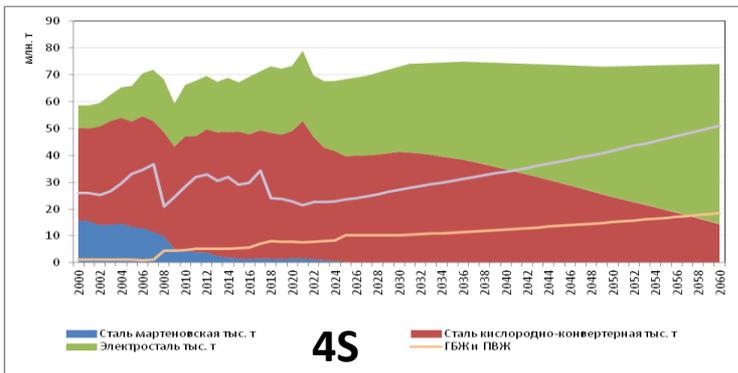
- Российские промышленные компании потратят 2020-е годы на поиск новых рынков сбыта и изменение логистики
- Медленный рост ограничивает модернизацию и декарбонизацию
- Медленная декарбонизация препятствует доступу на международные рынки традиционных сырьевых материалов
- Изоляция России от глобальных цепочек поставок блокирует выход России на развивающиеся рынки новой низкоуглеродной продукции

После восстановления к 2031–2032 годам спрос на базовые материалы:

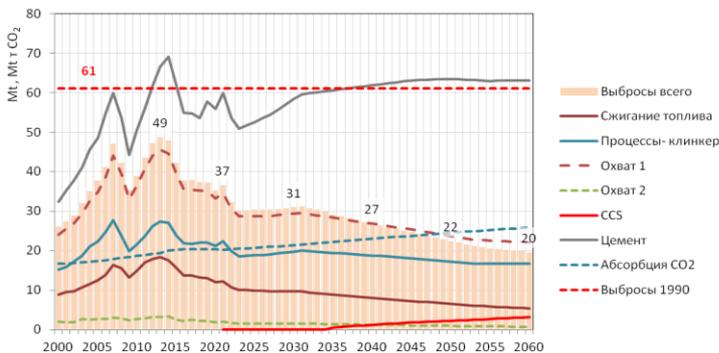
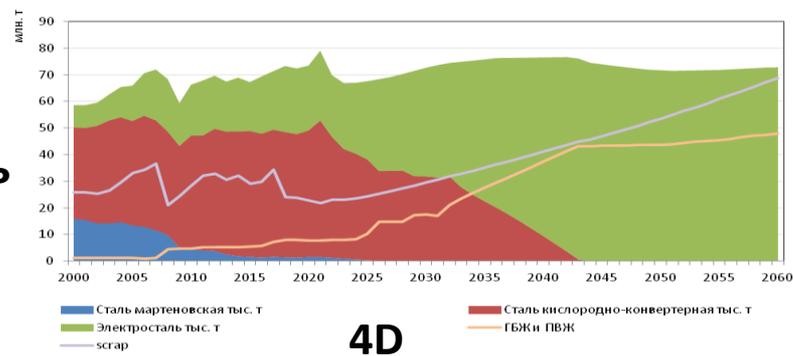
- либо останется почти стабильным (сталь и цемент),
- либо будет медленно расти (целлюлозно-бумажная, химическая промышленность и алюминий).



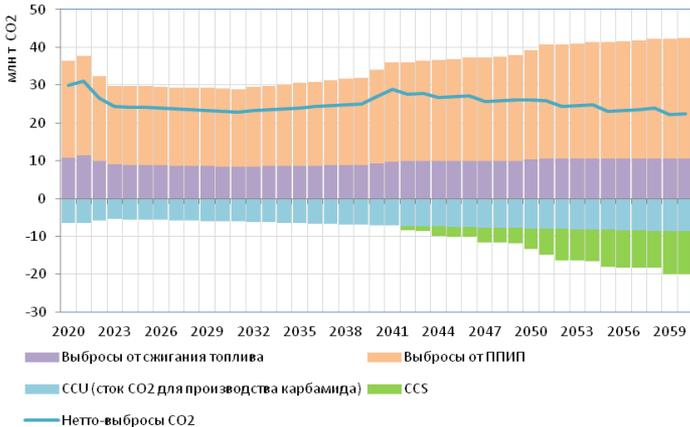
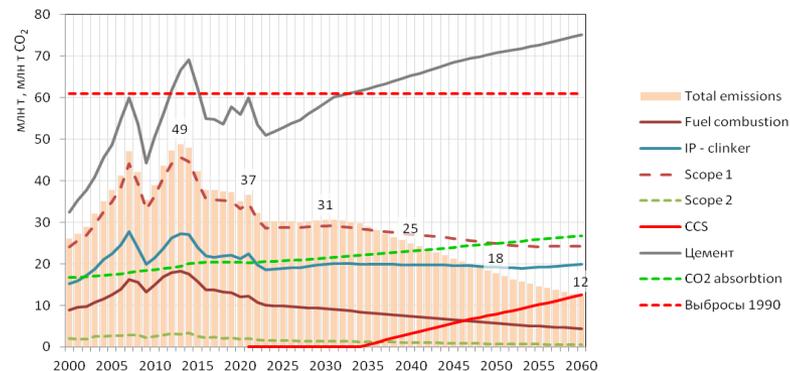
В 4D и 4F технологическая структура промышленности меняется заметно быстрее, чем в 4S



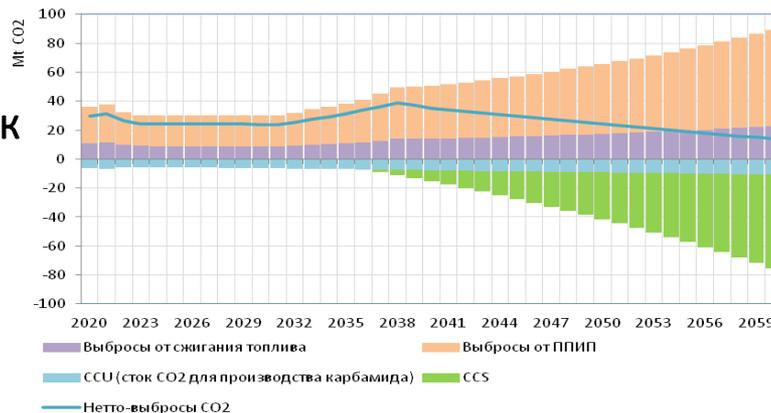
сталь



цемент



аммиак



В 4D и 4F предполагается, что правительство приступит к реализации масштабных и эффективных пакетов мер политики декарбонизации в промышленности, таких как:

- **Взимание платы за выбросы углерода для мотивации к сокращению углеродного следа и снижения рисков экономических потерь, связанных с механизмами, подобными СВМ**
- **Эффективные системы бенчмаркинга – сравнительного анализа углеродоемкости для оценки и сертификации продукции по выбросам парниковых газов**
- **Долгосрочные отраслевые стратегии декарбонизации для координации действий по смягчению последствий в отдельных отраслях**
- **Стандарты для типовых промышленных технологий, таких как электродвигатели или системы пароснабжения**
- **Расширенная ответственность производителей, стимулирование сокращения отходов и рост их переработки**
- **Субсидии для пересечения новыми технологиями «долины смерти» и преодоления разрыва в затратах между традиционными и низкоуглеродными продуктами – до тех пор, пока существует этот разрыв**



4. Санкции и СВАМ: последствия для российской промышленности



Slow carbon



Low carbon



No carbon



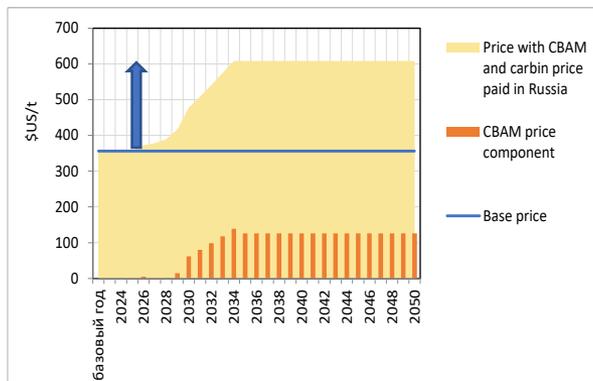
Два разных рыночных подхода

- ➔ ЕС – EU ETS, CBAM – цены углерода
- ➔ Повышение цен для конкурентов
- ➔ Платежи за сертификаты в бюджет
- ➔ Сокращение спроса – удорожание сырья
- ➔ Рост производства на предприятиях ЕС за счет удорожания конкурирующего импорта
- ➔ Цены на выбросы углерода рассматриваются как наиболее эффективный инструмент
- ➔ США – IRA – субсидии
- ➔ Субсидирование своих производителей из бюджета
- ➔ Сокращения спроса нет – затраты на дорогую продукцию компенсируются
- ➔ Рост производства низкоуглеродной продукции на предприятиях США
- ➔ Большая практика эффективного использования налоговых субсидий

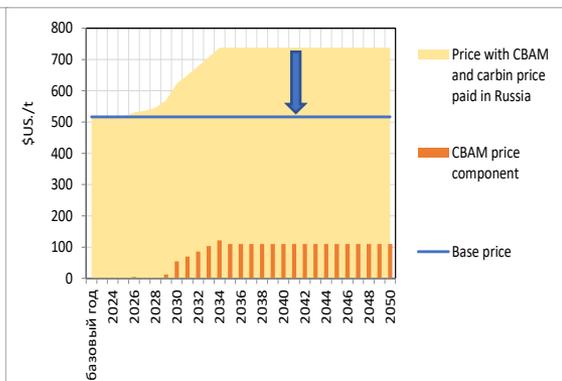
Цена на рынке квот ETS



удорожание аммиака



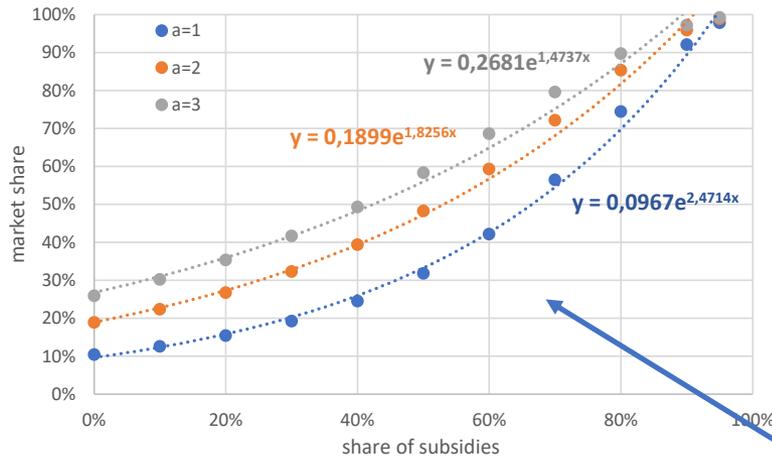
удорожание чугуна



Рыночные механизмы – цены на углерод или субсидии на низкоуглеродную продукцию

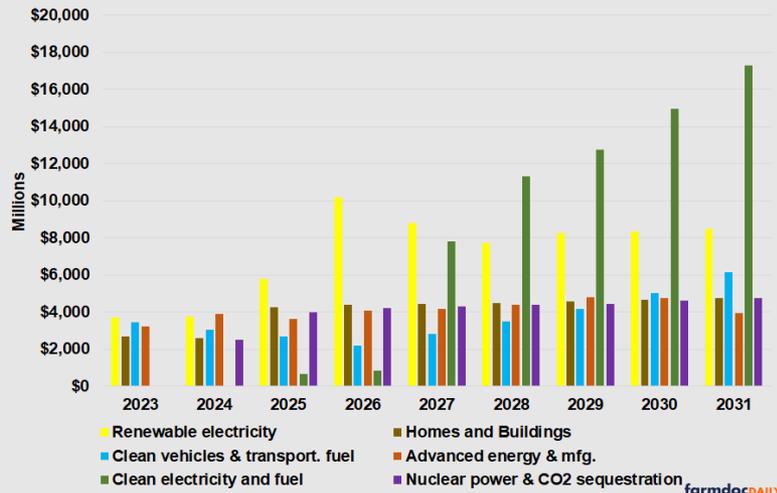
ЛОГИТ-ФУНКЦИЯ ДОЛИ НА РЫНКЕ

$$Share_i^t = \frac{a_i * LCOP_{it}^{-2}}{\sum_i a_i * LCOP_{it}^{-2}}$$



- ➔ добавление ко всем продуктам близкого по величине слагаемого – $b * PrCO_2$ – увеличивает долю низкоуглеродной технологии
- ➔ Предоставление субсидии более заметно повышает долю низкоуглеродной технологии

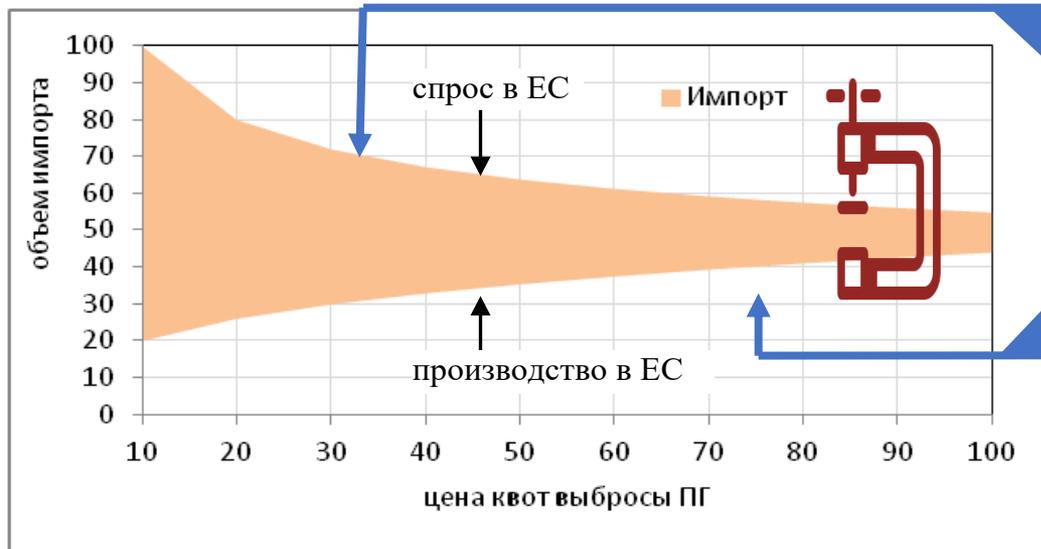
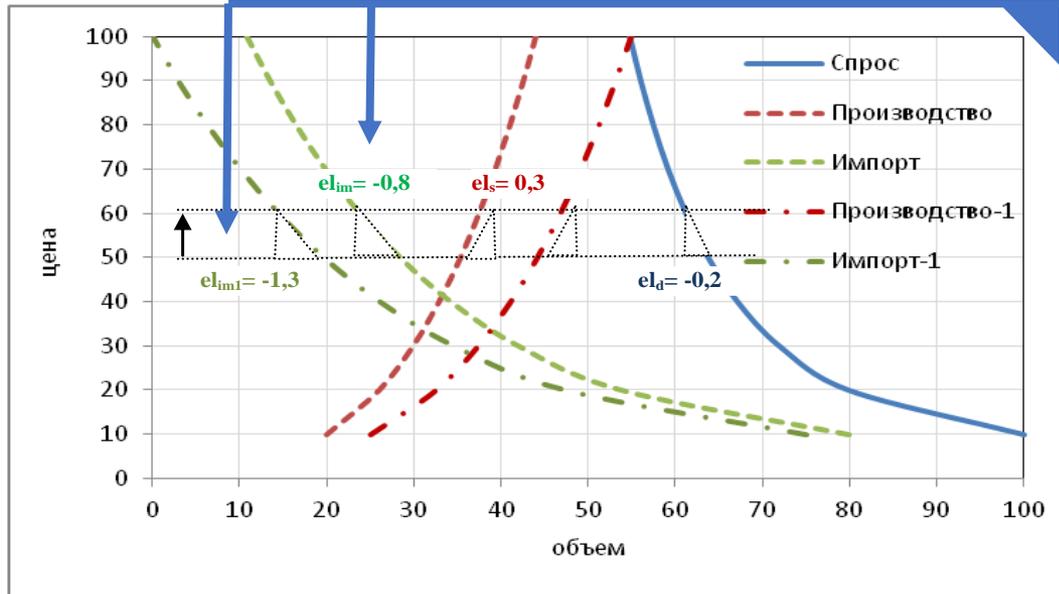
Figure 3. The Inflation Reduction Act of 2022; Tax Credit Provisions (JCT, August 9, 2022)



- ➔ 128 млрд долларов на ВИЭ и системы хранения
- ➔ 30 млрд долларов – на АЭС
- ➔ 37 млрд долларов США на передовое промышленное производство



СВАМ - «низкоуглеродные тиски» для импорта

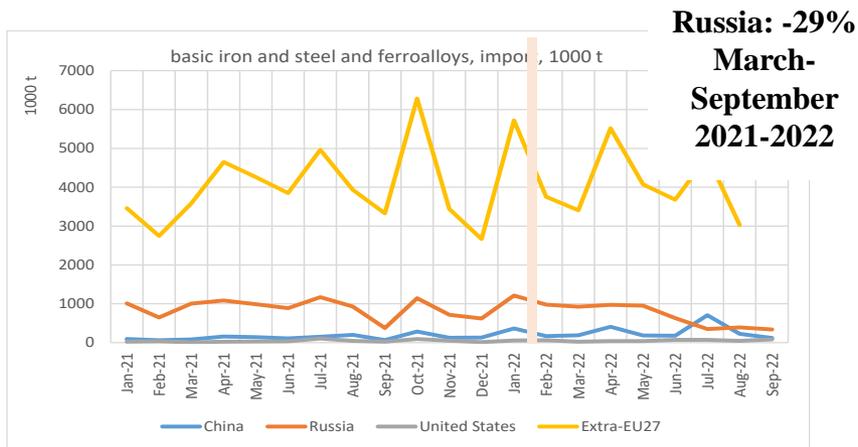


- ➔ Эластичность импорта по цене \approx равна сумме эластичностей спроса по цене и альтернативного предложения по цене
- ➔ При более низкой доле импорта эластичность импорта по цене выше
- ➔ Низкая углеродоемкость, при прочих равных, позволяет увеличивать поставки
- ➔ Производители ЕС потеряют часть внешних рынков. Россия может их занять

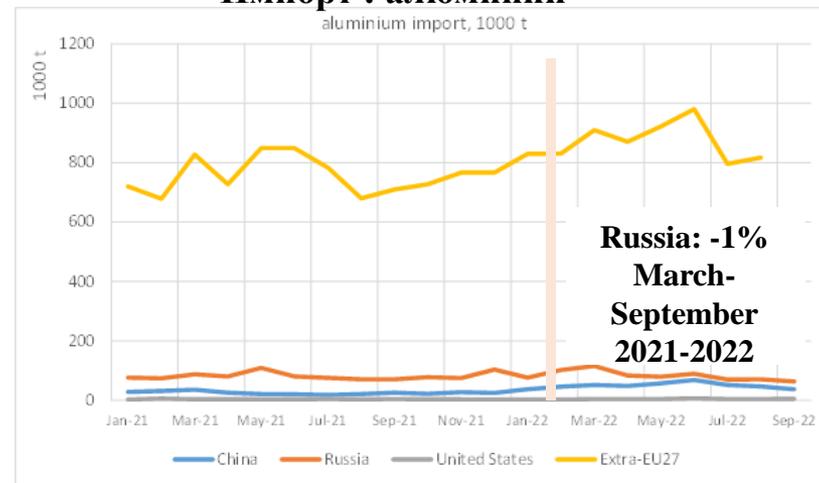


Импорт СВМ материалов в ЕС

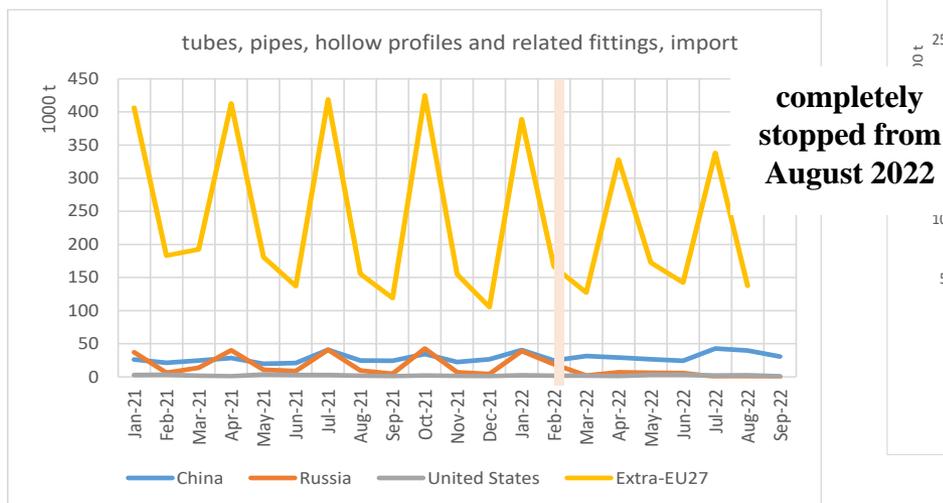
Импорт: basic iron and steel and ferro-alloys



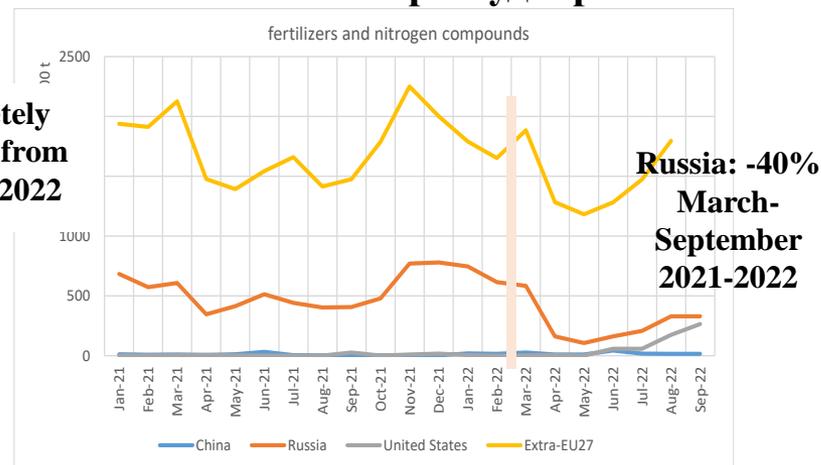
Импорт : алюминий



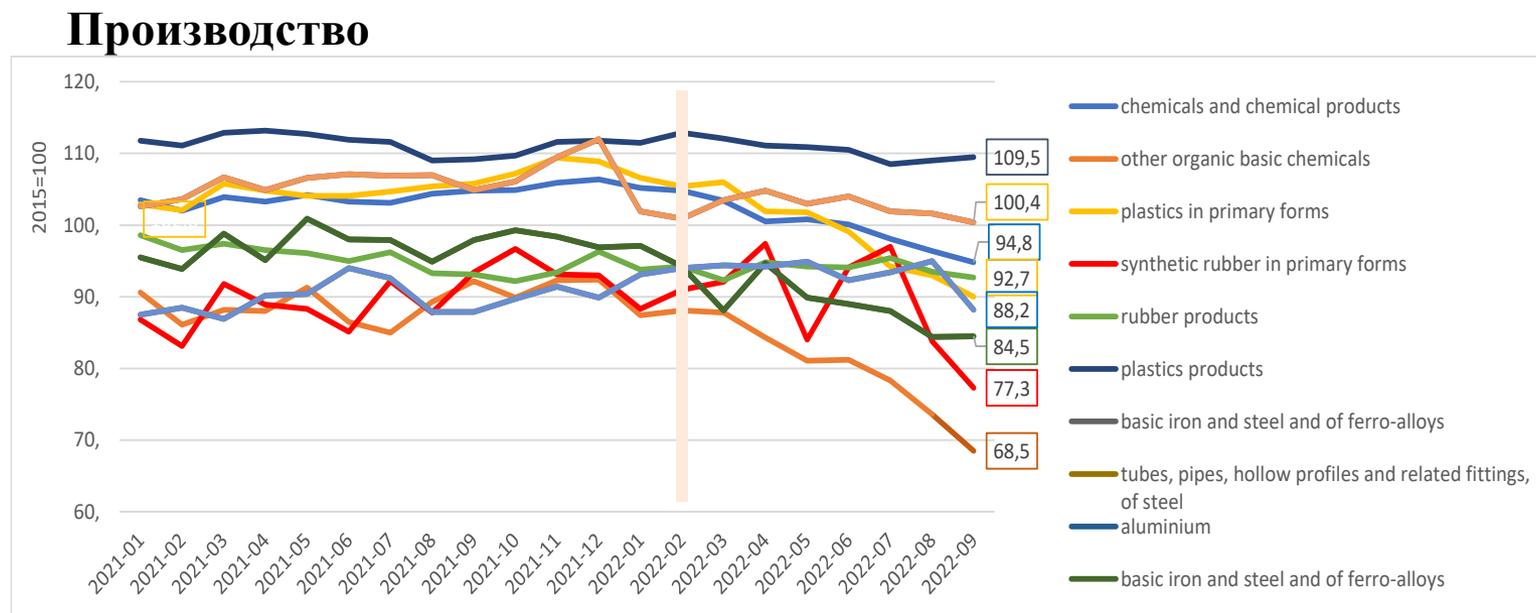
Импорт: tubes, pipes, hollow profiles and related fittings



Импорт : удобрения



Последствия энергетического кризиса и военной операции для промышленности ЕС

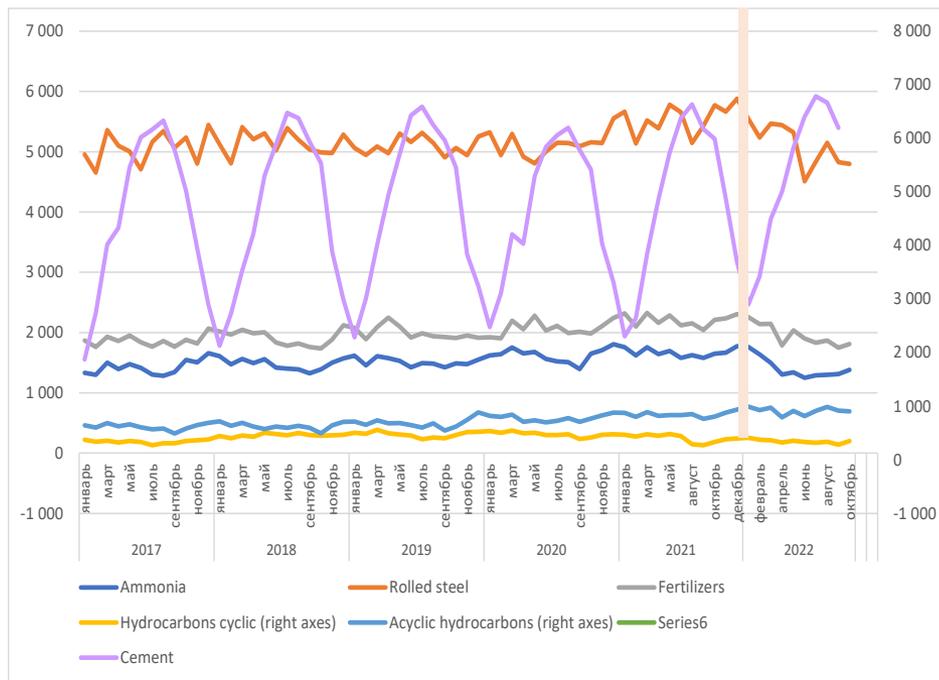


- ➔ **Промышленность ЕС в 2022 г. стала объектом негативных последствий**
- ➔ **Российская военная операция привела к развороту тенденций промышленного производства к спаду, ускорению деиндустриализации ЕС и утечке углерода**
- ➔ **Это выявило влияние других факторов, таких как стоимость энергии и схемы ценообразования на энергию на утечку углерода**



Последствия энергетического кризиса и военной операции для промышленности России

Производство

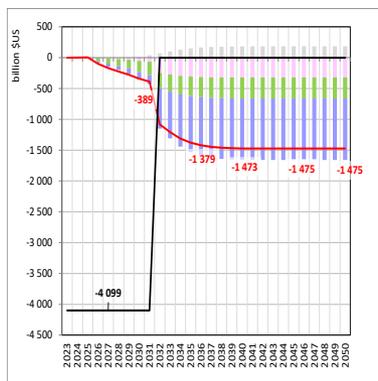


- ➔ После введения санкций в отношении России экспорт продукции черной металлургии из России в ЕС сократился вплоть до полной остановки по некоторым товарным группам
- ➔ Российские ниши на рынках СВМ-товаров ЕС занимают: Китай, США, Египет, Алжир и др. страны

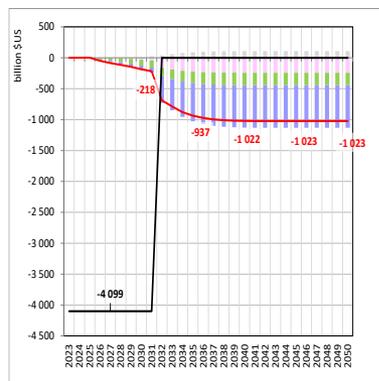
- ➔ Растущий спрос на материалы для милитаризации экономики и объявленный «разворот на Восток» не смогли перекрыть негативные последствия санкций
- ➔ После нескольких лет роста или сохранения относительно стабильного производства основных материалов в России февраль 2022 года стал для многих из них началом эры сокращения производства



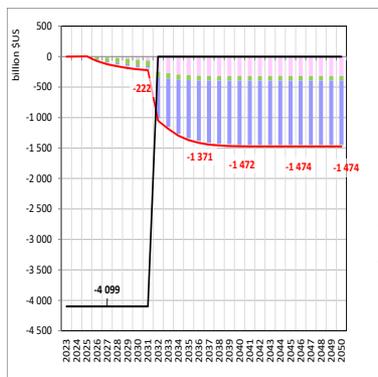
Российская военная операция и последовавшие за ней санкции закрыли рынки ЕС для некоторых товаров СВМ



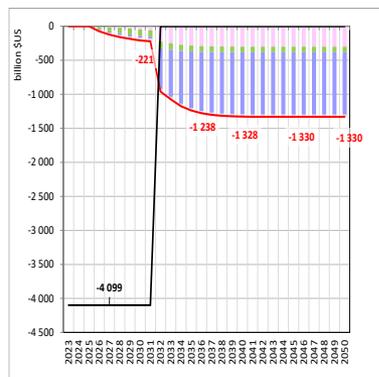
Scenario 1: Scope 1+2+3; $CP_{eu}=100$ euros/tCO₂; $CP_{ru}=0$; $CI_{eu}=\text{const}$; $CI_{ru}=\text{const}$



Scenario 2: Scope 1+2+3; $CP_{eu}=100$ euros/tCO₂; $CP_{ru}=0$; $CI_{eu}=\text{const}$; $CI_{ru}=\text{const}$; cost pass through = 50%



Scenario 3: Scope 1+3; $CP_{eu}=100$ euros/tCO₂; $CP_{ru}=0$; $CI_{eu}=\text{const}$; $CI_{ru}=\text{const}$

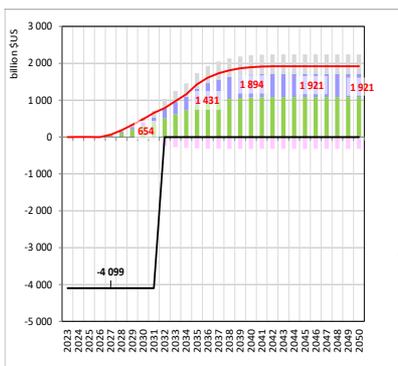


Scenario 4: Scope 1+3; $CP_{eu}=80$ euros/tCO₂; $CP_{ru}=0$; $CI_{eu}=\text{const}$; $CI_{ru}=\text{const}$

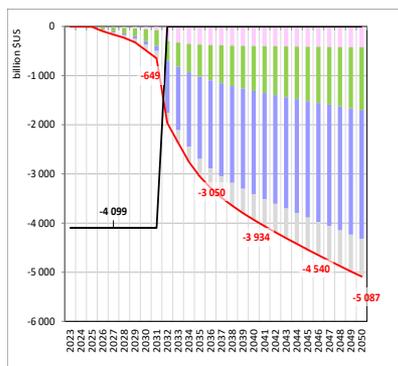
- ➔ Потери российской экспортной выручки по товарам СВМ из-за санкций оцениваются в 4,1-5,4 млрд долларов США
- ➔ Эти убытки превышают половину выручки от экспорта СВМ товаров из России в ЕС до 2022 года и намного превосходят убытки, ожидаемые от СВМ
- ➔ Если санкции не отменят, то потери от СВМ будут меньше (черные металлы), но они сложатся с потерями от санкций



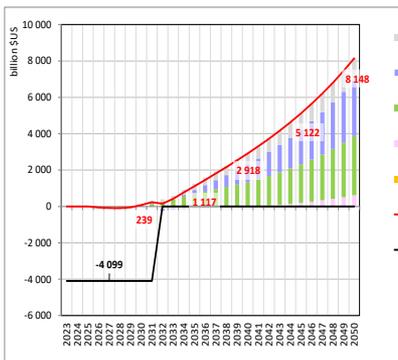
При наиболее вероятном сочетании различных условий потери российских компаний, связанные с СВМ, к 2050 году не превысят 1-1,5 млрд долларов США



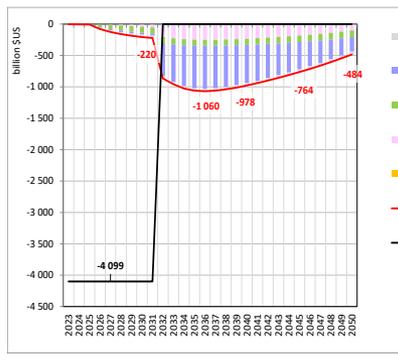
Scenario 7: Scope 1+3; $CP_{eu}=100$ euros/tCO₂; $CP_{ru}=0.5 * CP_{eu}$ fiscally neutral; $CI_{eu}=\text{const}$, $CI_{ru}=\text{const}$



Scenario 8: Scope 1+3; $CP_{eu}=100$ euros/tCO₂; $CP_{ru}=0.5 * CP_{eu}$ $CI_{eu} \rightarrow 0$, $CI_{ru}=\text{const}$



Scenario 9: Scope 1+3; $CP_{eu}=100$ euros/tCO₂; $CP_{ru}=0.5 * CP_{eu}$ $CI_{eu}=\text{const}$, $CI_{ru} \rightarrow 0$



Scenario 10: Scope 1+3; $CP_{eu}=100$ euros/tCO₂; $CP_{ru}=0.5 * CP_{eu}$ $CI_{eu} \rightarrow 0$, $CI_{ru} \rightarrow 0$

- ➔ Экспорт с низкоуглеродных заводов и установок поможет свести чистые потери экспортной выручки практически к нулю
- ➔ Фискально-нейтральное ценообразование на выбросы углерода в России позволит получить дополнительные экспортные доходы в размере 2 млрд долларов США за счет ограничения роста цен российских экспортеров на продукцию СВМ



Если Россия будет сильно отставать от ЕС в декарбонизации СВАО-промышленности при полном бездействии и сохранении нынешней углеродоемкости на десятилетия вперед, то ...

- **потери доходов от экспорта СВАО к 2050 г. могут возрасти до 5 млрд долларов и достичь санкционного эффекта**
- **Наоборот, скачок России к финишной черте углеродной нейтральности в сочетании с пассивностью ЕС может принести к 2050 году более 8 млрд долларов дополнительных доходов от экспорта**
- **Если Россия и ЕС соревнуются параллельно, применяя эффективную политику и технологии по сокращению промышленных выбросов парниковых газов, то потери экспортной выручки России могут достичь пика в 2036 г. в размере 1 млрд долл. США в середине 30-х годов с сокращением вдвое к 2050 году**



Что почитать?

- Bashmakov, I.A., L.J. Nilsson, A. Acquaye, C. Bataille, J.M. Cullen, S. de la Rue du Can, M. Fishedick, Y. Geng, K. Tanaka, 2022: Industry. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.013 [IPCC AR6 WGIII Chapter11.pdf](#)
- Sanctions and CBAM: Implications for the Russian industry. [CENEF-XXI](#)
- Russia's carbon neutrality: pathways to 2060 [CENEF-XXI](#)
- Башмаков И.А. России на траекториях движения к углеродной нейтральности: три четверки и одна двойка. Нефтегазовая вертикаль. №11, 2022.
- Bashmakov I.A. CBAM and Russian export. *Voprosy Ekonomiki*. 2022;(1):90-109. (In Russ.) <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2022-1-90-109>
- CENEF-XXI (2021). *CBAM. Impact on the Russian economy*. Moscow. Center for Energy Efficiency. ЦЭНЭФ-XXI (2021). CBAM. Последствия для российской экономики.



С наступающим Новым Годом!



Центр энергоэффективности – XXI век (ЦЭНЭФ-XXI)

**Мы тратим свою энергию, чтобы экономить вашу!
Если Ваша задача имеет решение – мы его найдем!**

(499) 120-9209 cenef@co.ru www.cenef-xxi.ru

