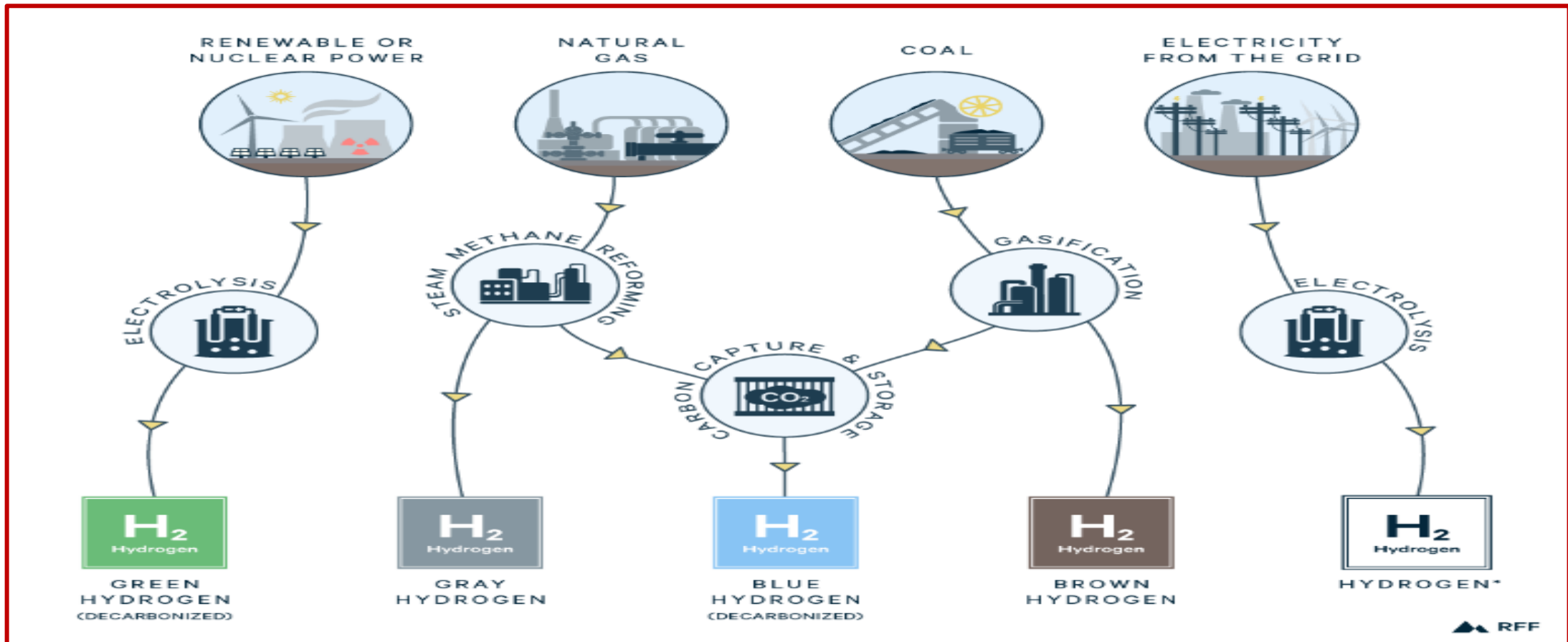
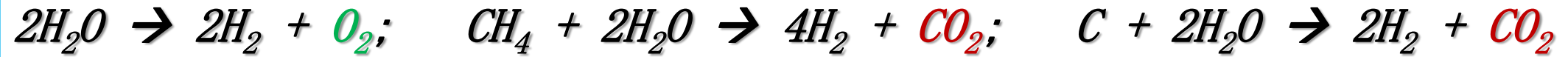




«Декарбонизированный» водород из природного газа

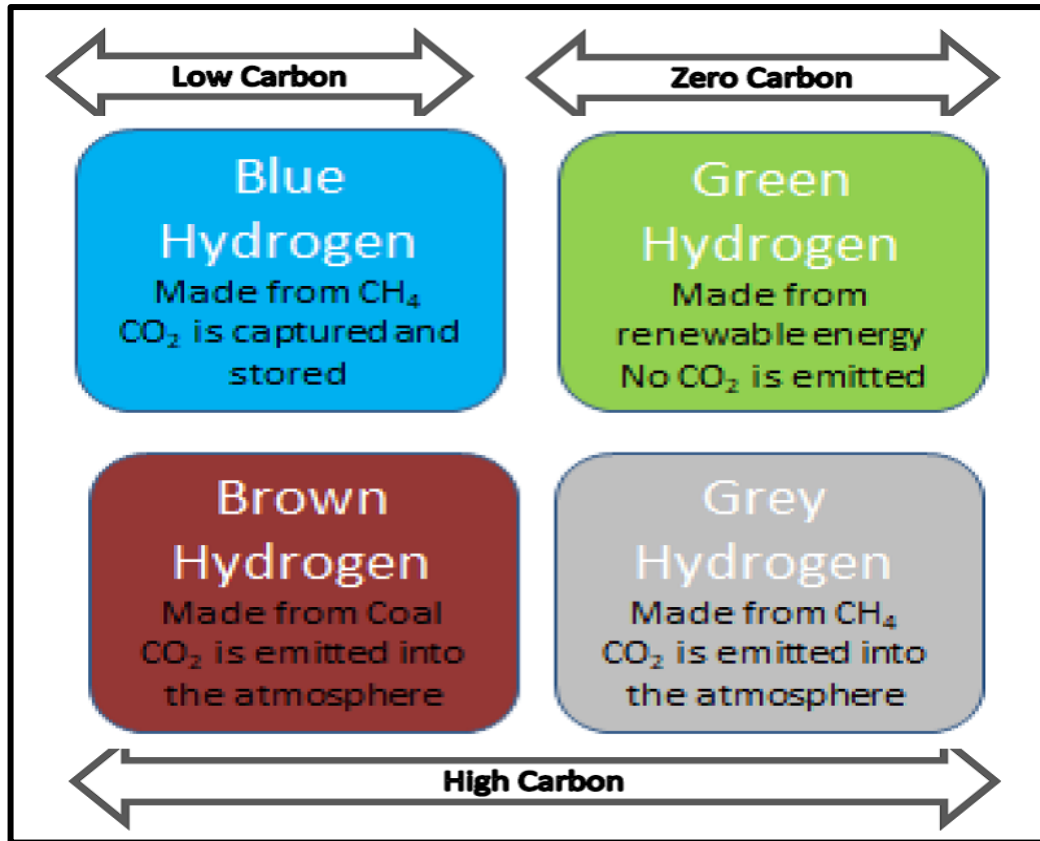
Чл.-к. РАН Лихолобов Владимир Александрович

Водородная энергетика – базовые промышленные процессы

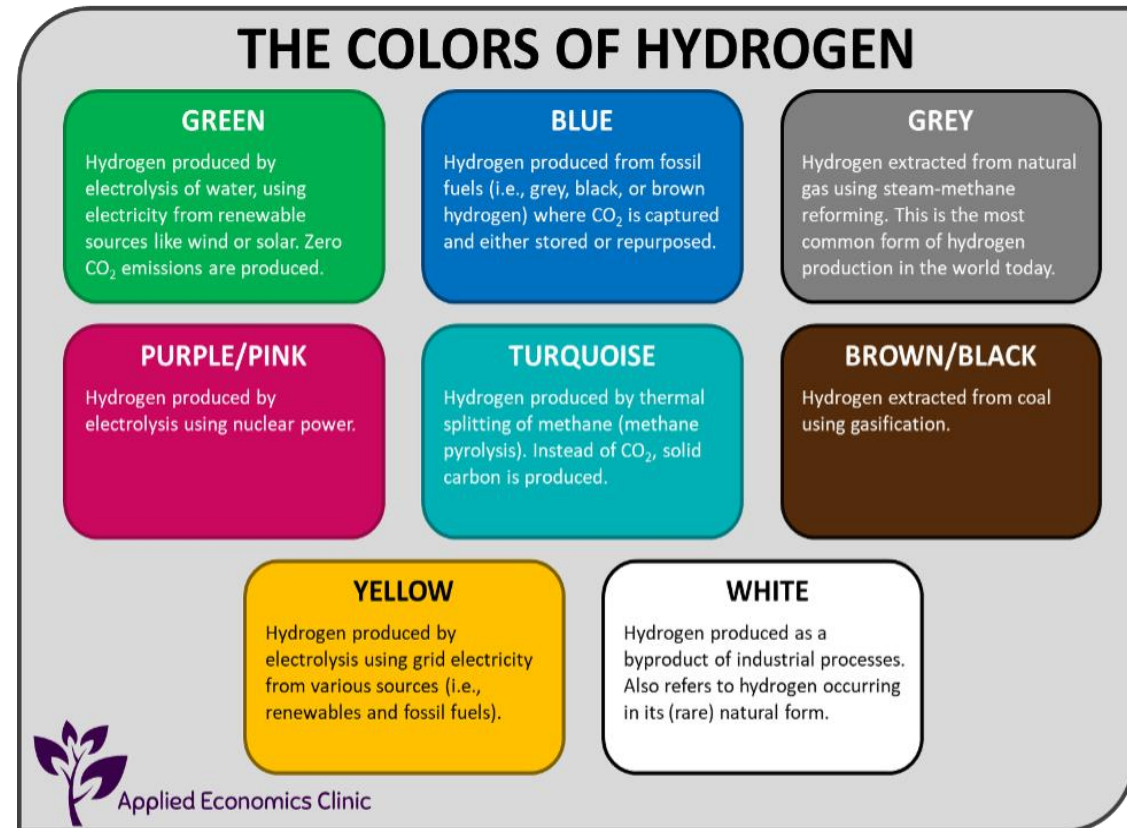


«Раскраска» водорода

2018

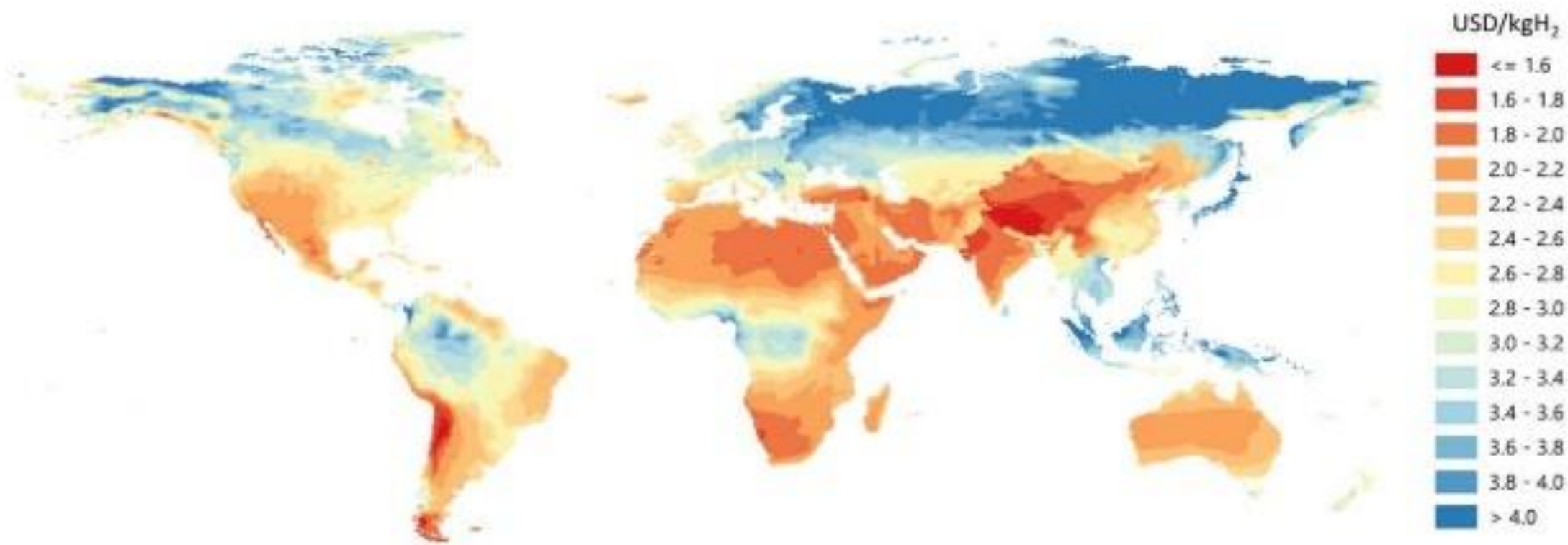


2020



Расчётные данные по стоимости «зелёного» водорода, производимого из электроэнергии, получаемой от гибридных (ветряных + солнечных) станций, для различных регионов Земли.

Hydrogen costs from hybrid solar PV and onshore wind systems in the long term



из: Report prepared by the IEA (International Energy Agency) for the G20, Japan, June 2019.

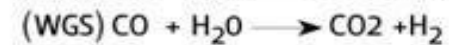
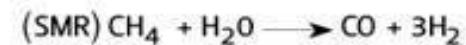
Сопоставление показателей процессов получения водорода из воды и метана, только из воды и только из метана

HYDROGEN PRODUCTION PATHWAYS AND COMPARATIVE CARBON EMISSIONS



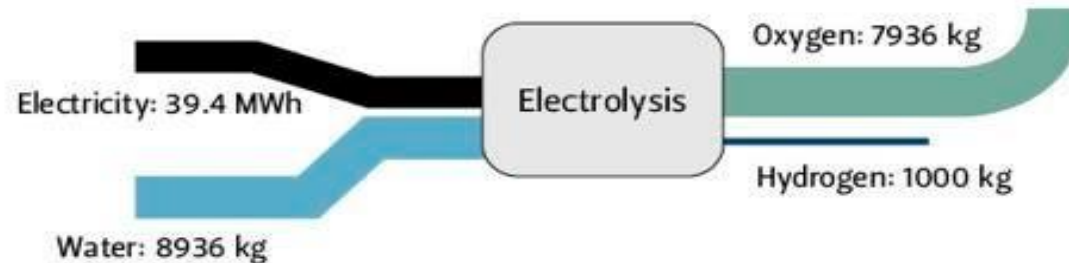
GREY/BROWN Production

Uses natural gas or gasified fossil fuel as feedstock through a steam reformer



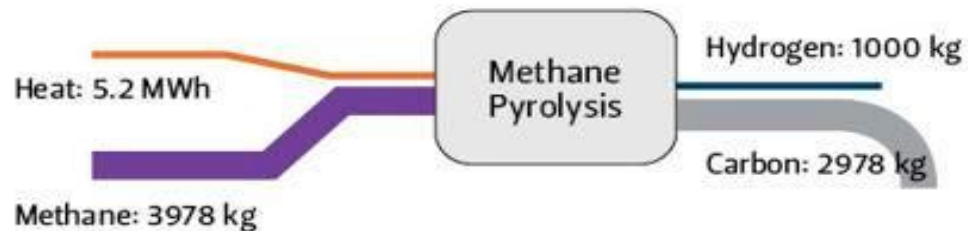
BLUE Production

Grey/Brown with carbon capture



GREEN/PINK Production

Uses water as a feedstock through an electrolyzer



TURQUOISE Production

Uses natural gas or a gasified fossil fuel as feedstock through a pyrolyzer



SOURCES Graphic from GTM, February 2021. Colors with descriptions based on Medlock, *Forum*, May 2021.

РИС. 3 «УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД» РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

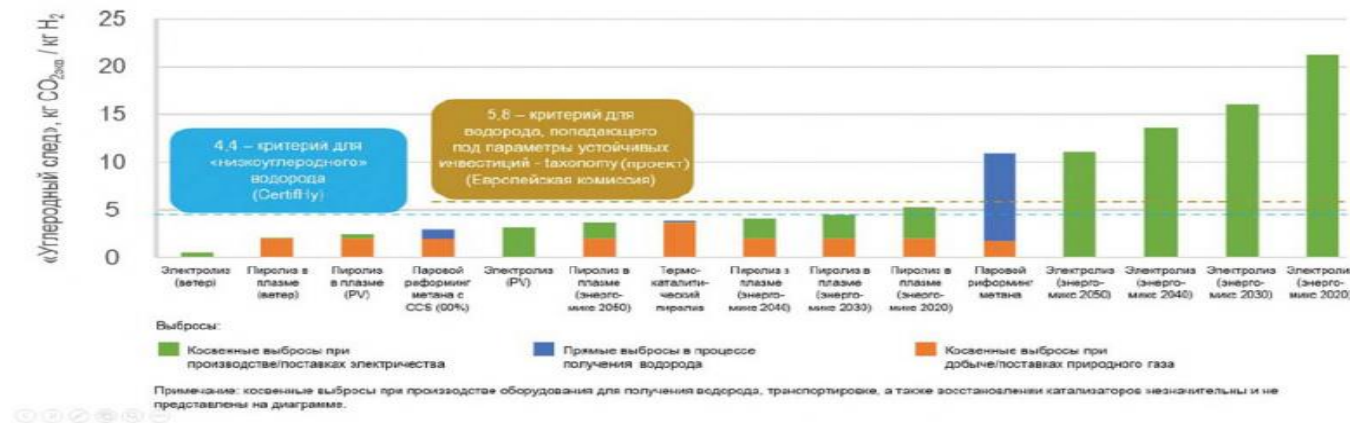


РИС. 4 «УГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД» РАЗЛИЧНЫХ МАРШРУТОВ ПОСТАВОК ПРИРОДНОГО ГАЗА В ЕС



Примечание: оценка выполнена с учетом коэффициентов глобального потепления для метана на 100-летний период (IPCC AR4 GWP100)

Способ получения

«Углеродный» след,
кгCO₂/кгH₂

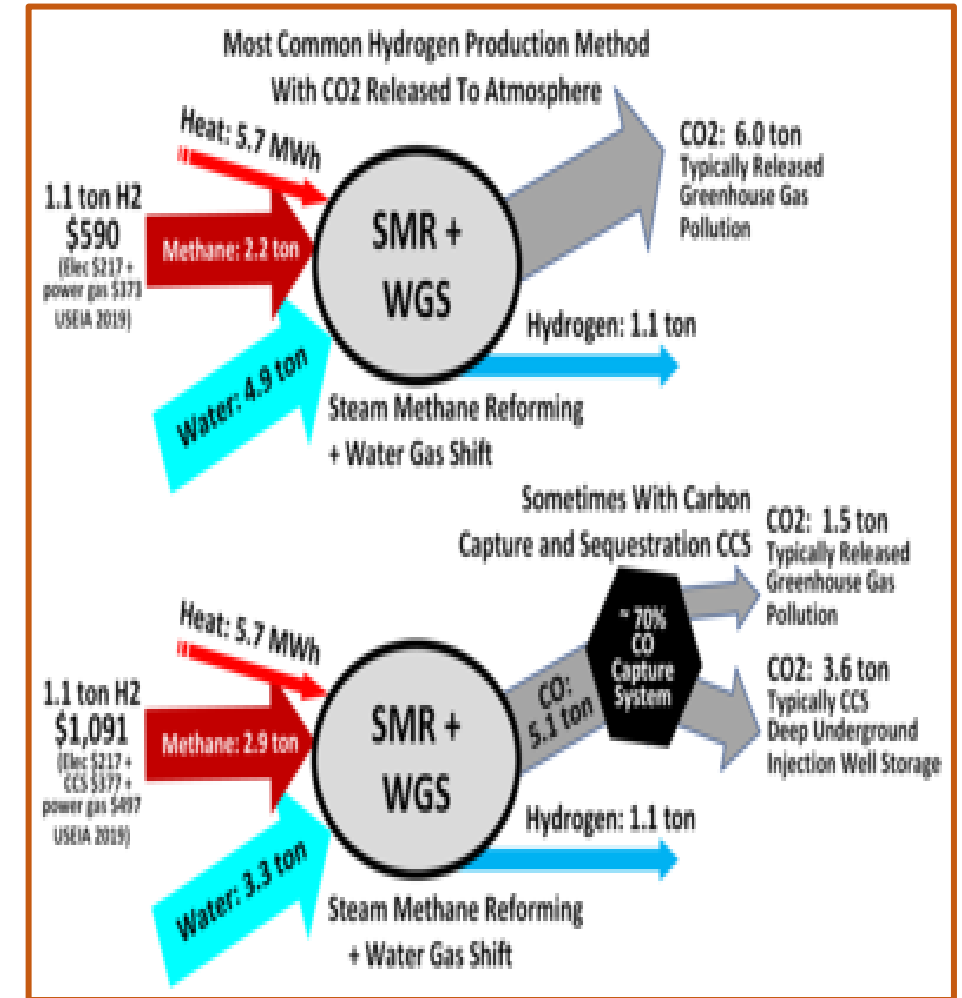
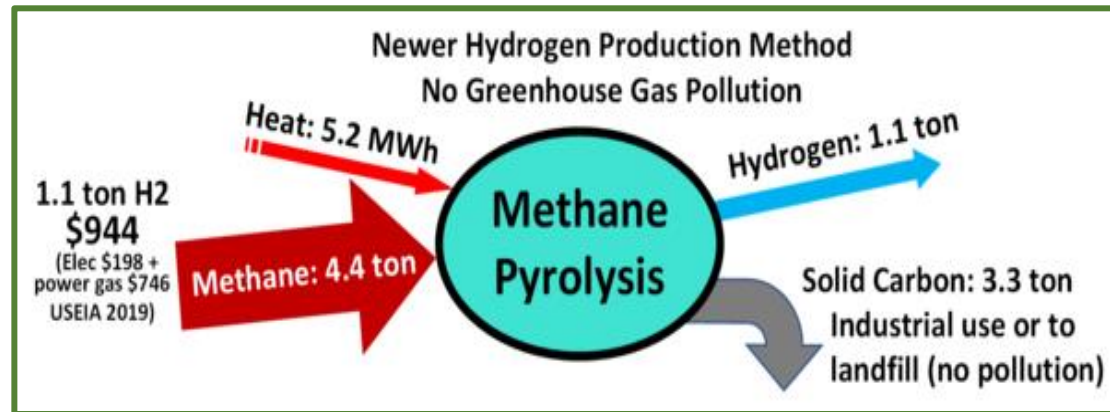
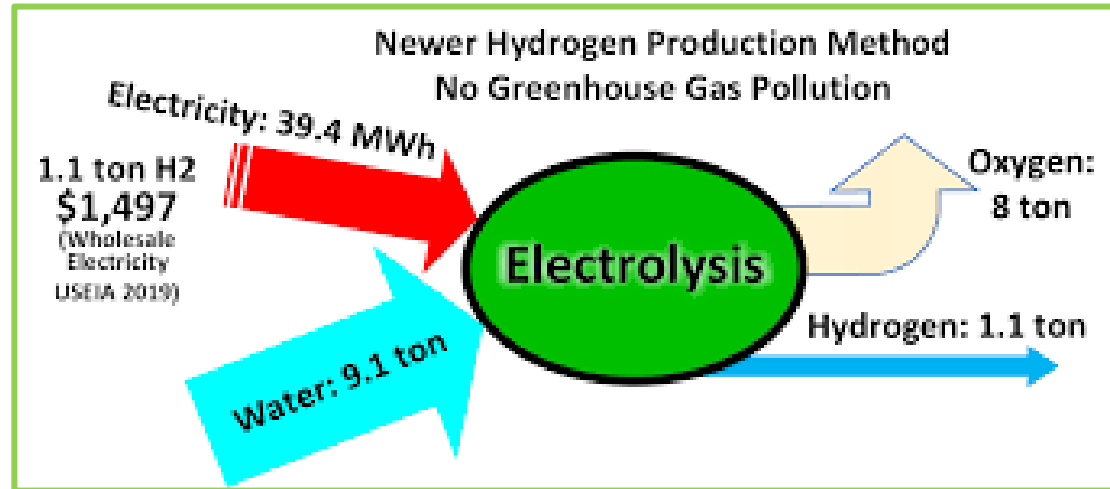
Электролиз воды (ветер)	0,6 (1)
Пиролиз в плазме (ветер)	2,5 (3)+(1)
Пиролиз в плазме (Солнце)	3,0 (3)+(1)
Паровой риформинг (деCO ₂ – 90%)	3,5 (2)+(3)
Электролиз воды (Солнце)	3,6 (1)
Пиролиз в плазме (Елек-Энер/кр-2050)	4,0 (3)+(1)
Пиролиз в плазме (Елек-Энер/2020)	5,2 (3)+(1)
Паровой риформинг (деCO ₂ – 0%)	11,5 (2)+(3)
Электролиз воды (Елек-Энер/кр-2050)	11,7 (1)
Электролиз воды (Елек-Энер/2020)	21,5 (1)

P.S. (1) – косвенные выбросы CO₂ при производстве/поставках электроэнергии;
(2) – прямые выбросы CO₂ в процессе получения водорода;
(3) – косвенные выбросы CO₂ при добыче/поставках природного газа.

P.P.S. (a) - 4,4 кгCO₂/кгH₂ и меньше – критерий для водорода получить марку «низкоуглеродный»;

(б) – при транспортировке природного газа по новым газопроводам (ТП и СП) «углеродный» след получения водорода пиролизом метана в плазме с использованием ветровой или солнечной электроэнергии оценивается в 1,2 – 1,6 кгCO₂/кгH₂.

Сравнение показателей разрабатываемых, существующих и апробированных методов получения водорода



Сравнение технологических принципов получения водорода пиролизом метана

Термокаталитическое разложение метана – привлекательно: невысокая температура (500 – 700 оС); готовые технологические решения для оформления процесса, но вопрос отделения Ni(Co, Cu, Fe)--содержащих катализаторов от «вросшего в них» углерода с целью их регенерации и повторного использования нерешаемый.

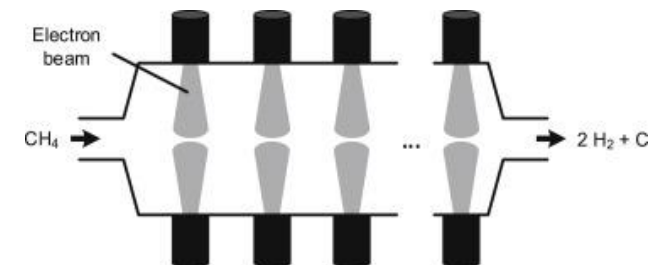
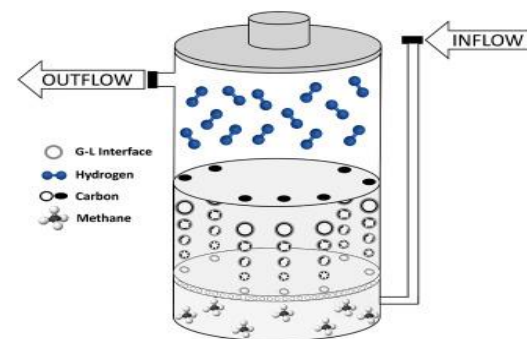
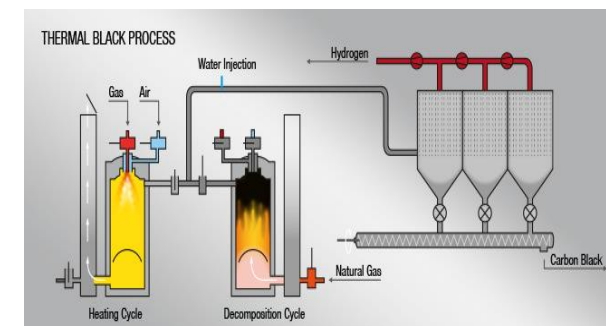
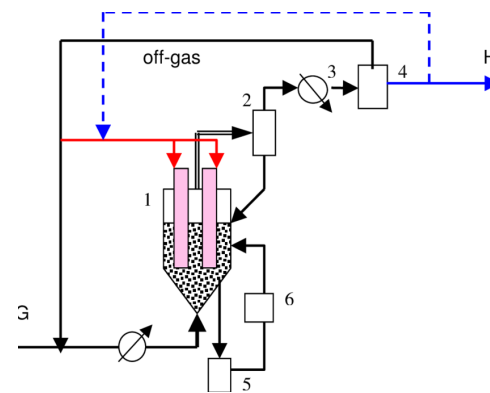
Термический пиролиз метана:

- «камерный метод» – нагрев метана в большом замкнутом объёме до температур 1000-1200 оС; реализован и используется в производстве технического углерода (например, марки Т900); основной недостаток – большой расход тепловой энергии из-за низкого значения параметра «нагревающая площадь/нагреваемый объём» (большой вклад внешних потерь тепла);

- «пузырьковый метод» – нагрев пузырьков метана, формирующихся при его барботировании через расплав металла (или сплава), не образующего карбиды (например, Ga); за счёт увеличения параметра «нагревающая площадь/нагреваемый объём» существенно снижается расход тепловой энергии (вклад внешних потерь уменьшается).

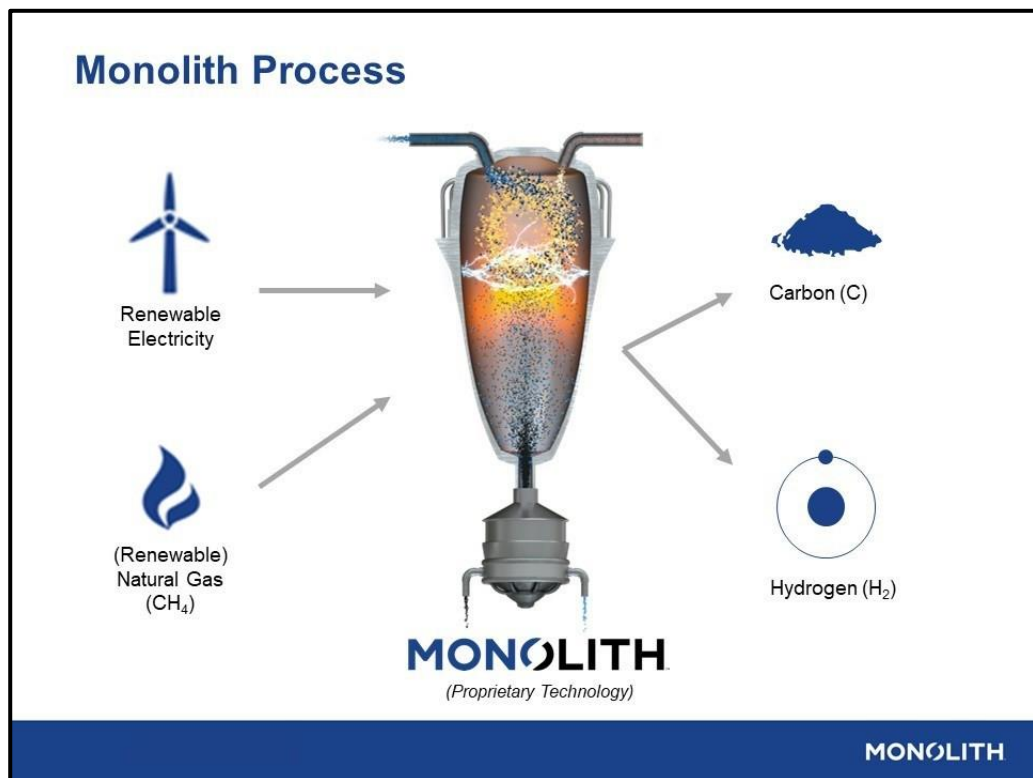
Распад метана в плазме:

- разрушение молекулы метана в «холодной» плазме (высокоэнергетическими являются только электроны) вследствие ионизации электронным ударом; по сравнению с термическими методами характеризуется наибольшим коэффициентом использования вводимой энергии (эффективность использования – 60%, или 221MJ_{CH4}/kgH₂)



Опытно-промышленная апробация производства водорода путём пиролиза метана в плазме

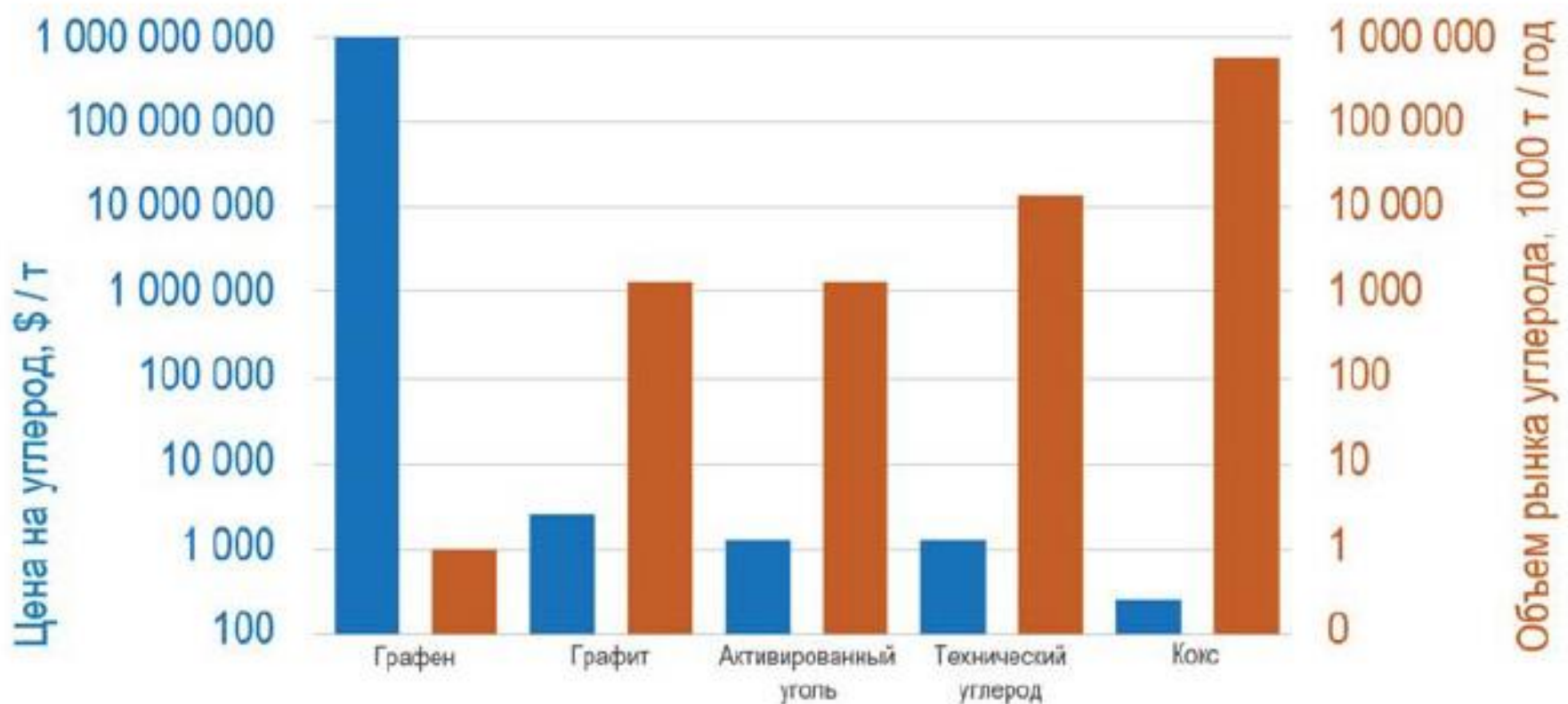
Monolith's world's 1st "turquoise hydrogen" production facility in Nebraska



Turquoise hydrogen **needs less electricity than green hydrogen**, produced by electrolysis of water, so it has strategic value, and current investment is expected to accelerate hydrogen roadmap, which revolves around **producing 280,000 metric tons of this hydrogen by 2025.**

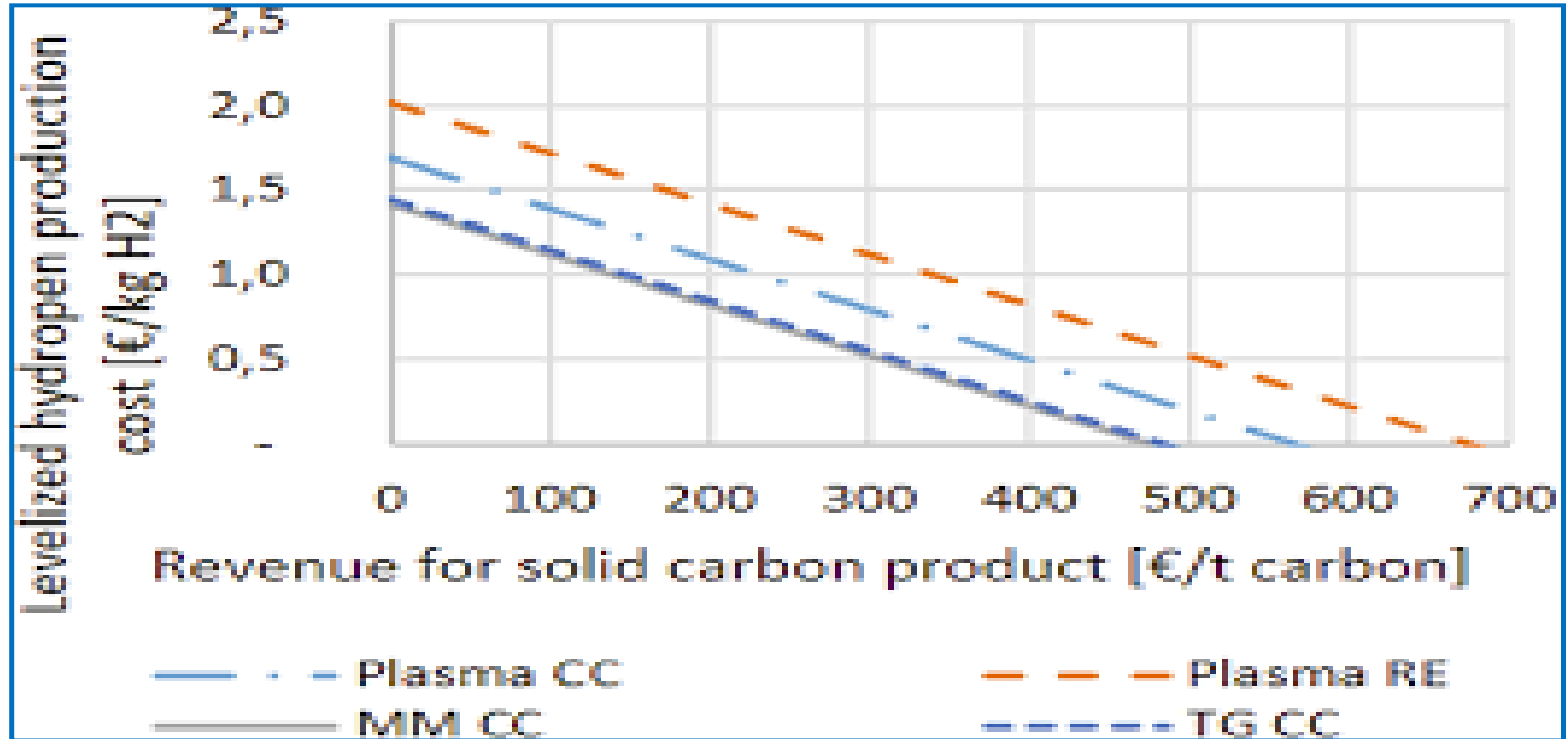
Виды твёрдого углерода, имеющие практическое применение

РИС. 5 РЫНОК УГЛЕРОДА В МИРЕ

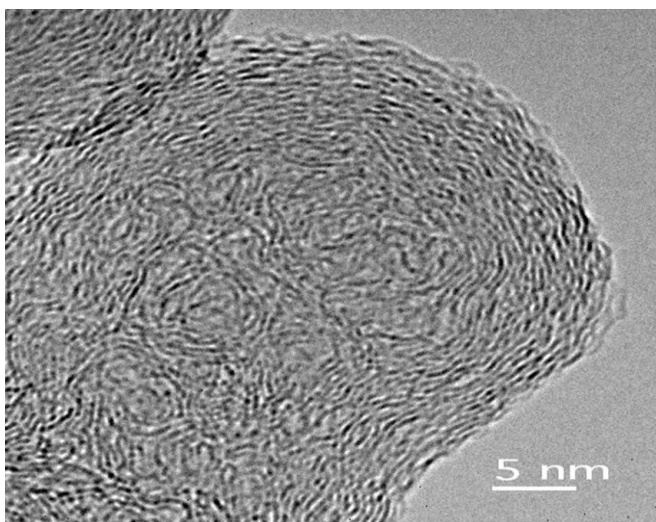
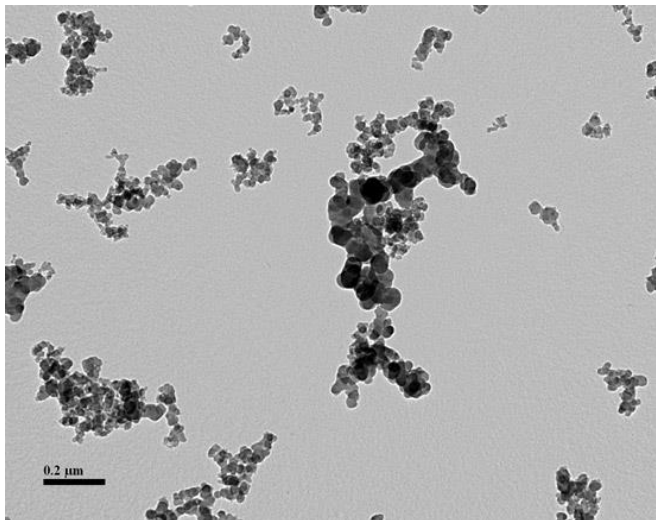


(из «НЕФТЕГАЗОВАЯ ВЕРТИКАЛЬ»/Аналитика и прогнозы/ №1-2/2021, 40-47)

Влияние способа пиролиза метана и коммерческой стоимости
получаемого твёрдого углерода на стоимость водорода



Потенциальные области использования углерода, образующегося при пиролизе метана, в «мегатоннажных» количествах



Структура: одиночные или сросшиеся в грозди углеродные наноглобулы (диаметр 10-500 нм), сложенные сильно-дефектными графеновыми слоями; площадь поверхности 10-500 кв.м/г; поверхность имеет как гидрофобные, так и гидрофильные участки; частицы углерода имеют небольшую электропроводность.

Области применения: в настоящее время имеющиеся области применения наноглобулярного углерода, известного под трейд-марками технический углерод (русск.) и carbon black (англ.), обеспечивают его потребление в мире в объёме 15 млн. тонн в год; эти области связаны с производством, главным образом, автомобильных шин и резинотехнических изделий, пигментов, а также материалов для систем производства и запасания электрической энергии.

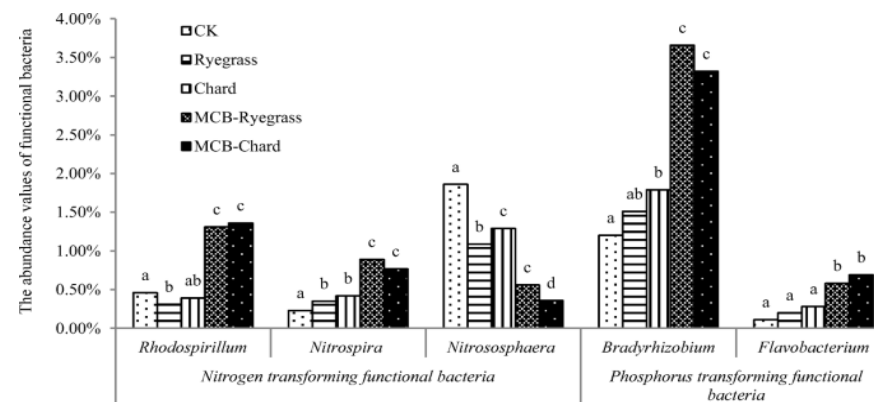
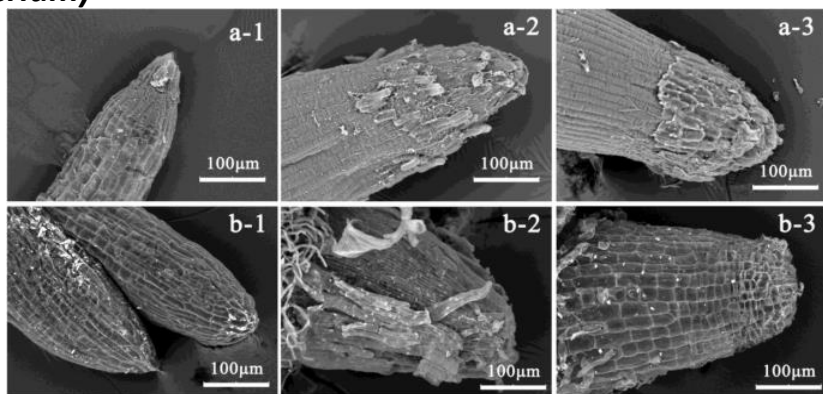
Прогнозы развития рынка потребления: имеющиеся прогнозы развития этих направлений указывают на возможный двух-кратный рост спроса на ТУ и СВ к 2040 г. Однако, даже этот ожидаемый объём потребления (30 млн. т) многократно ниже того объёма углерода, (сотни миллионов тонн в год!), который будет образовываться, если получать водород пиролизом природного газа.

Что может быть обещающим: в последнее десятилетие интенсифицировались исследования по изучению влияния наноструктурированного углерода на свойства материалов, применяемых в строительстве, и его влияния на плодородие почв.

Потенциальные области использования углерода, образующегося при пиролизе метана, в «мегатоннажных» количествах

Рекультивация и повышение плодородия земель

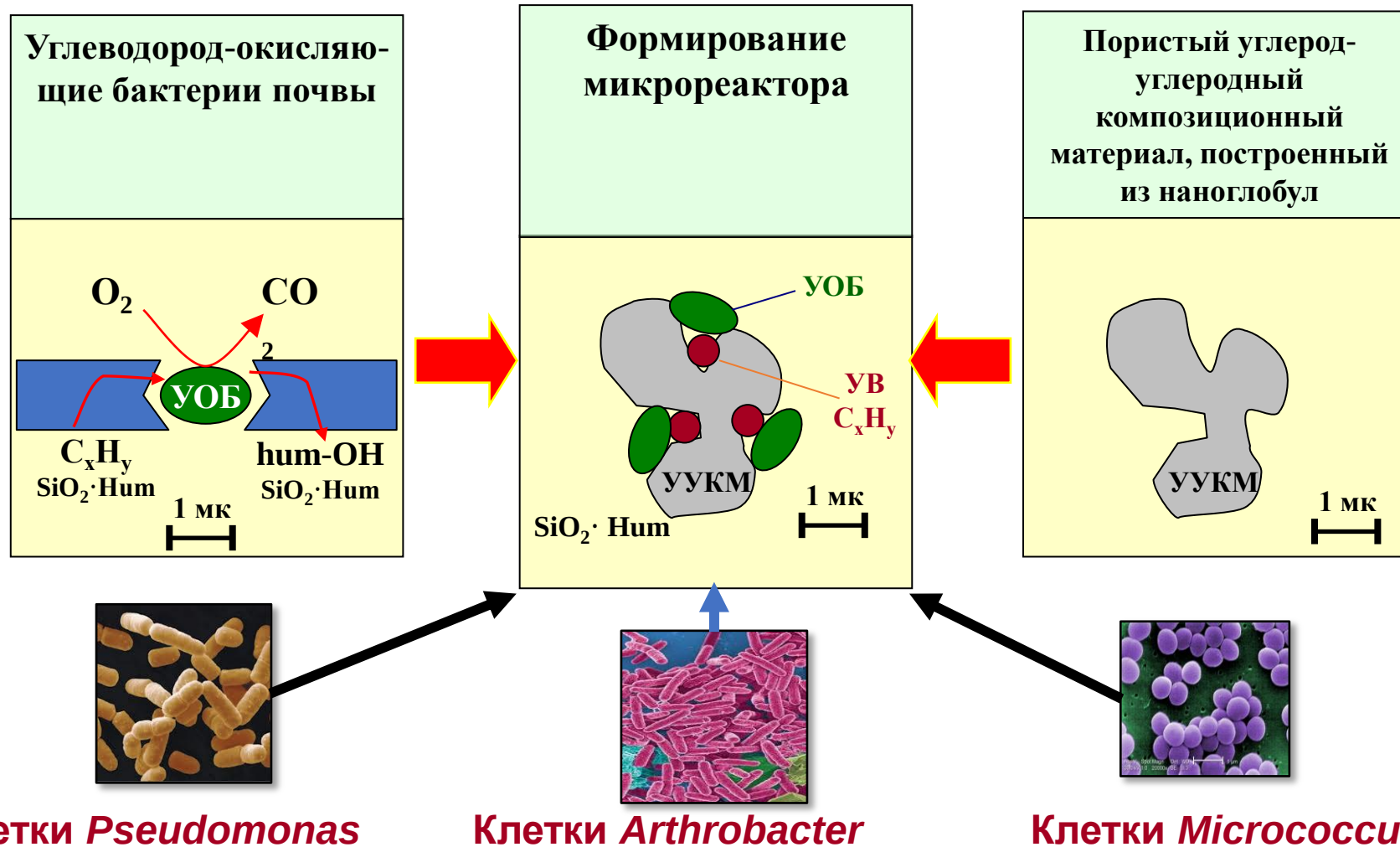
1. В недавнем исследовании *Jiemin Cheng et al./Environmental Science and Pollution Research (2020) 27:18423–18433/* было показано, что введение в почву **3wt% CB (20-70 nm, S - 1100 m²/g, 5 wt.% of O)** - защищает (за счёт адсорбции) корни растений (плевел, мангольд) от угнетающего воздействия тяжёлых металлов (Zn, Cu, Cd, Sn, Pb) (данные получены на примере Cd), а также увеличивает обилие и стимулирует активность почвенной микрофлоры, особенно азот- и фосфор-функциональных бактерий (*Rhodospirillum* and *Nitrospira*) and the phosphorus-functional bacteria (*Bradyrhizobium* and *Flavobacterium*)



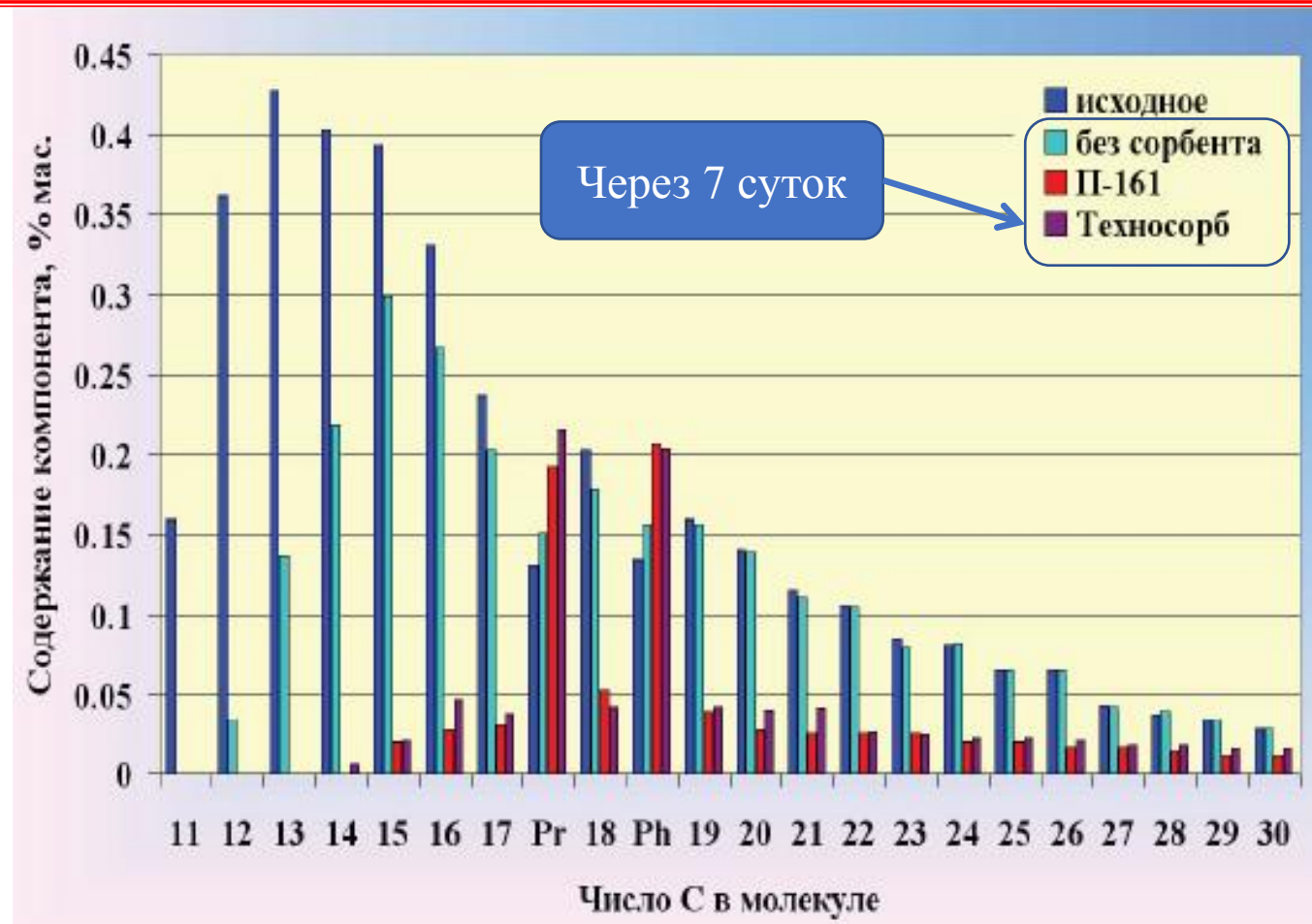
Modified nanoscale carbon black might be applied for the in-situ immobilization of heavy metals and remediation of contaminated soils because of its beneficial effects on plant growth, root cellular morphogenesis, and the microbial community.

2. P.S. Работы в этом направлении проводились в СО РАН ещё в 2007 г. в рамках интеграционных проектов (ИППУ СО РАН + ИХН СО РАН) [Лихолобов В.А.](#), [Раздьяконова Г.И.](#), [Алтунина Л.К.](#), [Сваровская Л.И.](#), [Березин Л.В. Способ очистки земель от нефти и нефтепродуктов и рекультивации почв сельскохозяйственного назначения RU2 414 313C2, 2008 г.](#)

Углеродный сорбент способствует «размножению» нативных нефтеокисляющих бактерий



Испытания сорбентов на загрязненной нефтью почве

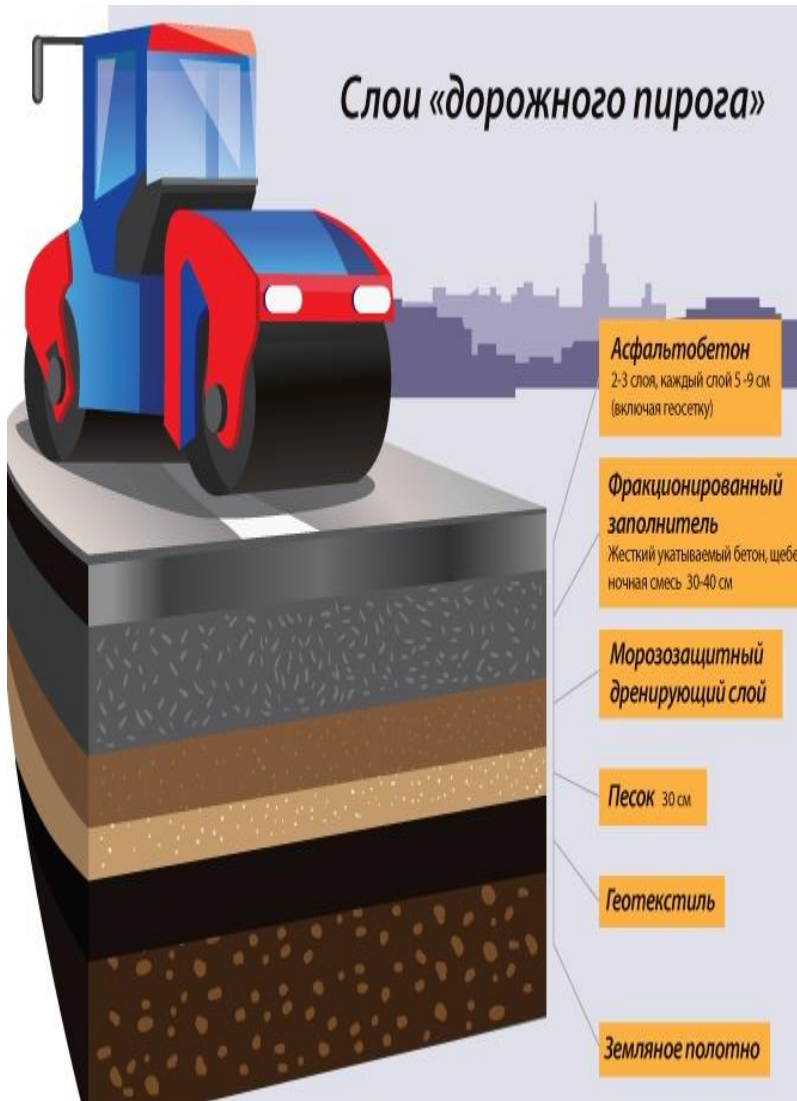


Молекулярно-массовое распределение углеводородов нефтезагрязненных почв в процессе их деструкции почвенной микрофлорой, стимулированной внесением сорбентов.

Работа выполнена совместно ИППУ СО РАН с ИХН СО РАН (2007 г.)

Потенциальные области использования углерода, образующегося при пиролизе метана, в «мегатоннажных» количествах

Дорожное строительство: добавки в асфальты и бетоны , экраны для насыпей;



1. Влияние СВ N990 (термический ТУ) на свойства асфальтного покрытия

[P. Cong et al. / A Study on use of Carbon Black Powder in Bituminous Road Construction/ Construction and Building Materials, 52 (2014) 306-313]

Показатель качества	Количество введённого СВ, вес. %			
	0	10	18	26
Проницаемость, 25оС	56	47	41	32

Вязкость, 60оС	1085	19300	88500	90000
135оС	1,41	1,67	1,78	1,80

+ повышение устойчивости к воздействию ультрафиолета (300-400 нм);

+ появление при содержании СВ > 20% электропроводности

2. Добавка СВ (ТУ) в бетонную смесь (~20 вес.%) значительно снижает проницаемость бетонного блока (для хлорид-ионов в воде) и увеличивает адгезию его поверхности (прочность связывания) с асфальтным слоем. [Sami Masadeh /The Effect of Added Carbon Black to Concrete Mix...../ Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2015, 3, 271-276]

3. Применение ТУ для изготовления морозостойких пористых, но водонепроницаемых, экранов для насыпей, дамб.

Total hydrogen use was about **115 Mt in 2020**. The International Energy Agency [Net Zero by 2050](#) (May 2021) and [Global Hydrogen Review 2021](#) report project annual hydrogen demand of slightly more than **200 million tones in 2030 and 530 Mt in 2050**. The **530 Mt hydrogen** would be produced **58% by electrolysis of water** and **40%** from fossil fuels with carbon capture and storage (**NG-CCS-Technology**). The path towards **low-carbon hydrogen using nuclear electricity would represent 400 new Generation-IV 1 GW nuclear reactors [on a global scale]**", (by [Bret WILLIAMS](#): www.hydrogen-fuelnews.com/author/bret-2-2-2/2021; by [Alicia MOORE](#): www.hydrogenfuelnews.com/nuclear-hydrogen-fuel/8544906/2021).

Though the EU puts specific attention to the build-up of H₂ generation based on renewables, the cheapest way of its current large-scale production is using natural gas as a feedstock – the fuel imported now primarily from Russia. Russia has a significant potential for the expansion of own hydrogen production, taking into account both the reserves plus **level of natural gas production** and the potential of **nuclear power capacities**. *So, technological progress in 'turquoise' H₂ production and hydrogen transportation methods (including pipeline and maritime transport) will help Russia to solidify its position in the EU market and make the future of the EU-Russia energy relations particularly tricky.* a) Russia's hydrogen strategy: a work in progress, [OSW Commentary, 2020, Jul. 22](#); b) Hydrogen at the Gates: Towards a New Chapter in the EU-Russia Energy Relations-2020, <https://think.visegradfund>; c) Russia's concepts for developing hydrogen, [Global Energy, 2021, Aug. 12](#); d) Prospects and Obstacles for Green Hydrogen Production in Russia. [Energies, 2021, 14, 718](#); [[E3S Web of Conferences 265, 04011 \(2021\)](#)]

Некоторые исходные данные:

В 2020 г. в России было произведено (как отдельного коммерческого продукта) около 0,5 млн. тонн водорода. Стратегия развития водородной энергетики в России на период до 2035 г. и, далее, на перспективу 2050 года в оптимистическом варианте предусматривает увеличение производства коммерческого водорода в 2035 г. до 5 млн. т, из них 2 млн.т на экспорт, а в 2050 г. до 30 млн. тонн в год, из них до 20 млн. тонн на экспорт (при ожидаемом в 2050 г. объёме мирового рынка продаж водорода до 50 млн. т).

Объём произведённой в 2020 г. электроэнергии (TWh): тепловая 620 ; гидро – 207; атом – 216; ветер+солнце – 3. На 1 января 2020 года в России на 11 действующих АЭС эксплуатируется 38 энергоблоков общей мощностью ~30 GW .

Расход электроэнергии (с учётом необходимости использования её также и для подогрева реагентов и работы оборудования) для получения 1 тонны водорода путём пиролиз метана в плазме, – 30,8 MWh. Таким образом, 1 GW установленной мощности атомного энергоблока даёт в год около 300 тыс. тонн «бирюзово-розового» водорода.

Что и сколько потребуется, и что и сколько дополнительно получится при производстве 1 млн. тонн в год «бирюзово-розового» водорода.

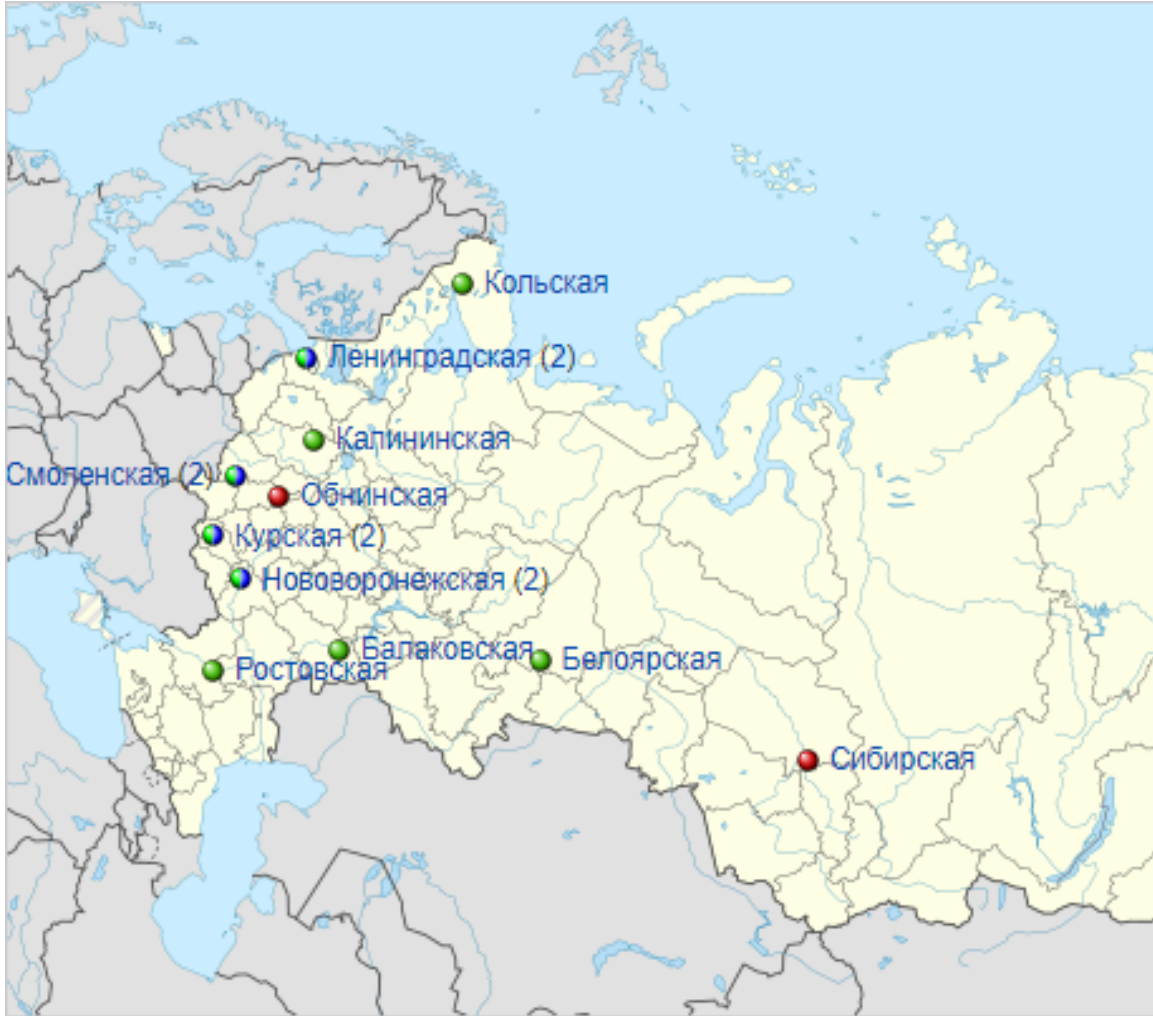
Потребуется: 4 млн.тонн (или 5,6 млрд.куб.м в год) природного газа и 3,5 GW мощности атомных энергоблоков;

Получится: дополнительно 3 млн.тонн в год дисперсного углерода, которым можно:

- рекультивировать (из расчёта 10 вес % на слой почвы 30 см, что даёт расход 60 кг на кв.м) 5000 га земли (в год) или

- использовать при строительстве новых современных дорог (из расчёта 20 вес.% в асфальтный и бетонный слои суммарной толщиной 50 см) длиной 2000 км при ширине полотна 12 м.

P.S. При реализации этого углерода по цене 100 евро за тонну расчётная стоимость водорода составит 1,4 евро за кг; по цене 200 евро за тонну – 1 евро за кг H₂ (без реализации углерода – 1,7 евро за кг H₂).



АЭС на карте России

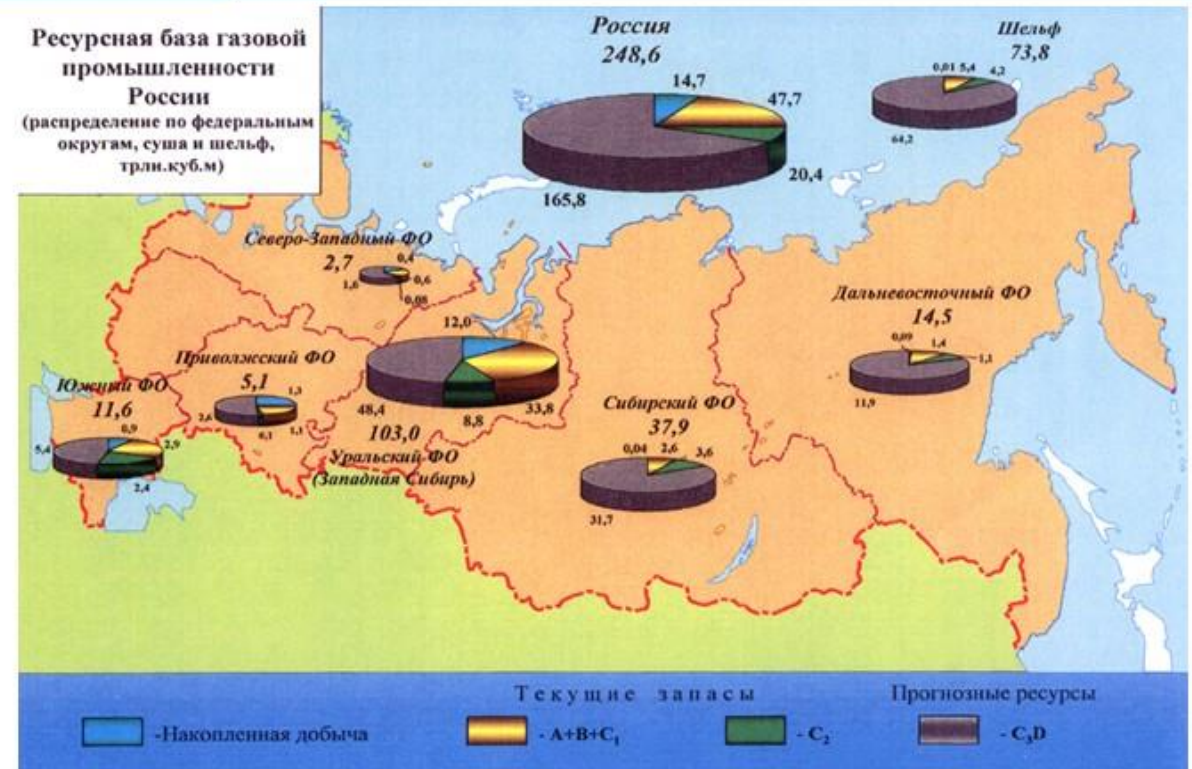
- — Остановленные
- — Эксплуатируемые
- — Строящиеся

На 1 января 2020 года в России на 11 действующих АЭС эксплуатируется 38 энергоблоков общей мощностью ~30 ГВт.



Структура ресурсов и запасов природного газа России, трлн. м³

Ресурсная база газовой промышленности России
(распределение по федеральным округам, суша и шельф, трлн.куб.м)



Если развитие водородной энергетики в России базировать на «бирюзовом» водороде, то не целесообразно ли необходимые для этого новые мощности атомных энергоблоков размещать на севере Сибирского ФО ??

Спасибо

за внимание