

# ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ УЛАВЛИВАНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ МИРОВОЙ ЭКОНОМИКИ (ОБЗОР)<sup>1</sup>

© 2022 г. С. П. Филиппов<sup>а</sup>, \*, О. В. Жданев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Институт энергетических исследований РАН, Нагорная ул., д. 31/2, Москва, 117186 Россия

<sup>б</sup>Российское энергетическое агентство, просп. Мира, д. 105, стр. 1, Москва, 129085 Россия

\*e-mail: fil\_sp@mail.ru

Поступила в редакцию 25.01.2022 г.

После доработки 17.02.2022 г.

Принята к публикации 24.02.2022 г.

Имеется несколько направлений декарбонизации экономики и энергетики, которые взаимно дополняют одно другое в силу наличия ограничений на масштабы использования каждого из них. Привлекательность применения технологий улавливания и захоронения CO<sub>2</sub> (carbon capture and storage – CCS) для этих целей обусловлена возможностью достижения углеродной нейтральности при сохранении использования органических топлив в энергетике на длительный период. Это особенно важно в отношении угля как наиболее карбоноёмкого топлива. Создание индустрии CCS обеспечит плавный переход от энергетики преимущественно на органическом топливе к энергетике на основе возобновляемых и ядерных источников энергии. Показано, что крупномасштабное изъятие из биосферы углерода, являющегося ключевым биогенным химическим элементом на планете, не будет представлять существенной опасности. Важно обеспечить безопасность людей в районах захоронения больших объемов CO<sub>2</sub>. Приведены оценки вместимости имеющихся на планете резервуаров для длительного хранения CO<sub>2</sub> в различных геологических структурах. Выяснено, что она многократно превышает потребности на весь XXI в. Такие резервуары имеются практически во всех регионах планеты, но в отдельных странах их может и не быть. Это может стать поводом для создания локальных рынков услуг по захоронению CO<sub>2</sub>. В мире накоплен большой опыт разработки и реализации проектов CCS. Глобальная индустрия CCS уже сейчас может быть построена на основе промышленно освоенных технологий. Целью разработки новых технологий является снижение затрат на CCS. В первую очередь это касается технологий выделения CO<sub>2</sub> из газовых смесей и захоронения его в горных породах. Поскольку центры эмиссии CO<sub>2</sub> и удобные места для его захоронения разнесены в пространстве, то неизбежным станет сооружение крупных трубопроводных систем для транспортирования CO<sub>2</sub> на большие расстояния. По мощности и протяженности они могут стать сопоставимыми с существующими газовыми сетями.

**Ключевые слова:** углекислый газ, декарбонизация, парниковые газы, технология, улавливание и захоронение углерода, углеродный цикл, углеродная нейтральность, энергетика, экономика

**DOI:** 10.56304/S0040363622090016

Основным фактором развития мировой экономики на обозримую перспективу, видимо, станет так называемая “климатическая политика”. Она предусматривает существенное сокращение выбросов парниковых газов (ПГ) антропогенного происхождения в атмосферу. Прежде всего, это касается энергетики как главного источника антропогенных выбросов ПГ [1]. Создаваемый такими газами парниковый эффект, ведущий к росту температуры поверхности планеты, считается основной причиной наблюдаемых изменений в

глобальной климатической системе [2]. Беспокойство вызывают усиление и учащение погодных катаклизмов (экстремальных засух, наводнений, ураганов, морозов и т.д.), которые приводят к негативным экономическим последствиям. При этом в мировом экспертном сообществе до сих пор нет консенсуса в отношении определяющей роли антропогенной деятельности в повышении температуры поверхности Земли [3]. В [4–6] указывается на недостаточный учет в используемых климатических моделях природных факторов (космических воздействий, вулканической деятельности, природных аэрозолей, поглощения CO<sub>2</sub> наземными и морскими экосистемами и др.). Пробле-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30013 от 17.03.2021) в Институте энергетических исследований РАН.

ма изменения климата является глобальной. Поэтому решаться она должна мировым сообществом сообща. К сожалению, климатическая политика приобретает все более выраженный геополитический характер, что создает риски усиления конфронтации в мире.

Решающий импульс декарбонизации мировой экономики и энергетики придало Парижское соглашение по климату, в котором зафиксировано требование удержания прироста глобальной средней температуры намного ниже  $2^{\circ}\text{C}$  сверх доиндустриальных уровней и приложения усилий с целью ограничить рост температуры до  $1.5^{\circ}\text{C}$ , и отмечено, что это значительно сократит риски и воздействие на изменение климата [7].

Согласно оценкам Международного энергетического агентства (МЭА), для реализации данного соглашения необходимо к 2040 г. обеспечить двукратное сокращение годовых выбросов  $\text{CO}_2$  от сжигания топлив (с 33.6 Гт  $\text{CO}_2$  в 2019 г. до 15.8 Гт  $\text{CO}_2$  в 2040 г. с последующим удержанием их на этом уровне) и впервые в истории перейти на нисходящую траекторию мирового энергопотребления (с 617 млн ТДж в 2019 г. до 557 млн ТДж в 2040 г. по первичной энергии) [8]. Поражают беспрецедентно огромные объемы необходимого сокращения выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу (около 17.8 Гт  $\text{CO}_2$  в год) и высокая скорость осуществления нужных изменений – всего 20 лет.

Решение данных проблем видится в интенсификации энергосбережения в мировой экономике и осуществлении глобального энергоперехода – замещения ископаемых топлив возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ) и углеродсодержащих энергоносителей безуглеродными электроэнергией и водородом [8]. Однако переход к водородной энергетике не будет простым. Необходимостью станет разработка целого комплекса новых технологий в сфере потребления водорода, без чего концепция водородной энергетики не может быть реализована [9]. Также потребуются коренные переосмысление странами стратегических решений в развитии собственной энергетики, прежде всего в повышении ее эффективности [10, 11].

Энергопереход и декарбонизация экономики оказываются тесно взаимосвязанными. Их совместная реализация должна привести к экономике устойчивого развития, одним из ключевых положений которой является сохранение ископаемых топлив для будущих поколений [12]. В [13, 14] разработаны подходы к ее исследованию и реализации. Однако до сих пор имеются весьма скромные успехи в претворении данной концепции в жизнь [8, 15].

В последние годы стало понятным, что проводить политику декарбонизации придется в условиях существенной трансформации спроса на энергию под воздействием разворачивающейся

научно-технической революции и изменения условий и образа жизни людей [16]. Грядет так называемая “новая электрификация” экономики. Намечен переход к экономике рециклингового типа. Все эти факторы требуют тщательного учета при прогнозировании спроса на энергию, который будет в решающей степени определять масштабы развития энергетики и требования к трансформации ее структуры [17].

Имеются различные подходы к осуществлению декарбонизации экономики и энергоперехода. Можно предположить, что для разных стран состав оптимальных решений может быть существенно различным. В статье представлены результаты исследования перспектив применения технологий улавливания и захоронения  $\text{CO}_2$  в мире и России и связанные с этим проблемы.

Вопросы использования  $\text{CO}_2$  в данном обзоре не рассматриваются. Объяснение тому следующее. В настоящее время в мире ежегодно потребляется около 0.23 Гт  $\text{CO}_2$ , в основном для производства мочевины (57%) и извлечения дополнительной нефти (34%), а также в пищевой промышленности (6%), металлургии (2%) и в некоторых других отраслях экономики [18, 19]. Но утилизированный таким образом углекислый газ в течение непродолжительного времени вновь попадает в атмосферу. Потому эти направления использования  $\text{CO}_2$  не могут рассматриваться в качестве мероприятий по декарбонизации экономики. Хранение же  $\text{CO}_2$  в виде материалов с большим сроком службы (например, для целей строительства) пока является чрезвычайно затратным, особенно в случае извлечения  $\text{CO}_2$  из атмосферы. Получаемые на основе  $\text{CO}_2$  продукты оказываются неконкурентоспособными на рынке. Имеются большие неопределенности и обоснованные сомнения в успешности решения данной проблемы в будущем [19]. Это касается и технологий, и масштабов потребления  $\text{CO}_2$ . Применение для этих целей внеэкономических методов, например, наложения очень больших штрафов за выбросы  $\text{CO}_2$ , может вызвать катастрофические последствия в экономике.

## МЕСТО ТЕХНОЛОГИЙ CCS В ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ

Ослабление угрозы изменения глобального климата видится в уменьшении концентрации  $\text{CO}_2$  и других парниковых газов в атмосфере. Прежде всего, это касается  $\text{CO}_2$ , который определен в качестве основного “виновника” в создании парникового эффекта [2]. В решении данной задачи имеется несколько конкурирующих направлений.

Первую группу составляют методы, предусматривающие сокращение поступления  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Они включают:

энергосбережение, позволяющее уменьшить потребление топлив и, следовательно, выбросы парниковых газов;

изменение структуры используемых видов топлива путем вытеснения угля и мазута природным газом, при сжигании которого удельные выбросы  $\text{CO}_2$  меньше соответственно в 1.8 и 1.4 раза;

замещение ископаемых топлив углероднейтральными природными биотопливами (древесиной, сельскохозяйственными отходами и др.);

вытеснение органических топлив безуглеродными видами первичной энергии, включая ВИЭ (солнечную, ветровую и т.д.) и атомную энергию;

улавливание  $\text{CO}_2$  из продуктов окисления органических топлив с последующим его надежным захоронением на долгосрочную перспективу (столетия).

Другую группу составляют методы, обеспечивающие извлечение  $\text{CO}_2$  из атмосферы, включая:

биологическое поглощение  $\text{CO}_2$  путем:

восстановления и интенсификации жизнедеятельности природных экосистем;

создания аква- и агропромышленных биоплантаций с переработкой получаемой биомассы в углероднейтральные топлива, в том числе моторные (биодизель, биокеросин и др.);

химическое поглощение  $\text{CO}_2$  с последующим его захоронением или переработкой в товарные углеродсодержащие продукты;

извлечение  $\text{CO}_2$  с использованием технологий искусственного фотосинтеза с дальнейшей переработкой получаемой биомассы.

Среди направлений декарбонизации экономики и энергетики особое внимание стали привлекать технологии CCS. Применение таких технологий позволяет не отказываться от использования органических топлив в энергетике. Это наиболее важно в отношении угля, который среди коммерческих топлив характеризуется самыми большими удельными выбросами  $\text{CO}_2$  на единицу получаемой энергии. По оценкам МЭА, для выхода на траекторию развития мировой энергетики, обеспечивающую удержание роста глобальной температуры на поверхности планеты  $1.5^\circ\text{C}$ , уже к 2030 г. потребуются суммарная мощность установок извлечения и захоронения  $\text{CO}_2$  не менее 1.5 млрд т в год [8].

В Климатическом пакте конференции в Глазго (Glasgow Climate Pact) содержится призыв к странам мира ускорить темпы сокращения потребления угля. Но это не относится к потребителям угля, применяющим технологии CCS [20]. Поэтому перспективы дальнейшего крупномасштабного использования угля, включая его глубокую пере-

работку, например в водород, будут полностью определяться успехами в разработке и применении технологии CCS [21, 22]. Данной технологии отводится важная роль в реализации политики декарбонизации российской экономики [23].

### УГРОЗЫ КРУПНОМАСШТАБНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ CCS

Углерод является ключевым биогенным химическим элементом на планете. Поэтому закономерным является вопрос о возможных угрозах человечеству крупномасштабного применения технологий CCS, в которых предусматривается выведение из биосферы больших количеств углерода с захоронением на длительный период. Для ответа на этот вопрос нужно определить место антропогенных выбросов в сложившемся на Земле углеродном цикле.

Ресурсы углерода, Гт С, на Земле огромны [24]:

Атмосфера .....	$7.2 \times 10^2$
Океан .....	$3.84 \times 10^4$
В том числе	
неорганический углерод .....	$3.74 \times 10^4$
органический углерод .....	$0.10 \times 10^4$
Литосфера .....	Более $7.5 \times 10^7$
В том числе:	
карбонаты .....	Более $6.0 \times 10^7$
кероген .....	$1.5 \times 10^7$
Наземная биосфера .....	$(1.8-2.2) \times 10^3$
В том числе:	
живая биомасса .....	$(0.6-1.0) \times 10^3$
мертвая биомасса	
(почвы и др.) .....	$1.2 \times 10^3$
Органические топлива .....	$4.13 \times 10^3$
В том числе:	
уголь .....	$3.51 \times 10^3$
нефть .....	$0.23 \times 10^3$
природный газ .....	$0.14 \times 10^3$
прочие (торф и др.) .....	$0.25 \times 10^3$

Практически все ресурсы (99.94%) сосредоточены в литосфере в виде карбонатов и керогена. В наземной биосфере содержится от 1800 до 2200 Гт углерода, или  $2.9 \times 10^{-3}\%$  общего ресурса углерода на планете. Немногим больше углерода (около 4130 Гт, или  $5.5 \times 10^{-3}\%$  общего ресурса углерода на планете) находится в виде ископаемых органических топлив, в основном в виде угля.

За весь индустриальный период было сожжено примерно 445 Гт С, т.е. около 10% исходных топ-

**Таблица 1.** Баланс глобальных антропогенных выбросов CO<sub>2</sub> и их поглощения

Показатель	Кумулятивные значения за период 1850–2019 гг., Гт С/год	Средние значения за период, Гт С/год			
		1980–1989 гг.	1990–1999 гг.	2000–2009 гг.	2010–2019 гг.
Приток (эмиссия) CO <sub>2</sub> :					
сжигание топлив	445 ± 20	5.4 ± 0.3	6.3 ± 0.3	7.7 ± 0.4	9.4 ± 0.5
изменение землепользования	210 ± 60	1.3 ± 0.7	1.4 ± 0.7	1.4 ± 0.7	1.5 ± 0.7
Суммарные выбросы CO <sub>2</sub>	655 ± 65	6.7 ± 0.8	7.7 ± 0.8	9.1 ± 0.8	10.9 ± 0.9
Сток CO <sub>2</sub> :					
накопление в атмосфере	265 ± 5	3.4 ± 0.02	3.2 ± 0.02	4.1 ± 0.02	5.1 ± 0.02
поглощение океанами	160 ± 20	1.7 ± 0.4	2.0 ± 0.5	2.1 ± 0.5	2.5 ± 0.6
поглощение сушией	210 ± 55	2.0 ± 0.7	2.6 ± 0.7	2.9 ± 0.8	3.4 ± 0.9
Небаланс	20	–0.4	–0.1	0	–0.1

ливных ресурсов (табл. 1) [25]. Годовые объемы эмиссии CO<sub>2</sub> в атмосферу от сжигания топлив нарастают. В период 2010–2019 гг. они составляли в среднем 9.4 Гт С в год, или 34.5 Гт CO<sub>2</sub>/год. В 2019 г. выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу от сжигания топлив достигли 9.7 Гт С в год (35.6 Гт CO<sub>2</sub>/год).

Выбрасываемый в атмосферу антропогенный CO<sub>2</sub> встраивается в глобальный углеродный цикл. Из всей массы антропогенного CO<sub>2</sub> около 32% поглощается сушией, прежде всего биосферой. Еще 23% CO<sub>2</sub> аккумулируется океаном, включая морскую биоту. Оставшиеся 45% антропогенного CO<sub>2</sub> накапливаются в атмосфере. Естественно, это ведет к росту в ней концентрации CO<sub>2</sub>.

Природные потоки CO<sub>2</sub> между атмосферой и поверхностью Земли в рамках глобального углеродного цикла превышают ±210 Гт С в год, в том числе ±120 Гт С (57.1%) в год между сушией и атмосферой и ±90 Гт С (42.9%) в год между океаном и атмосферой [25]. Следовательно, выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу при сжигании ископаемых органических топлив не превышают 5% природных потоков CO<sub>2</sub>.

Следует отметить, что углерод, инжестируемый в форме CO<sub>2</sub> в глубокие слои литосферы, не окажется навсегда потерянным для биосферы. Этому будут способствовать подвижность земной коры и активно протекающие в ней геофизические и геохимические процессы. Взаимодействие CO<sub>2</sub> с природными минералами, богатыми магнием, железом и другими элементами, и водой в условиях высоких температур и давлений ведет к образованию абиогенного метана и других органических соединений [26]. В геологическом масштабе времени эти вещества имеют возможности вновь оказаться в поверхностном слое и вклю-

чаться в природные потоки углерода, связанные с биосферой.

Из сказанного следует, что крупномасштабное применение технологий CCS с соответствующим улавливанием и последующим захоронением больших объемов углерода не будет создавать скольконибудь значимых угроз для существования биосферы и развития человеческой цивилизации.

Другое дело, что в результате сжигания органических топлив человечество очень быстрыми темпами расходует невозобновляемые ресурсы углерода, концентрировавшиеся природой в течение многих миллионов лет в виде ископаемых органических топлив. Такая деятельность противоречит принципам концепции устойчивого развития экономики, провозглашенной ООН и принятой практически всеми государствами мира. Как уже отмечалось, один из основополагающих принципов данной концепции требует оставить невозобновляемые природные ресурсы будущим поколениям [12]. Это создает идеологическую основу для расширения использования возобновляемых источников энергии. Однако переход к ним должен быть постепенным, необременительным для развития экономики как мира в целом, так и отдельных стран. В этом положительную роль может сыграть крупномасштабное применение технологий CCS.

В то же время технологии CCS, рассчитанные на большие объемы CO<sub>2</sub>, могут создавать угрозу для людей в местах их проживания. Это связано с тем, что CO<sub>2</sub> существенно (в 1.5 раза) тяжелее воздуха. Это бесцветный газ, не имеющий запаха при невысоких концентрациях. Поэтому для его идентификации требуются специальные датчики. Газ CO<sub>2</sub> отнесен к веществам IV класса опасности. Но при высоких концентрациях он обладает удушающим действием. Безопасной для длительного пребы-

вания людей считается концентрация  $\text{CO}_2$  не выше 1000 ppm или 0.1% (по объему) [27]. При авариях в оборудовании CCS  $\text{CO}_2$  может скапливаться в пониженных местах территорий и создавать опасные концентрации. При содержании  $\text{CO}_2$  в атмосферном воздухе свыше 5% (по объему) люди начинают терять сознание, возможен последующий смертельный исход [28]. Поэтому неременным условием применения CCS-установок должен быть мониторинг экологической ситуации в районах их размещения. Сооружение и эксплуатация установок CCS регламентируются стандартом ISO 7914:2017 [29].

### ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ $\text{CO}_2$

Согласно работе [30] к 2050 г. суммарная производительность в мире CCS-установок может достичь 5.6 Гт  $\text{CO}_2$  в год (2.8 трлн  $\text{м}^3/\text{год}$ ), т.е. около третьей части необходимого объема глобального сокращения выбросов  $\text{CO}_2$ . Это в 150 раз больше нынешнего уровня извлечения и захоронения  $\text{CO}_2$  и сопоставимо с современной мировой газовой отраслью (около 4.01 трлн  $\text{м}^3/\text{год}$  в 2020 г.) [31]. Такие масштабы позволяют говорить о возможности создания глобальной индустрии CCS с огромным рынком соответствующих технологий и оборудования. Для этого потребуется от 655 до 1280 млрд дол. США инвестиций до 2050 г. [30]. Если исходить из этих оценок, то удельные капиталовложения в реализацию CCS-проектов составят в среднем около 120–230 дол. США на 1 т удаляемого  $\text{CO}_2$  в год. Довольно широкий диапазон удельных капиталовложений обусловлен различием применяемых CCS-технологий (по физико-химическим процессам и технологическому оборудованию), производительности реализуемых проектов и геологических условий захоронения  $\text{CO}_2$ .

Важным для развития глобальной индустрии CCS является вопрос о наличии на планете доступных геологических структур, имеющих достаточную вместимость для надежного захоронения огромных объемов  $\text{CO}_2$  на столетия. Суммарная их вместимость должна быть не менее 450 Гт  $\text{CO}_2$  при условии ежегодного захоронения 5.6 Гт  $\text{CO}_2$  в течение 80 лет, т.е. до конца XXI в. Можно предположить, что такого срока будет достаточно для плавного и бесконфликтного перехода к преимущественно безуглеродной энергетике (на основе ВИЭ, быстрых реакторов с замкнутым ядерным циклом и технологий термоядерного синтеза), обеспечивающей выполнение требований Парижского соглашения.

По оценкам, сделанным в работе [32] с использованием модели MIT EPPA (Massachusetts Institute of Technology Economic Projection and Policy Analysis Model), кумулятивные объемы за-

хоронения  $\text{CO}_2$  в период 2020–2100 гг. могут составить от 290 до 425 Гт  $\text{CO}_2$  в зависимости от удельных затрат на транспортирование и захоронение  $\text{CO}_2$ .

Основными механизмами захоронения  $\text{CO}_2$  являются:

заполнение пустот в горных породах (естественных и искусственно созданных);

диффузия в поры материала пород;

растворение в подземных флюидах (например, в водных солевых растворах);

химическое связывание с веществом пород в стабильные твердые соединения (карбонаты).

В общем случае эти механизмы реализуются одновременно, но с существенно разной скоростью, которая зависит от многих факторов (температуры, давления, химического состава реагирующих сред) [33, 34].

К традиционным хранилищам  $\text{CO}_2$  относятся истощенные нефтяные и газовые месторождения (depleted oil and gas fields). Технология инъекции в них  $\text{CO}_2$  достаточно хорошо освоена и давно используется в целях повышения нефтеотдачи пластов (enhanced oil recovery). Однако такие резервуары имеются далеко не везде. Другим типом резервуаров для хранения  $\text{CO}_2$  являются подземные структуры с водными солевыми растворами (saline aquifers), достаточно распространенные и имеющие большую вместимость. Имеются возможности хранения  $\text{CO}_2$  и в угольных пластах. Но этот способ пока не рассматривается в качестве приоритетного. Большой интерес для создания глобальной индустрии CCS представляют горные породы, образованные реакционными по отношению к  $\text{CO}_2$  минералами. К таким породам относятся, прежде всего, базальты и перидотиты (basalts and peridotites) – магматические горные породы с повышенным содержанием щелочных минералов. Их ресурсы на планете огромны и имеются в большинстве регионов мира. Массивы таких пород могут быть пористыми и плотными. В последнем случае требуется применение специальных методов гидроразрыва пласта.

Для некоторых стран интерес может представлять подземное хранение  $\text{CO}_2$  в форме газовых гидратов в зоне криолитов [35]. Обширные зоны вечной мерзлоты с благоприятными условиями для образования гидратов  $\text{CO}_2$  имеются в Канаде [36] и России [37]. В Западной Сибири подходящие структуры для захоронения  $\text{CO}_2$  расположены на глубине 600–1000 м (ниже зоны стабильности газовых гидратов) и надежно прикрыты сверху толстым слоем глинистых и мерзлых пород. Объем их огромен [37]. Формирование стабильных гидратов  $\text{CO}_2$  возможно при довольно жестких условиях, определяемых соотношением темпе-

ратуры, давления, солености воды и др. В каждом объеме гидрата может содержаться до 170 объемов  $\text{CO}_2$  [38]. Экспериментально показано, что при закачке  $\text{CO}_2$  в природные резервуары, содержащие гидрат метана, наблюдается процесс замещения метана углекислым газом. Добытый таким образом метан может в определенной мере компенсировать затраты на транспортирование и захоронение  $\text{CO}_2$  [35]. Однако пока разработка технологий для подземного хранения  $\text{CO}_2$  в газогидратной форме находится на начальном этапе. Проводятся численные и экспериментальные исследования [35, 38, 39]. Поэтому далее данный ресурс для захоронения  $\text{CO}_2$  не рассматривается.

Подземные резервуары для длительного хранения  $\text{CO}_2$  должны быть гидравлически герметичными. В противном случае закачанный  $\text{CO}_2$  будет мигрировать за его пределы с последующим выходом на поверхность. Такие проблемы могут наблюдаться при использовании для хранения  $\text{CO}_2$  подземных пластов с водными солевыми растворами, которые обладают повышенной горизонтальной подвижностью. Добиться герметичности отработанных месторождений углеводородов весьма непросто, так как их (месторождений) своды перфорированы большим количеством добывающих и разведочных скважин. Породы, покрывающие резервуар, должны быть плотными, а их толщина достаточной для исключения выхода  $\text{CO}_2$  на поверхность. Для обеспечения надежного захоронения  $\text{CO}_2$  приходится закачивать его на большие глубины. Это требует создания высокого давления и больших расходов энергии, в том числе для вытеснения жидких флюидов из пор.

Вместимость подземных резервуаров для хранения  $\text{CO}_2$  определяется их объемом, пористостью (porosity) и минералогическим составом. Пористость горных пород представляет собой отношение объема пор (включая пустоты между частицами горных пород) к общему объему резервуара и колеблется от 0 до примерно 35% [40]. Песчаники и карбонаты с большим объемом пор считаются высококачественными резервуарами для хранения  $\text{CO}_2$ . Поры обычно заполнены солеными водами или углеводородами (жидкими или газообразными), которые потребуются вытеснить при заполнении резервуара  $\text{CO}_2$ .

Не всё имеющееся поровое пространство может быть заполнено  $\text{CO}_2$  из-за риска нарушения герметичности резервуара вследствие закачки под высоким давлением. Это условие описывается показателем эффективности хранения (storage efficiency). Он представляет собой долю порового пространства, которая может быть заполнена  $\text{CO}_2$  без риска его прорыва за пределы резервуара. Значение этого показателя колеблется от 2–5% для плохогогерметичных водоносных горизонтов

до 70–80% и более для сильно истощенных газовых месторождений, как правило, хорошо изолированных [40]. В определенном смысле этот показатель можно соотнести с коэффициентом извлечения (recovery factor) в нефтегазовой отрасли.

К подземным резервуарам для хранения  $\text{CO}_2$  предъявляется много других требований. Одной из важнейших их характеристик является проницаемость (permeability), которая определяет скорость распространения  $\text{CO}_2$  в горной породе. От этой величины зависят объемная скорость подачи  $\text{CO}_2$  в нагнетательные скважины и количество требуемых скважин, а значит, и затраты на захоронение. Эффективными считаются резервуары со средней проницаемостью 50 мкм<sup>2</sup> (50 мД) [40]. Существенными лимитирующими факторами являются глубина расположения резервуара, место расположения резервуара (на суше или под морским дном), удаленность от источников выбросов  $\text{CO}_2$ . Эти факторы определяют протяженность скважин и параметры транспортных систем, а следовательно, их стоимость. Все это ограничивает число возможных мест для устройства хранилищ  $\text{CO}_2$ . С технической и экономической точки зрения наиболее перспективными для захоронения  $\text{CO}_2$  считаются истощенные месторождения углеводородов и подземные структуры с водными солевыми растворами.

Инжекция  $\text{CO}_2$  в горный массив может осуществляться в виде газа или водного раствора, в том числе на основе морской воды. Для приготовления водного раствора  $\text{CO}_2$  требуется около 25 т воды на 1 т  $\text{CO}_2$  [41]. Более перспективным вариантом является инъекция  $\text{CO}_2$  в сверхкритическом состоянии без использования воды в качестве жидкости-носителя [42]. Данная технология сейчас активно разрабатывается.

Обычно геофизические и геохимические процессы протекают довольно медленно. Процесс образования карбонатов может затягиваться на сотни и тысячи лет [30]. Но при благоприятных условиях процессы химического связывания  $\text{CO}_2$  идут много быстрее. Это показали натурные эксперименты. В проекте Carbfix при закачке водного раствора  $\text{CO}_2$  (12 тыс. т) в не очень глубоко залегающие базальтовые пласты (400–800 м) более 95%  $\text{CO}_2$  было минерализовано в течение двух лет [23]. В проекте Wallula в американском штате Вашингтон при закачке около 1000 т  $\text{CO}_2$  в сверхкритическом состоянии в пористые и проницаемые базальтовые породы в течение двух лет минерализовалось около 60% введенного  $\text{CO}_2$  [42].

Известно достаточно большое количество исследований, касающихся различных аспектов развития индустрии CCS в мире, включая оценки требуемых ресурсов. В работе [43] сделаны оценки вместимости резервуаров для длительного хранения

**Таблица 2.** Оценки геологических ресурсов для захоронения CO<sub>2</sub> в истощенных месторождениях углеводородов и солевых растворах [43]

Страна	Геологические ресурсы для захоронения CO <sub>2</sub> , Гт CO <sub>2</sub>			Структура ресурсов, %	
	обнаруженные	перспективные	всего	в месторождениях углеводородов	в солевых растворах
Норвегия	56.0	37.5	93.5	15	85
Великобритания	17.0	60.6	77.6	10	90
Дания и Германия	0.1	1.6	1.7	0	100
США	258	7804	8062	3	97
Канада	43.6	360.3	403.9	3	97
Япония	36.2	116.0	152.2	2	98
Южная Корея	0.0	203.3	203.3	0	100
Китай	10.5	3067.0	3077.5	0	100
Индия	0.8	63.3	64.1	1	99
Австралия	31.4	471.0	502.4	3	87
Индонезия	2.5	13.4	15.9	11	89
<b>Всего</b>	<b>456.1</b>	<b>12 198.0</b>	<b>12 654.1</b>	<b>2</b>	<b>98</b>

CO<sub>2</sub> в истощенных нефтяных и газовых месторождениях, а также в водных солевых растворах для 18 стран. Возможности захоронения CO<sub>2</sub> в угольных пластах, сланцевых формациях, базальтах в данном исследовании не рассматривались. Выбраны страны с большим производством и потреблением топлив, в том числе угля. Россия в этом списке отсутствует. Оценки включают обнаруженные и перспективные геологические ресурсы для захоронения CO<sub>2</sub> и их структуру. К обнаруженным (discovered storage resources) относятся ресурсы, наличие которых подтверждено геологическими изысканиями и бурением. Оценки перспективных ресурсов (prospective storage resources) получены на основе обработки имеющихся разрозненных геологических данных и математического моделирования. Для подтверждения этих оценок требуются целенаправленные геологические изыскания и бурение. Исследования показали, что свыше 90% ресурсов для захоронения CO<sub>2</sub> приходится на подземные резервуары с водными соляными растворами.

В табл. 2, составленной по данным из работы [43], включены страны, являющиеся потенциальными рынками экспорта российского топлива, в том числе водорода, или прямыми конкурентами на этих рынках. Из таблицы следует, что страны – потенциальные импортеры российского водорода (страны Евросоюза, Япония, Южная Корея) обеспечены геологическими ресурсами для крупномасштабного захоронения CO<sub>2</sub>. Поэтому этим странам проще и дешевле приобретать природный газ, используя существующую логистическую инфраструктуру. При необходимости он может быть

преобразован в водород. Это может стать существенным ограничением для российского экспорта водорода на рынки этих стран.

В [44] представлены оценки практически доступных геологических ресурсов горных пород для захоронения CO<sub>2</sub> для всех регионов планеты (табл. 3). Они касаются всех типов осадочных пород на суше (onshore) и на шельфе (offshore). В исследование не включались арктические районы. Шельф ограничен глубиной моря 300 м и 200-мильной экономической зоной. Из табл. 3 следует, что на планете имеются доступные геологические резервуары огромной вместимости для надежного захоронения CO<sub>2</sub> – от 7.9 до 55.6 тыс. Гт CO<sub>2</sub>. Отмечается, что верхние оценки могут претерпеть корректировки вниз вследствие экономических и других ограничений. Но это не меняет вывода о том, что доступная вместимость хранилищ для CO<sub>2</sub> не станет ограничивающим фактором для развертывания индустрии CCS в мире (табл. 4).

Таблица 4 подготовлена на основе данных публикации [44]. Согласно выполненным оценкам, ежегодные объемы захоронения CO<sub>2</sub> в целом по миру должны составлять 11.8 Гт CO<sub>2</sub> в год, или примерно 66% необходимого объема сокращения выбросов CO<sub>2</sub> для выполнения требований Парижского соглашения. Требуемая вместимость геологических резервуаров для захоронения такого объема CO<sub>2</sub> в период до конца XXI в. достигнет 940 Гт CO<sub>2</sub>. Тогда обеспеченность геологическими ресурсами для захоронения CO<sub>2</sub> составит около 670 лет для нижних оценок таких ресурсов. По странам и регионам это значение сильно варьируется. Относительно в не-

**Таблица 3.** Оценки геологических ресурсов горных пород для захоронения CO<sub>2</sub> по странам и регионам мира, Гт CO<sub>2</sub>\* [44]

Континент, страна, регион	Нижние оценки			Верхние оценки		
	суша	шельф	всего	суша	шельф	всего
Европа	161	141	302	1129	991	2120
Россия	1180	54	1234	8291	382	8673
Прочие страны Евразии	415	70	485	2916	494	3410
США	551	261	812	3872	1836	5708
Канада	206	112	318	1445	790	2235
Мексика	79	59	138	556	411	967
Бразилия	224	73	297	1572	515	2087
Прочие страны Латинской Америки	443	163	606	3111	1145	4256
Китай	325	78	403	2286	544	2830
Япония	4	5	9	26	34	60
Южная Корея	0	3	3	0	24	24
Прочие страны Восточной Азии	161	111	272	1135	776	1911
Индия	75	24	99	525	172	697
Индонезия	96	67	163	672	472	1144
Прочие страны Азии	36	83	119	251	583	834
Средний Восток	370	122	492	2603	851	3454
Африка	1344	219	1563	9444	1543	10987
Австралия и Новая Зеландия	334	261	595	2349	1835	4184
<b>Всего</b>	<b>6004</b>	<b>1906</b>	<b>7910</b>	<b>42183</b>	<b>13398</b>	<b>55581</b>

**Таблица 4.** Обеспеченность стран и регионов мира геологическими ресурсами для захоронения CO<sub>2</sub> [44]

Континент, страна, регион	Объемы захоронения, Гт CO <sub>2</sub> /год	Требуемые ресурсы для захоронения, Гт CO <sub>2</sub>	Обеспеченность ресурсами для захоронения CO <sub>2</sub> , лет*
Европа	2.63	210	115
Россия	0.63	50	1970
Прочие страны Евразии	0.75	60	650
США	2.38	190	340
Канада	0.19	15	1700
Мексика	0.11	9	1230
Бразилия	0.25	20	1190
Прочие страны Латинской Америки	0.31	25	1940
Китай	2.50	200	160
Япония	0.10	8	80
Южная Корея	0.06	5	48
Прочие страны Восточной Азии	0.25	20	1090
Индия	0.75	60	130
Индонезия	0.13	10	1300
Прочие страны Азии	0.25	20	480
Средний Восток	0.16	13	3030
Африка	0.19	15	8340
Австралия и Новая Зеландия	0.13	10	4760
<b>Всего</b>	<b>11.77</b>	<b>940</b>	<b>670</b>

\* Результат деления имеющихся геологических ресурсов (см. нижние оценки в табл. 3) на требуемые ресурсы для захоронения CO<sub>2</sub> (табл. 4).



большой степени такими ресурсами обеспечены Южная Корея и Япония.

Важно отметить, что геологическими ресурсами для захоронения CO<sub>2</sub> обеспечены практически все регионы планеты. Конечно, отдельные страны их могут не иметь. Таким странам нужно будет договариваться с соседями о захоронении CO<sub>2</sub> на их территории и создании соответствующей транспортной инфраструктуры. Это может послужить основой для формирования новой сферы внешнеэкономической деятельности — предоставления услуг по захоронению CO<sub>2</sub>.

Для России геологические ресурсы для захоронения CO<sub>2</sub> оценены от 1180 до 8673 Гт CO<sub>2</sub> (см. табл. 3) [44]. Из них около 95.6% располагается на суше. Такие ресурсы имеются в большинстве районов страны, но наиболее подходящие из них располагаются в Волжско-Уральском регионе. В работе [43] указывается на наличие резервуаров большой вместимости для захоронения CO<sub>2</sub> не только в Волжско-Уральском регионе, но и в Сибири, а также под дном Охотского моря, включая прилегающие районы. Ежегодные объемы захоронения CO<sub>2</sub> для России оценены в 0.63 Гт (см. табл. 4). Обеспеченность геологическими ресурсами для захоронения CO<sub>2</sub> составит почти 2 тыс. лет для нижних оценок таких ресурсов. Конечно, значительная часть из них находится в отдаленных районах.

На основании табл. 3 и 4 можно сделать вывод, что при успешном освоении технологий CCS и создании глобальной индустрии CCS для российского экспорта топлив: природного газа и особенно угля — откроются новые возможности на весь XXI в. Это целесообразно учитывать при разработке стратегических документов развития энергетики России на длительную перспективу.

### МИРОВОЙ ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ CCS

По состоянию на сентябрь 2021 г. в мире на разных стадиях реализации находилось 135 проектов

CCS общей производительностью по закачиваемому CO<sub>2</sub> 149.3 Мт в год (табл. 5) [45]. Из них 27 проектов суммарной производительностью 36.6 Мт CO<sub>2</sub> в год уже реализованы и находятся в эксплуатации. Отмечается резкий рост интереса в мире к технологиям CCS. Это объясняется большими возможностями таких технологий в сокращении выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу при приемлемых экономических показателях и, главное, сохранением традиционной электрогенерации на основе органических топлив. Средняя производительность единичного проекта составляет около 1 Мт CO<sub>2</sub> в год.

Среди реализованных коммерческих проектов CCS большинство (22 проекта, из которых один — офшорный) имеют целью повышение нефтеотдачи пластов. Еще пять проектов, в том числе два офшорных, обеспечивают хранение CO<sub>2</sub> в подземных водных соляных растворах.

Важно отметить, что в развитии индустрии CCS заинтересован крупный бизнес, владеющий активами в традиционной энергетике, металлургии и химической промышленности. Применение CCS позволит ему с наименьшими потерями сохранить свои активы в условиях осуществления климатической политики. Требуемые финансовые ресурсы для создания глобальной индустрии CCS (в среднем около 20–40 млрд дол. в год) не являются чрезмерными для мирового бизнеса [30]. Конечно, государственная поддержка ему будет необходима, особенно для быстрого преодоления многочисленных регуляторных барьеров, часто возникающих при формировании новой инфраструктуры.

Состав технологий для создания индустрии CCS в целом понятен. Многие из них уже получили промышленное применение. В разработке остальных не должно возникнуть труднопреодолимых препятствий. Это является большим достоинством CCS. Однако обеспечение конкурентоспособности CCS относительно других направлений декарбонизации является весьма непростой задачей. Поэтому наблюдается тенденция к объединению усилий ве-

**Таблица 5.** Реализация проектов CCS в мире [45]

Статус проектов	Количество, шт.	Производительность, Мт CO <sub>2</sub> в год	Средняя производительность единичного проекта, Мт CO <sub>2</sub> в год
В эксплуатации	27	36.6	1.36
Сооружаются	4	3.1	0.78
Завершение проектирования и согласования	58	46.7	0.81
Ранняя стадия проектирования	44	60.9	1.38
Эксплуатация приостановлена	2	2.1	1.05
<b>Всего</b>	<b>135</b>	<b>149.4</b>	<b>1.08</b>

**Таблица 6.** Наиболее крупные реализованные CCS-проекты в США [47]

Проект	Штат	Производительность, Мт CO <sub>2</sub> /год	Год введения в эксплуатацию	Эксплуатирующая компания
Century Plant Industrial Capture	Техас	8.4	2010	Occidental Petroleum
Shute Creek Gas Processing Plant	Вайоминг	7.0	1986	ExxonMobil
Great Plains Synfuels Plant	Северная Дакота	3.0	2000	Dakota Gasification Company

душих мировых компаний по разработке технологий CCS и осуществлению крупных проектов на их основе. Расширяется международное научно-техническое сотрудничество в данной области. Нарастает партнерская активность между энергетическими компаниями (нефтяными, газовыми, электрогенерирующими), производителями карбоно-емких продуктов (удобрений, металлов, цемента и др.), судовыми компаниями и поставщиками финансовых услуг. Это создает условия для быстрого формирования CCS-индустрии в мире. В частности, в 2021 г. нефтяной гигант – компания ExxonMobil создала свой новый бизнес – ExxonMobil Low Carbon Solutions и объявила, что на условиях кооперации планирует реализовать 20 CCS-проектов по всему миру. До 2025 г. компания намерена вложить около 3 млрд дол. инвестиций в низкоуглеродные проекты [46]. Следует отметить, что компания ExxonMobil имеет 30-летний опыт разработки и применения CCS-технологий. Ей принадлежит около 20% имеющихся в мире мощностей CCS.

В последнее время отмечается изменение бизнес-модели в формирующейся индустрии CCS [30]. Оно заключается в переходе от вертикальной к сетевой интеграции при реализации проектов CCS. Разделение бизнеса по его основным технологиям (извлечение, транспортирование и захоронение CO<sub>2</sub>) усиливает специализацию компаний и повышает их коммерческую эффективность. Также это создает условия для формирования крупных трубопроводных сетей для транспортирования CO<sub>2</sub>. Это позволит активно вовлекать в данный бизнес большое число предприятий с относительно небольшими выбросами CO<sub>2</sub> и таким образом увеличивать доступные объемы CO<sub>2</sub> для захоронения, улучшая экономические характеристики проектов CCS за счет “эффекта масштаба”.

Наибольшая активность в разработке и реализации проектов CCS наблюдается в странах Северной Америки и Европы, где на различных стадиях реализации находится соответственно 36 и 30 проектов [47]. В последнее время интерес к проектам CCS стали проявлять и другие страны, прежде всего богатые углем. Это Китай и Австралия. В Азиатско-Тихоокеанском регионе реализуется двадцать семь проектов CCS, в том числе четырнадцать в Китае, восемь в Австралии и по

одному проекту в Японии, Южной Корее, Индии, Индонезии и Новой Зеландии.

Большой опыт использования технологий CCS накоплен в США [47]. Улавливание CO<sub>2</sub> осуществляется на предприятиях по переработке углеводородного сырья и производству азотных удобрений. Уловленный CO<sub>2</sub> используется, в основном, для повышения нефтеотдачи пластов (enhanced oil recovery) на истощающихся месторождениях. Наиболее старыми действующими проектами являются:

Terrell Natural Gas Processing Plant (штат Техас, США); в эксплуатации с 1972 г.; производительность 0.5 Мт CO<sub>2</sub>/год;

Enid Fertilizer Industrial Capture (штат Оклахома, США); в эксплуатации с 1982 г.; производительность 0.7 Мт CO<sub>2</sub>/год.

Наиболее крупные среди реализованных проектов CCS в США представлены в табл. 6.

В настоящее время в США активно реализуются проекты по интеграции технологий CCS и крупных электростанций на органических топливах (табл. 7).

В штате Луизиана (США) компания G2 Net Zero LNG приступила к реализации первого в мире проекта по производству сжиженного природного газа (СПГ) с нулевыми выбросами CO<sub>2</sub> [48]. Проектом предусматривается производство 13 млн т СПГ в год для экспортных целей. Затраты на проект оцениваются в 11 млрд дол. Реализация проекта должна завершиться к 2027 г. Ежегодно будет улавливаться около 4 Гт CO<sub>2</sub>. Это составляет 85% выбросов CO<sub>2</sub> по всей производственной цепочке, включая добычу газа и производство СПГ. Оставшиеся 15% выбросов будут покрываться различными “углеродными компенсациями”. Компания – реализатор проекта надеется, что проект окажется прибыльным, несмотря на более высокую себестоимость производства СПГ. Достигаться это будет за счет получения так называемой “премии за чистоту”. Производимый СПГ не будет иметь “углеродного следа”. В результате он получит конкурентные преимущества на рынке. Считается, что компании, не производящие чистый газ, в течение одного-двух десятилетий окажутся вне бизнеса.

**Таблица 7.** Проекты по интеграции технологий CCS и крупных электростанций на органических топливах

Проект	Штат	Производительность, Мт CO <sub>2</sub> /год	Год введения в эксплуатацию
San Juan Generating Station Carbon Capture	Нью-Мексико	6.0	2023
Prairie State Generating Station Carbon Capture	Иллинойс	5.0–6.0	2020
Dry Fork Integrated Commercial CCS Power and Capture	Вайоминг	3.0	2025
CarbonSAFE	Иллинойс	2.0–5.0	2025

В Канаде реализовано четыре проекта CCS [47]. Почти все они расположены в провинции Alberta. Извлеченный CO<sub>2</sub> используется для повышения нефтеотдачи пластов. В проекте Quest Industrial Capture (производительность 1 Мт CO<sub>2</sub> в год, в эксплуатации с 2015 г.) источником CO<sub>2</sub> является процесс паровой конверсии метана, предназначенный для производства водорода на нефтеперерабатывающем заводе. Оператором проекта выступает компания Shell. Проект Boundary Dam CCS Power and Capture (1 Мт CO<sub>2</sub> в год, 2014 г.) реализован на базе угольной электростанции SaskPower. Проект Alberta Carbon Trunk Line (1.2–1.4 и 0.3–0.6 Мт CO<sub>2</sub> в год, 2020 г.) объединяет заводы по производству азотных удобрений и нефтеперерабатывающие заводы. Оператор проекта – Enhance Energy Inc. В стадии проектирования находится проект Lehigh’s Edmonton Plant производительностью 0.6 Мт CO<sub>2</sub> в год. Источником CO<sub>2</sub> и оператором проекта является цементный завод.

Большой опыт использования технологий CCS накоплен в Европе [47]. Одним из самых старых является проект Sleipner CO<sub>2</sub> Storage в Норвегии производительностью 1 Мт CO<sub>2</sub>/год. Он реализован компаниями Equinor, Var Energi и Total в 1996 г. на базе газоперерабатывающего завода. Уловленный CO<sub>2</sub> закачивается в геологический резервуар в Северном море. За время работы установки на хранение направлено более 17 Мт CO<sub>2</sub>. С 2008 г. в Норвегии на заводе по производству СПГ консорциумом компаний (Equinor, Petoro, Total, Engie, Norsk Hydro, Hess Norge) эксплуатируется установка CCS производительностью 0.7 Мт CO<sub>2</sub>/год (проект Snohvit CO<sub>2</sub> Storage). Уловленный CO<sub>2</sub> направляется на хранение в геологический резервуар в Баренцевом море.

Во Франции компания Total с 2009 по 2013 г. эксплуатировала установку CCS Lacq производительностью 0.05 Мт CO<sub>2</sub>/год. Уловленный CO<sub>2</sub> направлялся на хранение в истощенное газовое месторождение (depleted natural gas field) Rousse (Пиренеи). Особенностью установки являлось использование метода кислородного сжигания (oxy fuel combustion) природного газа в процессе извлечения CO<sub>2</sub>.

На разных стадиях реализации в Европе находится много новых проектов. Так, в Нидерландах по проекту Porthos предусматривается сооруже-

ние четырех заводов по производству водорода из природного газа и общего трубопровода для доставки CO<sub>2</sub> в район порта Роттердам, транспортирования и последующего его захоронения в геологических структурах под дном Северного моря в 20 км от берега. Проект осуществляется консорциумом химических и нефтехимических компаний (Air Products, Air Liquide, ExxonMobil, Shell) и в нем предусматривается ежегодно отправлять на захоронение 2.5 Мт CO<sub>2</sub>. Правительство Нидерландов планирует выделить 2.1 млрд дол. на реализацию данного проекта [49]. Сроком его завершения определен 2026 г.

Правительством Нидерландов предусматривается к 2030 г. не менее половины заявленного сокращения выбросов CO<sub>2</sub> обеспечить путем внедрения CCS-технологий (7.2 Мт CO<sub>2</sub> в год). Данный вариант декарбонизации экономики считается самым дешевым и быстро реализуемым из всех возможных [50]. Поэтому правительство страны также поддерживает проект Athos CCUS. Он инициирован сталелитейной компанией Tata Steel, которая планирует перейти на прямое производство железа с заменой кокса на водород, получаемый из природного газа. К создаваемой трубопроводной системе Athos смогут подключаться другие промышленные предприятия страны. В консорциум также вошли компании Gasunie, Energie Beheer Nederland и Port of Amsterdam. Проект планируется завершить к 2030 г. Его производительность составит 7.5 Мт CO<sub>2</sub> в год. Захоронение CO<sub>2</sub> будет производиться в Северном море на глубине 3–5 км, а транспортирование осуществляться по подводному трубопроводу [50]. Проект финансово поддерживается Евросоюзом.

На ранней стадии проектирования находится амбициозный европейский проект Aramis CCS, который разрабатывается компаниями Total Energies, Shell и Nederlandse Gasunie [51]. Проектом предлагается создать транспортную сеть пропускной способностью 20 Мт CO<sub>2</sub> в год. Она предназначена для сбора выбросов CO<sub>2</sub> с промышленных предприятий и энергетических объектов Европы и транспортирования трубопроводами и баржами для захоронения в формации песчаников Ротлигендес (Rotliegendes) под Северным морем на глубине 3–4 км.

Норвежским правительством финансируется создание трубопроводной сети Longship CCS, объединяющей установки по улавливанию CO<sub>2</sub> на цементном заводе Norcem Brevik (0.4 Мт CO<sub>2</sub> в год) и на заводе по переработке отходов в Осло Fortum Oslo Varme (также 0.4 Мт CO<sub>2</sub> в год) [52]. Сеть создается как открытая с возможностью подключения других европейских предприятий. Уловленный CO<sub>2</sub> будет направляться на хранение в геологические структуры под Северным морем на глубине около 2500 м. Этот проект захоронения CO<sub>2</sub> получил название The Northern Lights (“Северное сияние”) [53]. На первом этапе (2023–2024 г.) предусматривается передача на хранение 1.5 Мт CO<sub>2</sub> в год (в одной скважине) с расширением до 5 Мт CO<sub>2</sub> в год (несколько скважин) на втором этапе. На реализацию первого этапа компанией TotalEnergies с партнерами выделено 800 млн евро.

Во Франции консорциумом компаний (ArcelorMittal, Total и др.) предложен проект DMX Demonstration, заключающийся в оснащении металлургического завода в Dunkirk технологией CCS производительностью 1 Мт CO<sub>2</sub> в год. Уловленный CO<sub>2</sub> будет трубопроводным транспортом направляться на захоронение в Северное море. Сроком реализации проекта определен 2025 г. [45].

В Германии компанией Equinor разрабатывается проект H2morrow со сроком реализации до 2027 г. В нем предусматривается сооружение в земле Северный Рейн-Вестфалия завода по получению водорода из природного газа мощностью 2.7 ГВт (по водороду) [54]. Уловленный CO<sub>2</sub> будет направляться по трубопроводу на захоронение в геологические структуры под Северным морем. Стоимость производимого водорода составит 58 евро/(МВт · ч) (2.1 евро/кг H<sub>2</sub>) при цене природного газа 23 евро/(МВт · ч), т.е. водород окажется в 2.5 раза дороже исходного газа. Две трети получаемого водорода планируется направлять на металлургический завод компании ThyssenKrupp Steel Europe для замещения части кокса. Это обеспечит выпуск до 7 Мт климатически нейтральной стали и предотвратит выбросы 11 Мт CO<sub>2</sub> в год (в настоящее время 18.5 Мт CO<sub>2</sub> в год).

Компания Eni планирует в 2025–2028 гг. реализовать в северной части Италии проект CCS Ravenna Hub производительностью до 5 Мт CO<sub>2</sub> в год. Поставлять CO<sub>2</sub> будут местные электростанции и крупные промышленные предприятия. Затем CO<sub>2</sub> будет транспортироваться для захоронения в истощенные газовые месторождения, вместимость которых оценена в 300–500 Мт CO<sub>2</sub>. При таких объемах закачки ее будет достаточно на 60–100 лет [45].

В Ирландии разрабатывается проект ERVIA производительностью 2 Мт CO<sub>2</sub> в год с завершением в 2028 г. Источниками CO<sub>2</sub> будут электро-

станции и нефтепереработка. Местом его захоронения станут геологические структуры под дном Кельтского моря. Компании Equinor и Aker Solutions планируют реализовать в 2025 г. пилотную часть проекта Preem CCS (Швеция) производительностью 0.5 Мт CO<sub>2</sub> в год. Источником CO<sub>2</sub> будет завод по производству водорода из природного газа. Хранить CO<sub>2</sub> планируется под дном Северного моря.

Великобритания разворачивает грандиозную программу по созданию индустрии CCS, которой отводится важнейшая роль в декарбонизации национальной экономики [45]. Для захоронения CO<sub>2</sub> будут использоваться геологические структуры под дном омывающих страну морей. Прежде всего, предполагается оснастить установками CCS действующие электростанции и крупные промышленные предприятия. Для этого реализуются проект Acorn (0.2 Мт CO<sub>2</sub> в год, запуск в 2023 г., участвуют компании Chrysaor, Shell, Total), проект Caledonia Clean Energy (3.0 Мт CO<sub>2</sub> в год, 2023 г., Summit Power), проект Net Zero Teesside (5.0 Мт CO<sub>2</sub> в год, 2026 г., British Petroleum, Total и др.). Также планируется сооружение нескольких заводов по производству водорода из природного газа, оснащенных установками CCS. Здесь следует отметить проект H21 North of England (3 Мт CO<sub>2</sub> в год, запуск в середине 2020-х годов, Equinor), проект Liverpool-Manchester Hydrogen Cluster (1.5 Мт CO<sub>2</sub> в год, 2025–2027 гг., CADENT), проект Liverpool Bay Area CCS Project (1–3 Мт CO<sub>2</sub> в год, 2025, Eni), проект Humber Zero Carbon Cluster (2.6 Мт CO<sub>2</sub> в год, 2026 г., Equinor).

На базе указанных проектов предполагается создать обширные трубопроводные сети для транспортирования CO<sub>2</sub> к морским побережьям для захоронения под дном прилегающих морей. Это сеть Humber Zero, сетевой кластер Восточного побережья (East Coast Cluster), объединяющий сети Zero Carbon Humber и Net Zero Teesside, сеть Acorn в Северной Шотландии, сеть HyNet North West в Уэльсе и Англии и др.

Сеть Zero Carbon Humber призвана сыграть решающую роль в декарбонизации одного из крупнейших индустриальных регионов Великобритании благодаря применению технологий CCS на существующих промышленных предприятиях и переходу к водородной экономике [55]. Ставится цель – достичь в регионе Humber к 2040 г. углеродной нейтральности и сократить ежегодные выбросы CO<sub>2</sub> в Великобритании на 15%. Сеть и проекты в ее составе должны обеспечить к середине 2030-х годов улавливание не менее 17 Мт CO<sub>2</sub> в год и до 10 ГВт мощности водородных установок. Это позволит ежегодно поставлять до 0.5–0.6 Мт водорода промышленным и прочим потребителям по всему региону Humber, у кото-

рых применение технологий CCS окажется технически и экономически несостоятельным. Это, как правило, небольшие стационарные потребители топлива и мобильные установки. В сеть Net Zero Teesside включаются существующие электростанции и крупные предприятия различных отраслей промышленности (производство азотных удобрений и др.). Она должна обеспечить перекачку на захоронение не менее 10 Мт CO<sub>2</sub> в год [56].

Необходимо отметить, что наличие удобных для захоронения CO<sub>2</sub> геологических резервуаров большой вместимости, собственных технологий CCS и опыта их эксплуатации, а также дешевых финансовых ресурсов будет способствовать формированию в Европе индустрии CCS в короткие сроки. Наличие такой индустрии в совокупности с имеющейся развитой инфраструктурой для диверсификации поставок природного газа создают в Европе благоприятные возможности для развития водородной энергетики. Реализация этих возможностей будет зависеть от востребованности водорода в качестве энергоносителя потребителями. В таком случае поставки водорода из России едва ли окажутся конкурентоспособными из-за дороговизны его транспортирования, даже несмотря на наличие дешевого природного газа. В то же время останутся возможности для экспорта российского природного газа в Европу.

В последние годы резко активизировались работы по реализации технологий CCS в Китае, крупнейшем в мире потребителе органических топлив, прежде всего угля [45]. Китайская компания CNPC в 2018 г. запустила на нефтяном месторождении Jilin Oil Fields установку CCS производительностью 0,6 Мт CO<sub>2</sub> в год. Уловленный CO<sub>2</sub> закачивают в пласты, чтобы увеличить извлечение нефти. В стадии подготовки к запуску находятся несколько проектов по оснащению установками CCS предприятий по глубокой переработке угля в химические продукты (аммиак, метанол и др.) и водород. Для Китая это чрезвычайно актуальная проблема. Страна является мировым лидером в данной области. Более 86% имеющихся в мире мощностей установок газификации угля находятся в Китае [21]. Из-за дешевизны угля производимые из него химические продукты оказываются конкурентоспособными с аналогичными продуктами, получаемыми из импортного углеводородного сырья [22]. Большую активность по практической реализации в Китае технологий CCS демонстрирует китайский нефтегазовый гигант Синорес. Помимо Китая технологии CCS в Азии активно осваивают и другие страны, богатые углем.

В Австралии в 2019 г. реализован один из крупнейших в мире проектов Gorgon Carbon Dioxide Injection производительностью 3,4–4,0 Мт CO<sub>2</sub> в год [47]. Оператором проекта выступает компа-

ния Chevron Australia. Она несет ответственность за утечки и другой ущерб в течение срока эксплуатации установки CCS. Источником CO<sub>2</sub> является добываемый здесь же природный газ с высоким содержанием данного вещества. Извлечение CO<sub>2</sub> осуществляется в процессе переработки природного газа в СПГ. Извлеченный CO<sub>2</sub> закачивается на глубину около 2 км в геологическую формацию Duiry Formation. Выбранный подземный резервуар для хранения CO<sub>2</sub> считается исключительно удачным. Он образован достаточно хорошо проницаемыми горными породами, надежно изолирован от поверхности, расположен вблизи газоперерабатывающего завода. Требуется всего 7 км трубопровода CO<sub>2</sub>. Закачка осуществляется через девять скважин. Также предусмотрены дополнительные четыре скважины для откачки вытесняемой воды и две скважины для удаления вытесняемого воздуха. Это необходимо для исключения роста давления в резервуаре и обеспечения его полного заполнения. Затраты на геологическое изучение подземного резервуара составили около 150–200 млн дол. Капитальные затраты на реализацию проекта оценивались в 2011 г. в 2 млрд дол. [57]. За время отработки газового месторождения Gorgon планируется отправить на хранение в формацию Duiry около 100 Мт CO<sub>2</sub> [58].

В Австралии большое внимание уделяется реализации проекта The Hydrogen Energy Supply Chain [47, 59]. В нем предусматривается производство около 225 тыс. т водорода в год путем газификации угля. Водород планируется экспортировать в сжиженном виде в Японию. Образующийся в процессе газификации угля CO<sub>2</sub> в количестве около 1,8 Мт в год будет направляться на захоронение в пористые горные породы на глубину около 1,5 км. Оценочная вместимость этого горного массива для захоронения CO<sub>2</sub> составляет около 31 Гт CO<sub>2</sub>. Необходимые технологии CCS в течение 10 лет разрабатываются в рамках проекта Carbon-Net Project. Данным проектом предусматривается извлечение 3,0 Мт CO<sub>2</sub> в год с последующим захоронением в геологических резервуарах региона Gippsland. Проект поддерживается правительством провинции Victoria.

В России компания РИТЭК в 2017–2019 гг. успешно применяла технологию циклической закачки CO<sub>2</sub> в добывающие скважины (технология huff-n-puff injection) на нескольких месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами нефти. Дополнительная добыча составила 3–7 т нефти на 1 т CO<sub>2</sub> (для условий вязкой нефти) [60].

В [61] на основе экспериментов и численного моделирования показана целесообразность закачки CO<sub>2</sub> в плохопроницаемые коллекторы песчаника в Западной Сибири в целях интенсификации добычи нефти. При закачке CO<sub>2</sub> под давле-

нием 40 МПа эффективность вытеснения нефти достигала 87%, что сопоставимо с применением для этих целей попутного нефтяного газа (90%) и значительно лучше, чем использование метана (61%) и азота (38%). Добиться большей эффективности вытеснения нефти не представлялось возможным из-за быстрого прорыва инжектируемого газа через пласт. Масштабное применение данных технологий обеспечит экономически эффективную утилизацию довольно больших объемов  $\text{CO}_2$ .

Из представленного обзора следует, что в мире накоплен значительный опыт разработки и реализации проектов CCS. Однако для достижения целей Парижского соглашения объемы применения технологий CCS должны возрасти к 2050 г. не менее чем в 150 раз. Это сложная задача. Ежегодно в мире нужно будет запускать 60–100 установок CCS производительностью 2–3 Мт  $\text{CO}_2$  в год.

России следует активно включиться в процесс создания индустрии CCS. Более того, это должно стать одним из основных приоритетов в развитии отечественной энергетики. Это объясняется, во-первых, большими масштабами использования органических топлив в стране, во-вторых, обеспечением энергетической безопасности страны на всю стратегическую перспективу вследствие наличия огромных запасов органических топлив, прежде всего угля, в третьих, наличием на территории страны геологических структур, объемы которых достаточны для надежного захоронения всех выбросов  $\text{CO}_2$ , которые будут производиться энергетикой и другими отраслями промышленности в течение всего XXI в. и далее. Освоение технологий CCS позволит сохранить в стране энергетику на органических топливах даже в самых жестких условиях декарбонизации экономики. Следует обратить внимание на то, что в России имеются огромные ресурсы ВИЭ, но в районах с высоким энергопотреблением они в основном низкого качества. Поэтому электрогенерация на базе ВИЭ будет довольно дорогой. Очевидно, что создавать индустрию CCS в стране следует преимущественно на базе отечественных технологий.

Развитие CCS должно активизировать политику технического совершенствования традиционной энергетики, основанной на органических топливах. Роль государства в ее разработке и координации процесса реализации должна быть определяющей [62]. Государству следует взять на себя затраты на геологическое изучение характеристик подземных резервуаров для хранения  $\text{CO}_2$ . Применительно к резервуарам в горных породах эти затраты могут составить около 8–10% стоимости проектов по захоронению  $\text{CO}_2$  [57]. Совместно с бизнесом государству целесообразно участвовать в создании трубопроводной сети для транспортирования  $\text{CO}_2$  к местам захоронения. Наконец, обязанностью госу-

дарства является формирование нормативно-правовой среды, регламентирующей развитие и функционирование индустрии CCS.

## ВЫВОДЫ

1. Технологии CCS могут сыграть ключевую роль в декарбонизации мировой экономики. Они позволяют в полной мере обеспечить ее углеродную нейтральность при реализации принципа “добытый углерод после использования обратно в землю”.

2. Создание индустрии CCS открывает возможности для продолжения использования органических топлив, что особенно важно в отношении угля, и осуществления плавного перехода к энергетике, основанной преимущественно на возобновляемых и ядерных источниках энергии. Это позволит более тщательно подготовиться к такому переходу путем создания с приемлемыми затратами необходимой высокоэффективной технологической инфраструктуры.

3. Земля обеспечена геологическими ресурсами для надежного захоронения  $\text{CO}_2$  на многие столетия вперед. Задача состоит в детальном изучении этих ресурсов для эффективного их использования и гарантирования безопасного хранения  $\text{CO}_2$  на долгосрочную перспективу.

4. В настоящее время индустрия CCS может быть построена на основе промышленно освоенных технологий. Разрабатываемые новые технологии CCS призваны снизить стоимость улавливания, транспортирования и захоронения  $\text{CO}_2$ .

5. Развитие глобальной индустрии CCS открывает новые возможности для экспорта российских нефтегазовых топлив и угля. Это нужно учитывать при разработке стратегических документов развития энергетики России на длительную перспективу.

6. По данным зарубежных исследований, геологические ресурсы России для захоронения  $\text{CO}_2$  могут составлять в 1.2–8.7 тыс. Гт  $\text{CO}_2$ , из которых около 95.6% располагается на суше. Они сосредоточены по территории страны, но наиболее качественные из них находятся в Волжско-Уральском регионе, в Сибири и под дном Охотского моря.

7. Россия при ожидаемых ежегодных объемах захоронения  $\text{CO}_2$  0.6–1.0 Гт  $\text{CO}_2$  в год обеспечена необходимыми геологическими резервуарами на многие столетия вперед. Поэтому имеются веские основания незамедлительно приступить к детальному исследованию перспектив и оптимальных направлений создания индустрии CCS в России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **World Energy Outlook**. 2021. Paris, International Energy Agency, 2021.

2. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis** // Proc. of the Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report. IPCC, 2021.
3. **Сможет ли энергопереход остановить глобальное потепление и почему так сильно ошибаются климатические прогнозы?** / В.В. Клименко, А.В. Клименко, А.Г. Терешин, О.В. Микушина // Теплоэнергетика. 2022. № 3. С. 5–19.  
<https://doi.org/10.1134/S0040363622030067>
4. **Improved estimates of preindustrial biomass burning reduce the magnitude of aerosol climate forcing in the Southern Hemisphere** / P. Liu, J.O. Kaplan, L.J. Mickley, Y. Li, N.J. Chellman, M.M. Arienzo, J.K. Kodros, J.R. Pierce, M. Sigl, J. Freitag, R. Mulvaney, M.A.J. Curran, J.R. McConnell // Sci. Adv. 2021. V. 7. Is. 22.  
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1379>
5. **Volcanic activity sparks the Arctic oscillation** / W. Qu, F. Huang, J. Zhao, L. Du, Y. Cao // Nature. Sci. Rep. 2021. V. 11. Article number 15839.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-94935-6>
6. **Cyclic evolution of phytoplankton forced by changes in tropical seasonality** / L. Beaufort, C.T. Bolton, A.-C. Sarr, B. Suchéras-Marx, Y. Rosenthal, Y. Donnadieu, N. Barbarin, S. Bova, P. Cornuault, Y. Gally, E. Gray, J.-Ch. Mazur, M. Tetard // Nature. 2022. V. 601. Is. 7891. P. 79–84.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-021-04195-7>
7. **Paris Agreement**. N.Y., United Nations, 2015.
8. **World Energy Outlook**. 2019. Paris, International Energy Agency, 2019.
9. **Филиппов С.П., Ярославцев А.Б.** Водородная энергетика: перспективы развития и материалы // Успехи химии. 2021. Т. 90. № 6. С. 627–643.  
<https://doi.org/10.1070/RCR5014>
10. **Что нужно сделать для реализации Энергетической стратегии страны** / О.Н. Фаворский, В.М. Батенин, В.М. Масленников, В.В. Кудрявый, С.П. Филиппов // Вестник РАН. 2016. Т. 86. № 10. С. 1–6.  
<https://doi.org/10.1134/S1019331616050038>
11. **Фаворский О.Н., Филиппов С.П., Полищук В.Л.** Актуальные проблемы обеспечения энергетики страны конкурентоспособным оборудованием // Вестник РАН. 2017. Т. 87. № 8. С. 679–688.  
<https://doi.org/10.1134/S1019331620030016>
12. **Report of United Nations Conference on Environment and Development** // Proc. of the Conf. Rio de Janeiro, 3–14 June 1992. V. 1. Resolutions Adopted by the Conference. N.Y., United Nations, 1993.
13. **Hafele W.** Energy in a finite world: a global system analysis. V. 2. Cambridge, MA: Bullinger Publ., 1981.
14. **Wege zu einer umweltfreundlicheren Energieversorgung – zwei methodische Lösungsansätze** / L.S. Belyaev, B.M. Kaganovich, A.N. Krutov, S.P. Filippov, D. Martinsen, N. Muller, H.J. Wagner, M. Walbeck // Brennstoff – Wärme – Kraft. 1987. Nr. 3. S. 80–85.
15. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. Resolution adopted by the General Assembly on 25 Sept. 2015. A/RES/70/1. N.Y., United Nations, 2015.
16. **Филиппов С.П.** Новая технологическая революция и требования к энергетике // Форсайт. 2018. Т. 12. № 4. С. 20–33.  
<https://doi.org/10.17323/2500-2597.2018.4.20.33>
17. **Филиппов С.П., Малахов В.А., Веселов Ф.В.** Долгосрочное прогнозирование спроса на энергию на основе системного анализа // Теплоэнергетика. 2021. № 12. С. 5–19.  
<https://doi.org/10.1134/S0040363621120043>
18. **Quadrelli E.A., Armstrong K., Styring P.** Carbon dioxide utilisation: Closing the carbon cycle. Elsevier, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/C2012-0-02814-1>
19. **Putting CO<sub>2</sub> to use: Creating value from emissions**. Techn. Rep. Paris, IEA, 2019.  
[https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting\\_CO2\\_to\\_Use.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf)
20. **Glasgow Climate Pact**. N.Y., United Nations, 2021.  
[https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26\\_auv\\_2f\\_cover\\_decision.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/cop26_auv_2f_cover_decision.pdf)
21. **Филиппов С.П., Кейко А.В.** Газификация угля: на перепутье. Технологические факторы // Теплоэнергетика. 2021. № 3. С. 45–58.  
<https://doi.org/10.1134/10.1134/S0040363621030048>
22. **Филиппов С.П., Кейко А.В.** Газификация угля: на перепутье. Экономический взгляд // Теплоэнергетика. 2021. № 5. С. 16–31.  
<https://doi.org/10.1134/S0040363621050040>
23. **Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.** Утв. распоряжением Правительства РФ от 29.10.2021. № 3052-р.
24. **The global carbon cycle: A test of our knowledge of Earth as a system** / P. Falkowski, R.J. Scholes, E.A. Boyle, J. Canadell, D. Canfield, J. Elser, N. Gruber, K. Hibbard, P. Högberg, S. Linder, F.T. Mackenzie, B. Moore, T.F. Pedersen, Y. Rosenthal, S. Seitzinger et al. // Sci. 2000. V. 290. Is. 5490. P. 291–296.  
<https://doi.org/10.1126/science.290.5490.291>
25. **Global Carbon Budget 2020** / P. Friedlingstein, M. O'Sullivan, M.W. Jones, R.M. Andrew, J. Hauck, A. Olsen, G.P. Peters, W. Peters, J. Pongratz, S. Sitch, C. Le Quéré, J.G. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S. Alin et al. // Earth Syst. Sci. Data. 2020. V. 12. Is. 4. P. 3269–3340.  
<https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
26. **Klein F., Grozeva N.G., Seewald J.S.** Abiotic methane synthesis and serpentinization in olivine-hosted fluid inclusions // Proc. Natl. Acad. Sci. 2019. V. 116. № 36. P. 17666–17672.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1907871116>
27. **ГОСТ 30494-2011.** Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. М.: Стандартинформ, 2013.
28. **Carbon Dioxide – Life and Death**. SenseAir AB, Delsbo, Sweden. Available at: <https://manualzz.com/doc/28010488/carbon-dioxide—life-and-death> (Accessed: 30 Aug. 2021.)
29. **ISO 27914:2017.** Carbon dioxide capture, transportation and geological storage – Geological storage.  
<https://www.iso.org/standard/64148.html>
30. **The Global Status of CCS: 2021.** Global Carbon Capture and Storage Institute, Melbourne, Australia, 2021. Available at: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of->

- CCS-Global-CCS-Institute-Oct-21.pdf (Accessed: 14 Oct. 2021.)
31. **Key World Energy Statistics 2021.** Paris, International Energy Agency, 2021. <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>.
  32. **The cost of CO<sub>2</sub> transport and storage in global integrated assessment modeling** / E. Smith, J. Morris, H. Khesghi, G. Teletzke, H. Herzog, S. Paltsev // *Int. J. Greenhouse Gas Control*. 2021. V. 109. P. 103367. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2021.103367>
  33. **Carbon dioxide capture and storage.** IPCC Special Report / Ed. by B. Metz, O. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs\\_wholereport-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf).
  34. **Kazemifar F.** A review of technologies for carbon capture, sequestration, and utilization: Cost, capacity, and technology readiness // *Greenhouse Gases: Sci. Technol*. 2021. V. 12. Is. 1. P. 200–230. <https://doi.org/10.1002/ghg.2131>
  35. **Subsurface carbon dioxide storage through clathrate hydrate formation** / P. Jadhawar, A. Mohammadi, J. Yang, B. Tohidi // *Advances in the geological storage of carbon dioxide* / Ed. by S. Lombardi, L.K. Altunina, S.E. Beaubien. Dordrecht: Springer, 2006. P. 111–126. [https://doi.org/10.1007/1-4020-4471-2\\_11](https://doi.org/10.1007/1-4020-4471-2_11)
  36. **Wright J.F., Cote M.M., Dallimore S.R.** Overview of regional opportunities for geological sequestration of CO<sub>2</sub> as gas hydrate in Canada // *Proc. of the 6th Intern. Conf. on Gas Hydrates*. Vancouver, Canada, 6–10 July 2008. No. 5719.
  37. **Оценка** возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири / А.Д. Дучков, Л.С. Соколова, Д.Е. Аюнов, М.Е. Пермяков // *Криосфера Земли*. 2009. Т. XIII. № 4. С. 62–68.
  38. **Чувиллин Е.М., Гурьева О.М.** Экспериментальное изучение образования гидратов CO<sub>2</sub> в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород // *Криосфера Земли*. 2009. Т. XIII. № 3. С. 70–79.
  39. **Хасанов М.К.** Инжекция углекислого газа в пласт, насыщенный метаном и водой // *Прикладная механика и техническая физика*. 2017. Т. 58. № 4. С. 95–107. <https://doi.org/10.15372/PMTF20170409>
  40. **Progressing** development of the UK's strategic carbon dioxide storage resource: A summary of results from the strategic UK CO<sub>2</sub> storage appraisal project. Costain, Energy technologies, Pale Blue Dot, Axis well technology, April 2016. <https://onedrive.live.com/?authkey=%21ANk4zmABaDBBtjA&cid=56FC709A2072366C&id=56FC709A2072366C%211573&parId=56FC709A2072366C%211559&o=OneUp>.
  41. **Carbon dioxide storage through mineral carbonation** / S.Ó. Snæbjörnsdóttir, B. Sigfússon, C. Marieni, D. Goldberg, S. Gíslason, E. Oelkers // *Nat. Rev. Earth Environ*. 2020. V 1. P. 90–102. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0011-8>
  42. **Quantification** of CO<sub>2</sub> mineralization at the Wallula Basalt Pilot Project / S.K. White, F.A. Spane, H.T. Schaeff, Q.R.S. Miller, M.D. White, J.A. Horner, B.P. McGrail // *Environ. Sci. Technol*. 2020. V. 54. Is. 22. P. 14609–14616. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05142>
  43. **CO<sub>2</sub> Storage Resource Catalogue – Cycle 2 – Global Carbon Capture and Storage Institute**, 2021. Available at: <https://www.ogci.com/co2-storage-resource-catalogue/co2-data-download/> (Accessed: 16 Nov. 2021.)
  44. **Developing** a consistent database for regional geologic CO<sub>2</sub> storage capacity worldwide / J. Kearns, G. Teletzke, J. Palmer, H. Thomann, H. Khesghi, Y.-H.H. Chen, S. Paltsev, H. Herzog // *Energy Procedia*. 2017. V. 114. P. 4697–4709. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1603>
  45. **CO2RE Database.** Global Carbon Capture and Storage Institute, 2021. Available at: <https://co2re.co/> (Accessed: 25 June 2021.)
  46. **ExxonMobil** Low Carbon Solutions to commercialize emission-reduction technology. ExxonMobil, News, 1 Febr. 2021. Available at: [https://corporate.exxonmobil.com/News/Newsroom/News-releases/2021/0201\\_ExxonMobil-Low-Carbon-Solutions-to-commercialize-emission-reduction-technology/](https://corporate.exxonmobil.com/News/Newsroom/News-releases/2021/0201_ExxonMobil-Low-Carbon-Solutions-to-commercialize-emission-reduction-technology/) (Accessed: 14 Nov. 2021.)
  47. **Global CCUS projects.** International Association of Oil and Gas Producers, 2021. Available at: <https://www.iogp.org/bookstore/wp-content/uploads/sites/2/2021/03/Global-CCS-Projects-Map.pdf> (Accessed: 3 Nov. 2021.)
  48. **Cocklin J.** Louisiana export project could be in ‘High Demand’ as LNG market targets emissions. *Natural Gas Intelligence*, 25 Febr. 2021. Available at: <https://www.naturalgasintel.com/louisiana-export-project-could-be-in-high-demand-as-lng-market-targets-emissions/> (Accessed: 8 Nov. 2021.)
  49. **Dutch** government supports Porthos customers with SDE++ subsidy reservation. Porthos Development C.V., Nederland, 2021. Available at: <https://www.porthosco2.nl/en/dutch-government-supports-porthos-customers-with-sde-subsidy-reservation/> (Accessed: 10 Nov. 2021.)
  50. **The Athos project.** Athos CCUS, Nederland, 2021. Available at: <https://athosccus.nl/project-en/> (Accessed: 6 Nov. 2021.)
  51. **About** the Aramis Project. A major step towards meeting decarbonisation goals. – Aramis CCS, Nederland, 2021. Available at: <https://www.aramis-ccs.com/project> (Accessed: 12 Nov. 2021.)
  52. **The Longship** CCS Project. Available at: <https://ccsnorway.com/the-project/> (Accessed: 20 Dec. 2021.)
  53. **CO2** transport and storage project “The Northern Lights”. TotalEnergies, 2021. Available at: [https://ambition4climate.com/wp-content/uploads/2021/06/Projet-1-Total\\_EN.pdf](https://ambition4climate.com/wp-content/uploads/2021/06/Projet-1-Total_EN.pdf) (Accessed: 18 Jan. 2022.)
  54. **Clean** hydrogen for a market ramp-up and for climate-neutral steel. Equinor, 2021. Available at: [https://www.equinor.com/content/dam/statoil/documents/climate-and-sustainability/H2morrow%20steel\\_Infolyer\\_ENG\\_20210112.pdf](https://www.equinor.com/content/dam/statoil/documents/climate-and-sustainability/H2morrow%20steel_Infolyer_ENG_20210112.pdf) (Accessed: 12 Jan. 2022.)
  55. **H2H** Saltend: The first step to a Zero Carbon Humber. Equinor-H2H-saltend-brochure-2020.pdf, 2020. Available at: <https://www.zerocarbonhumber.co.uk/> (Accessed: 22 Dec. 2021.)



56. **East Coast Cluster**. Available at: <https://eastcoastcluster.co.uk/> (Accessed: 23 Dec. 2021.)
57. **Gorgon Carbon Dioxide Injection Project**. Australian Government, 2011. Available at: [https://unfccc.int/files/methods/other\\_methodological\\_issues/application/pdf/gorgon\\_co2\\_injection\\_project\\_new.pdf](https://unfccc.int/files/methods/other_methodological_issues/application/pdf/gorgon_co2_injection_project_new.pdf) (Accessed: 16 Dec. 2021.)
58. **The Carbon Dioxide Injection Project**. Available at: <https://www.chevron.com/projects/gorgon> (Accessed: 17 Dec. 2021.)
59. **The Hydrogen Energy Supply Chain**. Available at: <https://hydrogenenergysupplychain.com/> (Accessed: 19 Dec. 2021.)
60. **Реализация** технологии закачки углекислого газа в добывающие скважины / В.В. Дарищев, С.А. Харланов, А.И. Газизянов, А.Ю. Спектор, А.М. Семкин // Нефть. Газ. Новации. 2020. Т. 235. № 7. С. 33–37.
61. **Feasibility** of gas injection efficiency for low-permeability sandstone reservoir in Western Siberia: Experiments and numerical simulation / A. Sorokin, A. Volotov, M. Varfolomeev, I. Minkhanov, A. Gimazov, E. Sergeyev, A. Balionis // Energies. 2021. V. 14. Is. 22. P. 7718. <https://doi.org/10.3390/en14227718>
62. **Фаворский О.Н., Филиппов С.П., Полищук В.Л.** Актуальные проблемы обеспечения энергетики страны конкурентоспособным оборудованием // Вестник РАН. 2017. Т. 87. № 8. С. 679–688. <https://doi.org/10.1134/S1019331617040086>

## Opportunities for the Application of Carbon Dioxide Capture and Storage Technologies in Case of Global Economy Decarbonization (Review)

S. P. Filippov<sup>a, \*</sup> and O. V. Zhdaneev<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Energy Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117186 Russia

<sup>b</sup> Russian Energy Agency, Moscow, 129085 Russia

\*e-mail: [fil\\_sp@mail.ru](mailto:fil_sp@mail.ru)

**Abstract**—There are a few economy and power industry decarbonization lines that mutually complement each other in view of constraints imposed on the scales of using each of them. The attractiveness of applying CO<sub>2</sub> capture and storage (CCS) technologies for these purposes stems from the possibility of reaching carbon neutrality while retaining the use of fossil fuels in the power industry for a long period of time. This is especially important with respect to coal as the most carbon-intensive fuel. The development of a CCS industry will open the possibility to make a smooth transition from the predominantly fossil-fuel based energy to energy on the basis of renewable and nuclear energy sources. It is shown that large-scale sequestration of carbon from the biosphere, which is the key biogenic chemical substance on the Earth, will not pose an essential hazard. It is important to ensure safety for people in the regions of storing large CO<sub>2</sub> amounts. Assessments of the capacity of the reservoirs for long-term CO<sub>2</sub> storage in various geological structures available on the Earth are given. It is revealed that this capacity is several times larger than the requirements for the entire 21st century. Such reservoirs are available in almost all regions on the Earth, although some individual countries may not have them at all. This can become a reason for development of local markets on rendering CO<sub>2</sub> storage services. A significant experience with development and implementation of CCS projects has been gained around the world. A global CCS industry can already be established on the basis of commercially mastered technologies. The aim to be pursued by the development of new technologies is to decrease the CCS costs. This relates primarily to technologies for capturing CO<sub>2</sub> from gaseous mixtures and storing it in rock formations. Since the CO<sub>2</sub> emission centers and places suitable for storing it are spaced apart from each other, the construction of large pipeline systems for CO<sub>2</sub> transportation over long distances will become inevitable. These pipeline systems can be commensurable in capacity and length with the existing gas networks.

**Keywords:** carbon dioxide, decarbonization, greenhouse gases, technology, carbon capture and storage, carbon cycle, carbon neutrality, power industry, economy