

CCUS-технологии: потенциал и ограничения формирования сектора улавливания, хранения и использования CO₂ в РФ

CCUS technologies: potential and limitations of the formation of the CO₂ capture, storage and use sector in the Russian Federation

doi 10.26310/2071-3010.2022.284.5.003



М. А. Ветрова,

к. э. н., доцент, кафедра экономики предприятия, предпринимательства и инноваций,
экономический факультет, СПбГУ
✉ m.a.vetrova@spbu.ru

M. A. Vetrova,

PhD in economics, associate professor, department of enterprise economics, entrepreneurship and innovation,
faculty of economics, St. Petersburg state university

Обострение климатической повестки, задачи которой все еще не решены человечеством, меняет наднациональное и национальное законодательство в области сокращения эмиссии климатически активных газов, накладывающее обязательства в первую очередь на углеродоемкие сектора экономики с целью осуществления энергоперехода и декарбонизации производственно-технологических процессов. В качестве ключевого инструмента обеспечения углеродной нейтральности политики и исследователи называют CCUS-технологии (улавливание, транспортировка, хранение и использование CO₂), которые пока не получили широкого коммерческого использования в первую очередь из-за высокой капиталоемкости и разного уровня технологической зрелости отдельных процессов CCUS. Однако многие страны уже имеют стратегии по развитию CCUS-технологий, не только проектируют, но и применяют улавливание и хранение CO₂ для снижения эмиссии климатически активных газов. РФ, обладая широкими возможностями в области формирования CCUS-отрасли, пока не разработала стратегию по развитию рассматриваемых технологий, которые вместе с тем помогли бы осуществить декарбонизацию углеродоемких секторов и достигнуть климатической нейтральности экономического роста. Поэтому целью исследования является систематизация барьеров и возможностей развития CCUS-технологий для декарбонизации российских углеродоемких секторов, а также межстрановой анализ институциональной среды с разработкой рекомендаций для РФ в области нормативно-правового регулирования формирования CCUS-отрасли. Объектом специального внимания выступает технологическая зрелость отдельных этапов CCUS, их экономическая целесообразность и возможности сокращения себестоимости улавливания и транспортировки CO₂. Таким образом, исследование дает ориентир для будущих действий в области сокращения эмиссии CO₂ с целью сохранения долгосрочной конкурентоспособности российских углеродоемких секторов в условиях нового энергоперехода и решения задач климатической повестки.

The aggravation of the climate agenda, the tasks of which have not yet been solved by mankind, is changing supranational and national legislation in the field of reducing emissions of climatically active gases, imposing obligations primarily on carbon-intensive sectors of the economy in order to implement energy transition and decarbonization of production and technological processes. As a key tool for ensuring carbon neutrality, policy makers and researchers call CCUS technologies (capture, transportation, storage and use of CO₂), which have not yet received widespread commercial use primarily due to the high capital intensity and different levels of technological maturity of individual CCUS processes. However, many countries already have strategies for the development of CCUS technologies, not only design, but also use CO₂ capture and storage to reduce emissions of CO₂. The Russian Federation, having broad opportunities in the field of CCUS industry formation, has not yet developed a strategy for the development of the technologies in question, which at the same time would help to decarbonize carbon-intensive sectors and achieve climate neutrality of economic growth. Therefore, the purpose of the study is to systematize barriers and opportunities for the development of CCUS technologies for decarbonization of Russian carbon-intensive sectors, as well as an inter-country analysis of the institutional environment with the development of recommendations for the Russian Federation in the field of low of the formation of the CCUS industry. The object of special attention is the technological maturity of individual CCUS stages, their economic feasibility and the possibility of reducing the cost of CO₂ capture and transportation. Thus, the study provides a guideline for future actions in the field of reducing CO₂ emissions in order to preserve the long-term competitiveness of Russian carbon-intensive sectors in the context of a new energy transition and solving the problems of the climate agenda.

Ключевые слова: климатическая повестка, эмиссия CO₂, CCUS-технологии, декарбонизация, технологическая зрелость.

Keywords: climate agenda, CO₂ emissions, CCUS technologies, decarbonization, technological maturity.

Введение

20 марта 2023 г. Межправительственная группа экспертов ООН по изменению климата (МГЭИК) опубликовала заключительный раздел шестого оценочного цикла отчетов климатической повестки, который обращает всеобщее внимание на высокую вероятность недостижимости цели в ограничении потепления на 1,5°C и выше относительно доиндустриального уровня до 2030 г. Переход температурного порога в 1,5°C затронет 3,3 млрд человек, к 2050 г. крупные города будут подвержены ежегодным стихийным бедствиям, которые прежде происходили раз в сто лет, а 14% биологических видов подвергнется угрозе вымирания [1]. По мнению экспертов МГЭИК эмиссия климатически активных газов должна сократиться вдвое к 2030 г., при этом общая цель

по достижению мировой углеродной нейтральности должна быть достигнута к 2050 г., поэтому текущие обязательства государств в рамках Парижского соглашения должны быть пересмотрены в ближайшее время. При этом ученые утверждают, что внедрение мер по борьбе с изменением климата в краткосрочной перспективе, несмотря на высокие инвестиционные вложения, принесут широкие выгоды, в том числе с точки зрения экономической эффективности при быстром масштабировании новых технологий с низким углеродным следом [2].

Вместе с тем результаты глобальной декарбонизации сложно предсказуемы, разработанные международные стратегии и сценарии не охватывают все отрасли и страны, а также зачастую не учитывают региональные, экономические, институциональные и другие аспекты. Главные стратегии декарбониза-

ции связаны с повышением энергоэффективности, электрификацией, переходом на возобновляемые источники энергии с отказом от ископаемых видов топлива, развитием водородной энергетики, внедрением CCUS-технологий улавливания, транспортировки, использования или захоронения CO₂ и дополнительными мерами по смягчению климата, такими как реализация проектов по поглощению климатически активных газов природными экосистемами. При этом большинство решений направлены на декарбонизацию энергетического сектора, как главного источника выбросов CO₂, на который приходится 75% эмиссии парниковых газов в связи с использованием ископаемых видов топлива, играющих доминирующую роль в мировом энергетическом балансе (82% использования первичной энергии) [3]. Вместе с тем быстрый энергопереход и отказ от ископаемых видов топлива не возможен в связи с нестабильностью ВИЭ и технологической незрелостью водородной энергетики, поэтому Межправительственная группа экспертов по изменению климата и Международное энергетическое агентство выделяют CCUS-технологии в качестве обязательно инструмента эффективного достижения целей Парижского соглашения.

Так в отчете МГЭИК утверждается о неизбежности широкомасштабного развертывания мероприятий по улавливанию и использованию CO₂ в первую очередь из трудно поддающихся декарбонизации источников эмиссии. По оценкам МЭА, для достижения климатических целей к 2050 г. объем улавливания и хранения CO₂ должен достичь 4,6 Гт CO₂-экв. в год, и этот объем сопоставим с масштабом современной нефтяной промышленности. Однако CCUS-мощности в 2021 г. позволяли улавливать лишь 40 млн т CO₂, но уже в ближайшие годы будет создана новая индустрия по улавливанию, хранению и использованию CO₂, которая обеспечит переход к климатически нейтральному экономическому росту [4].

CCUS-технологии необходимы для декарбонизации не только энергетики, но и других промышленных секторов с высоким углеродным следом, изменение производственных процессов которых не представляется возможным в краткосрочной и среднесрочной перспективе в связи с отсутствием зрелых технологий или их низкой экономической эффективностью, в том числе из-за незавершенного периода окупаемости капитальных вложений в действующие производственно-технологические решения [5]. К таким отраслям относятся производство черных и цветных металлов, цемента, удобрений, голубого водорода и проч. Возможность адаптации вариантов улавливания CO₂ в секторах с высокими выбросами парниковых газов, а также экономическая целесообразность таких решений находятся в центре внимания исследователей по всему миру (K. Jiang, P. Ashworth, S. Zhang, X. Liang, Y. Sun, D. Angus, H. J. Liu, P. Li, Y. Gou, M. Faruque Hasan, E. First, F. Boukouvala, C. Floudas, S. Bazhenov, V. Chubokсарov, A. Maximov, O. Zhdaneev и др.). Вместе с тем улавливание и хранение CO₂ не апробировано во многих углеродоемких отраслях и их коммерческое использование сегодня

несущественно. Масштабирование CCUS требует устранение экономических и нормативно-правовых барьеров для развития ключевой инфраструктуры и технологий, при этом в первую очередь важно улучшить инвестиционную привлекательность, разработав модели частного и государственного финансирования с учетом высокой капиталоемкости CCUS-проектов, региональных различий в доступности хранилищ CO₂, а также возможности создания промышленных кластеров.

Ближайшее десятилетие будет иметь решающее значение для раскрытия потенциала CCUS-технологий, без которых достижение цели «чистого нуля» практически невозможно. Задержки с инвестициями могут оказать существенное влияние на снижение темпов сокращения выбросов CO₂, а также вызвать падение конкурентоспособности углеродоемких секторов, которые будут вынуждены платить налоги на выбросы парниковых газов. По оценкам МЭА, пятилетняя задержка завершения пилотных проектов CCUS и замедление масштабирования технологий вдвое уменьшит показатели сокращения выбросов CO₂ к 2030 г., чем в запланировано сценарием устойчивого развития [6].

Таким образом, настоящее исследование направлено, во-первых, на анализ формирования нормативно-правовых основ развития отрасли CCUS как ключевого инструмента решения задач достижения климатической нейтральности экономического роста и целей Парижского соглашения, во-вторых, на систематизацию CCUS-технологий, их возможностей и ограничений для декарбонизации производственно-технологических процессов в отраслях с высоким углеродным следом, в-третьих, на оценку потенциала РФ в области хранения и использования улавливаемого CO₂, в том числе с учетом реализации совместных проектов предприятий из разных секторов экономики. Решение поставленных задач базируется на методах и инструментах отраслевого и институционального анализа, современной концепции устойчивого развития и четвертого энергоперехода.

Правовые основы развития CCUS технологий в мире и рекомендации для РФ

На сегодняшний день наиболее развитое законодательство в области применения и развития CCUS-технологий имеет ЕС, так как первые проекты по захоронению CO₂ были реализованы в Венгрии в 1992 г. Законодательные основы по улавливанию, захоронению и использованию CO₂ в ЕС были заложены в 2000-х гг. Так Европейская комиссия обеспечила нормативно-правовую базу для безопасной транспортировки и хранения CO₂ (CCS-технологии) путем принятия Директивы 2009/31/ЕС о геологическом хранении двуокси углерода, а также установила законодательные рамки для развития использования CO₂ (CCU-технологии) в Директиве 2018/2001/ЕС о содействии использованию энергии из возобновляемых источников небиологического происхождения, в том числе на основе уловленного CO₂.

Согласно закону о климате в ЕС поставлена цель достигнуть углеродной нейтральности к 2050 г. [7], в связи с чем природные экосистемы и промышленные отрасли должны удалить из атмосферы несколько сотен млн т CO_2 ежегодно, при этом абсорбция климатически активных газов природными экосистемами в ЕС в последние годы сокращается, поэтому промышленное удаление CO_2 при помощи CCUS-технологий приобретает острую актуальность.

3 марта 2020 г. в Плана действий по циркулярной экономике была поставлена задача по разработке системы сертификации для удаления и использования углерода при полном сохранении биоразнообразия и нулевом загрязнении [8]. Данная инициатива преследует как минимум две цели:

1. Обеспечение высокого качества удаления CO_2 .
2. Создание системы сертификации и обеспечения критериев качества управления CO_2 .

В 2021 г. Европейская комиссия внесла Предложение об устойчивых углеродных циклах (COM/2021/800), в котором содержатся ключевые действия по поддержке CCUS-проектов, в том числе оценка потребностей масштабирования трансграничной инфраструктуры транспортировки и хранения CO_2 на уровне ЕС до 2030 г. В ноябре 2022 г. Европейской комиссией было принято предложение (COM/2022/672) о создании общей добровольной системы сертификации удаления углерода для развития инновационных промышленных технологий, таких как биоэнергетика с улавливанием углерода (BECCS) и прямое улавливание углерода из атмосферы (DACCS) с дальнейшим хранением в геологических формациях. Система сертификации, составленная в предложении, разработана с учетом действующего законодательства в области изменения климата, мониторинга и отчетности по выбросам ПГ в рамках ETS, директив по хранению и использованию CO_2 .

Развитие законодательства ЕС способствует улучшению инвестиционной среды для внедрения CCUS-технологий, например, создан Инновационный фонд ЕС, 10 млрд евро которого предназначены для поддержки проектирования низкоуглеродных инновационных технологий, Программа EU Horizon 2020 выделяет 70 млрд евро для исследований и разработок в области технологий декарбонизации. Среди региональных мер особый интерес представляют голландская программа SDE++, направленная на поддержку методов устойчивой энергетики и сокращения эмиссии парниковых газов, а также Инфраструктурный фонд CCS Великобритании с объемом финансирования \$1 млрд для внедрения CCUS-технологий на двух площадках с запуском в 2025 и 2030 г. [9]. Также правительство Великобритании опубликовало дорожную карту CCUS Investor Roadmap, в которой изложен подход к созданию четырех низкоуглеродных промышленных кластеров CCUS к 2030 г.

В США политика направлена в первую очередь на формирование инвестиционной привлекательности CCUS-проектов в связи с их высокой капиталоемкостью. Раздел 45Q Налогового кодекса США (2008 г.) предусматривает налоговую льготу за хранение CO_2 .

В 2022 г. произошли существенные изменения, которые дают право получить вычет по налогу на прибыль до \$85 за 1 т хранимого CO_2 и \$60 за 1 т CO_2 , который используется для повышения нефтеотдачи или в других видах промышленной деятельности. Если реализуется метод прямого улавливания CO_2 из атмосферного воздуха (DAC), то налоговая льгота может составить \$180 за 1 т хранимого CO_2 и \$130 за 1 т использованного CO_2 . Право на получение налоговых льгот будут иметь проекты, начавшие строительство мощностей до января 2033 г. [10].

Китай впервые включил развитие CCUS в пятилетний план 2011-2015 гг. национальной стратегии по сокращению эмиссии парниковых газов. Национальный план Китая определяет CCUS в качестве ключевой технологии по адаптации к изменению климата и дальнейшее развитие законодательства направлено на поддержания CCUS-технологий, что выражается в таких документах как Уведомление о содействии в развитии улавливания, хранения и использования CO_2 , План экологического промышленного развития в 2016-2020 гг., включение CCUS-технологий в каталог новых стратегических инициатив Китая, а также национальный проект «Чистое и эффективное использование угля» [11]. В 2019 г. была выпущена дорожная карта по развитию CCUS-технологий, где определены поэтапные цели до 2050 г. Так к 2030 г. CCUS-технологии должны быть готовы к промышленному применению в Китае, пропускная способность трубопроводов для транспортировки CO_2 должна составлять не менее 2 млн т CO_2 , а к 2050 г. CCUS-технологии должны быть развернуты по всей стране.

В сентябре 2021 г. был оглашен 12-й план Малайзии на 2021-2025 гг. с целью нулевых выбросов CO_2 к 2050 г. и обязательством сократить выбросы на 45% к 2030 г. по сравнению с 2005 г., где подчеркивается важная роль CCS-технологий. Уже сейчас Малайзия, благодаря хорошо развитой нефтегазовой отрасли, позиционирует себя как лидер CCS в Юго-Восточной Азии.

Законодательные инициативы в странах способствуют развитию CCUS-проектов (табл. 1). По данным Global CCS Institute, в 2022 г. в мире насчитывается 30 активных коммерческих проектов CCUS. Большинство проектов реализуются в США, а также в Китае и Канаде, что является результатом целенаправленной политики государства по формированию CCUS-отрасли. Количество проектов CCUS по всему миру растет высокими темпами за 2022 г. рост планируемых мощностей составил около 44% (до 243 млн т CO_2 в год) [12]. При этом в России действующих проектов CCUS, которые были бы зарегистрированы международными аналитическими агентствами, нет.

В России развитие CCUS только начинается, так на сегодняшний день создан лишь технический комитет по стандартизации, в задачи которого входят вопросы регулирования процессов улавливания, транспортировки и хранения CO_2 [13]. В состав комитета входят углеродоемкие компании, такие как Газпром нефть, Еврохим, Сургутнефтегаз, НОВАТЭК, СИБУР и др., которые заинтересованы в сокращении своего

CCUS-проекты в мире (составлено автором на основе [12])

Страна	Количество действующих объектов (мощность улавливания, млн т CO ₂ в год)	Количество проектируемых объектов (мощность улавливания, млн т CO ₂ в год)	Общее количество проектов (мощность улавливания, млн т CO ₂ в год)
Австралия	1 (4)	5 (15,9)	6 (19,9)
Бельгия		4 (1,42)	4 (1,42)
Бразилия	1 (7)		1 (7)
Великобритания		27 (53)	27 (53)
Венгрия	1 (0,16)		1 (0,16)
Дания		2 (0,5)	2 (0,5)
Индонезия		3 (5,4)	3 (5,4)
Ирландия		1 (0)	1 (0)
Исландия	1 (0,004)	5 (0,03)	6 (0,034)
Италия		2 (0)	2 (0)
Канада	5 (4,4)	8 (12,7)	13 (17,1)
Катар	1 (2,2)	1 (1)	2 (3,2)
Китай	3 (1,7)	4 (3,1)	7 (4,8)
Малайзия		1 (0)	1 (0)
Нидерланды		11 (5)	11 (5)
Новая Зеландия		1 (1)	1 (1)
Норвегия	2 (1,7)	10 (3,43)	12 (5,13)
ОЭА	1 (0,8)	2 (2,3)	3 (3,1)
Саудовская Аравия	1 (0,8)		1 (0,8)
США	13 (19,82)	68 (80,81)	81 (100,63)
Таиланд		1 (1)	1 (1)
Восточный Тимор		1 (10)	1 (10)
Финляндия		1 (0,4)	1 (0,4)
Франция		1 (0,8)	1 (0,8)
Швеция		5 (1,3)	5 (1,3)
Южная Корея		1 (1)	1 (1)
Общий итог	30 (42,58)	165 (200,09)	195 (242,67)

углеродного следа. Задачи комитета сводятся к формированию документации для национальной системы стандартизации в области технологий декарбонизации, нормативно-правовое и техническое обеспечение строительства CCUS-инфраструктуры. Главным мировым стандартом для захоронения углекислого газа является ISO 27914 «Геологическое хранение углекислого газа». Существуют одиннадцать других ISO стандартов, регламентирующих реализацию CCUS-проектов, среди которых стандарт ISO 27915 по закачке углерода для повышения нефтеотдачи, ISO 27913 по транспортировке CO₂ трубопроводным транспортном. И российская система стандартизации предполагает следование общемировым стандартам. Стоит отметить, что с 1 января 2022 г. недропользователи получили возможность оформлять лицензии на строительство хранилищ для захоронения CO₂, однако законопроект, разрешающий захоронение CO₂ на территории РФ еще не принят, не приняты и требования к сертификации резервуаров для захоронения [14].

Таким образом, в России формирование CCUS отрасли сдерживают отсутствие нормативно-правовой базы, системы финансирования CCUS-проектов, целенаправленной государственной поддержки и ограниченные рыночные стимулы, низкая осведомленность и общественное признание CCUS-технологий, а также сокращение возможностей импорта зарубежных

технологий из-за санкционных ограничений. Все это требует особого внимания со стороны государства и бизнес-структур. При этом наиболее важным является вопрос финансирования CCUS-технологий из-за их высокой капиталоемкости. Среди путей компенсации затрат можно выделить следующие:

- продажа углеродных единиц на национальном рынке;
- продажа уловленного CO₂ для производства продукции, например, углеводородного волокна;
- использование уловленного CO₂ для повышения нефтеотдачи;
- участие в государственных закупках низкоуглеродной продукции;
- получение прямых инвестиционных грантов;
- получение государственных субсидий.

Наиболее перспективным методом компенсации затрат для РФ с учетом структуры экономики и потребностей отраслей является использование CO₂ для повышения нефтеотдачи, а также зачет или продажа углеродных единиц, полученных в ходе реализации климатических проектов. И сегодня уже обсуждаются коммерческие CCUS-проекты, например, «Газпром нефть» планирует инвестировать 30 млрд руб. в развитие CCS в Оренбургской области [15], «Роснефть» планирует запустить пилотные проекты по улавливанию углерода в 2028 г. в районе Юганска и

Самотлора (ХМАО), а также на Сахалине [16]. Однако институциональная среда поддерживающая развитие CCUS-отрасли находится на стадии формирования и ограничивает возможности использования имеющегося потенциала.

Для того чтобы инновационные технологии декарбонизации не зависели от прямой государственной поддержки, нормативно-правовое регулирование и бизнес-модели должны быть направлены на формирование ценности CCUS-технологий для частных инвесторов на уровне их проектирования. В течение ближайших лет должна начаться фаза масштабирования CCUS-проектов, ориентированных на коммерческую эффективность для сохранения конкурентоспособности российских углеродоемких компаний на международных рынках. Все это требует быстрого и гибкого формирования законодательства в области создания новой отрасли по улавливанию, транспортировке, хранению и использованию CO₂ в РФ.

CCUS-технологии: потенциал и ограничения

Сценарий МЭА «Чистый ноль к 2050 г.» прогнозирует улавливание и хранение 7,1 Гт CO₂ к 2050 г., МГЭИК для достижения углеродной нейтральности к 2050 г. предполагает улавливать вдвое больше — в среднем 15 Гт в год. Прогнозируемый рост улавливания в ближайшие годы связан со следующими тенденциями:

- Модернизация большого количества энергетических и промышленных объектов, работающих на ископаемом топливе для сокращения эмиссии CO₂ без изменения ключевых производственно-технологических процессов.
- Производство низкоуглеродного водорода с помощью CCUS. Улавливание CO₂ из относительно концентрированного потока при получении водорода на основе ВИЭ и природного газа.
- Внедрение технологий улавливания и использования CO₂, которые еще не получили широкого распространения: в тяжелой промышленности, производстве цемента и синтетического топлива.

Технологическая цепочка CCUS состоит из четырех основных звеньев: улавливание углерода, его очистка и сжатие, транспортировка, полезное использование или долгосрочное хранение. При этом все CCUS-этапы, обладая разным потенциалом находятся на различных стадиях технологической зрелости (табл. 2).

За последние десять лет 14 CCUS-проектов не были приняты к реализации, 11 из которых были отклонены из-за низкой экономической эффективности и отсутствия перспектив окупаемости [19]. Высокая стоимость CCUS-технологий является основным препятствием для их развития, поэтому сегодня без государственной поддержки массовое внедрение CCUS в большинстве случаев нерентабельно. При этом согласно исследованию M. Vui и др. высокая стоимость применения CCUS-технологий будет перекладываться на потребителей [20]. Анализ затрат CCUS-проектов

демонстрирует существенный разброс себестоимости улавливания и хранения от \$20 до 450 за 1 т CO₂ в зависимости от отрасли: в цементной промышленности \$200 долл за 1 т CO₂ [21], при производстве энергии на основе угля и природного газа — \$270-290 за 1 т CO₂ [22]. Затраты могут снижаться при высокой концентрации потока эмиссии CO₂. При этом примерно 75% стоимости приходится на стадию улавливания CO₂ и 25% — на транспортировку, доля хранения незначительна, а при использовании CO₂ можно получить дополнительные доходы. В связи с тем, что на улавливание приходится большая часть затрат, высокая концентрация CO₂ в источнике эмиссии — главный фактор снижения себестоимости применения CCUS-технологий, поэтому наиболее экономически целесообразно применение CCUS в переработке природного газа, производстве этанола и аммиака, а в электроэнергетике, цементной и сталелитейной промышленности улавливание из рассеянных источников будет более дорогостоящим [23].

Самый дешевый способ хранения CO₂ — истощенные нефтяные и газовые месторождения, но их емкость ограничена, при этом ключевым фактором неопределенности является безопасность и отсутствие утечек в течение сотен лет. Лишь 20% от улавливаемых 40 млн т CO₂ направляется на хранение, остальной объем используется для повышения нефтеотдачи [24]. Общая техническая емкость для хранения CO₂ не определена, но она оценивается в пределах от 8000 Гт до 55000 Гт, большая доля из которых приходится на Россию, Северную Америку, Африку и Австралию [25].

Для развития CCUS-технологий необходимо сокращение затрат, в первую очередь это возможно за счет эффекта масштаба, так как высокие объемы приводят к снижению себестоимости улавливания тонны CO₂. При этом капитальные затраты сокращаются нелинейно, что может привести к значительной экономии при переходе от малого объекта к крупным установкам, которые способны улавливать несколько млн т CO₂ ежегодно. Так, капитальные затраты CCUS-проектов масштабируются в степени n , а n варьируется в диапазоне от 0,6 до 0,8 [26].

Еще одной мерой сокращения себестоимости является использование улавливаемого CO₂ в промышленном производстве, где затраты на улавливание и транспортировку компенсируются доходами от использования. Уже традиционным способом использования CO₂ является закачка его в нефтяные пласты для повышения нефтеотдачи. Так при закачке в нефтяной пласт, улавливаемый CO₂ взаимодействует с остаточной нефтью, вызывая ее набухание, что облегчает ее добычу [27]. Углерод можно использовать как сырье при прямом производстве, когда CO₂ не подвергается химическому воздействию, и путем преобразования CO₂ в полезный продукт. Сегодня главным образом CO₂ потребляется при производстве удобрений, продуктов питания, напитков, в очистке воды и проч. Химические и биологические технологии использования CO₂ находятся на стадии исследований и разработок, и их перспективы сложно оценимы.

Технологическая зрелость CCUS-цепочки (составлено автором на основе [17, 18])

Технологическая зрелость	Улавливание, очистка и сжатие	Транспортировка	Хранение	Использование
Зрелая технология (стадия использования)	Химическая абсорбция — CO ₂ поглощается растворителем, который нагревают для выделения концентрированного потока CO ₂ . Адсорбционное улавливание: CO ₂ прилипает к поверхности специальных материалов, а затем удаляется с поверхности с выделением концентрированного потока CO ₂	Наземный и морской трубопроводный транспорт — возможно использование перефилированных нефте- и газопроводов. Морской транспорт для транспортировки CO ₂ в другие порты аналогично сжиженному природному газу: CO ₂ сначала должен быть сжижен и храниться в резервуарах, а затем загружаться на суда для транспортировки, с последующей выгрузкой в других портах	Закачка CO ₂ в нефтяные месторождения для увеличения добычи. Глубокие соленые водоносные горизонты — подземные формации, обычно песчаники, содержащие соленую воду	Производство удобрений — мочевины. Производство продуктов питания и напитков; охлаждение. Очистка воды. Стимуляция роста растений
Адаптация технологии (стадия внедрения)	Кислородно-топливное разделение — сжигание топлива с использованием чистого кислорода и последующее улавливание выделяемого CO ₂ . Мембранное разделение основано на полимерных или неорганических устройствах (мембранах) с высокой селективностью по CO ₂ , которые пропускают CO ₂ , но действуют как барьеры, удерживающие другие газы в потоке			Производство строительных материалов — CO ₂ используется для замены воды в бетоне, что называется отверждением CO ₂ , или в качестве сырья для его компонентов (цемента и строительных заполнителей). CO ₂ вступает в реакцию с минералами или потоками отходов, такими как железный шлак, с образованием карбонатов, формы углерода, из которых состоит бетон
Демонстрация технология (стадия апробации)	Известковая петля представляет собой технологию, которая включает улавливание CO ₂ при высокой температуре с использованием двух основных реакторов в ходе процесса образуется известь и чистый поток CO ₂ . Прямое разделение включает в себя улавливание выбросов CO ₂ при производстве цемента путем косвенного нагревания известняка в специальной печи для обжига		Хранение CO ₂ в истощенных месторождениях нефти и газа — закачка углерода на глубины более 800 м, при этом различные физические и геохимические механизмы не позволяют выйти газу на поверхность	Преобразование водорода в синтетическое углеводородное топливо
Прототип технологии (стадия разработки)	Химический цикл: в первом реакторе мелкие частицы металла (например, железа или марганца) используются для связывания кислорода воздуха с образованием оксида металла, который затем транспортируется во второй реактор, где вступает в реакцию с топливом, производя энергию и концентрированный поток CO ₂ . Криогенное разделение: CO ₂ отделяют путем охлаждения пара и использования различий в температурах кипения для выделения CO ₂	Морской транспорт для транспортировки CO ₂ в оффшорные хранилища: морская выгрузка либо на морскую платформу перед кондиционированием и закачкой, либо прямая закачка в место хранения после кондиционирования на судне	Хранение CO ₂ в горных породах (базальтах) с высокой концентрацией реактивных химических веществ: закачиваемый CO ₂ вступает в реакцию с химическими компонентами с образованием устойчивых минералов, удерживающих CO ₂ . Хранение в океане (связывание углерода) — прямая глубоководная закачка углерода и хранения его там в течение нескольких столетий	Производство химических веществ, в которых углерод необходим для обеспечения их структуры и свойств: полимеры и первичные химические вещества, такие как этилен и метанол
Доля в структуре себестоимости	До 75%	Менее 25%	Незначительная доля	Получение дохода при продаже CO ₂

Таким образом, несмотря на высокую стоимость CCUS-проектов, есть существенный потенциал для сокращения затрат и коммерциализации технологий, который может быть реализован за счет эффективной монетизация CO₂ при зачете или продаже углеродных единиц, государственной поддержке, масштабировании проектов и инноваций в области полезного использования CO₂.

Возможности РФ в области хранения и использования CO₂

Согласно Докладу об особенностях климата на территории РФ за 2022 г. потепление наблюдается на всей территории России во все сезоны, при этом скорость роста усредненной по России среднегодовой температуры (линейный тренд) составила +0,49°C/10 лет [28], что в 2,7 раза превышает темпы роста средней глобальной температуры воздуха (0,18°C за 10 лет). Климатические факторы в ближайшем будущем начнут оказывать все более существенное воздействие на экономику и общество из-за потери биоразнообразия, стихийных бедствий, изменений условий жизни и труда. По данным Третьего оценочного доклада об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, в 2010-2020 гг. в результате стихийных бедствий эвакуации и вынужденному переселению подверглось более 142 тыс. человек. Особенно большую угрозу природные катаклизмы представляют для коренных малочисленных народов [29].

Наиболее углеродоемкие российские предприятия работают в ТЭК, металлургии, производстве цемента и удобрений, а также химической отрасли. И эти компании уже ставят цели по декарбонизации согласно данным мониторинга 67 крупнейшим представителям отраслей, при этом на достижение полной климатической нейтральности в первую очередь ориентированы предприятия ТЭК и металлургии [30].

Российские предприятия ТЭК направлены на снижение эмиссии парниковых газов за счет повышение энергоэффективности, модернизации оборудования, сокращения выбросов метана, внедрения ВИЭ и CCUS-технологий. Вместе с тем санкции в области импорта высокотехнологичных решений могут ограничить доступ к передовым CCUS-технологиям и компонентам для развития ВИЭ. Компании горно-металлургического комплекса ставят амбициозные цели по сокращению выбросов CO₂, в первую очередь путем повышения энергоэффективности и энергосбережения, использования водорода и CCUS-технологий, однако в краткосрочной перспективе многие технологические решения для декарбонизации металлургии находятся на стадии исследований и разработок. В химической отрасли основными методами достижения целей по снижению эмиссии CO₂ являются использование ВИЭ и повышение энергоэффективности. Российские предприятия угольной промышленности пока не имеют развитых стратегий декарбонизации. Таким образом, повышение энергоэффективности является ключевым направлением со-

кращения выбросов CO₂ во всех углеродоемких отраслях, однако потенциал этого метода быстро исчерпаем и не позволит достигнуть полной углеродной нейтральности [31]. Поэтому в долгосрочной перспективе предприятиям придется изменять ключевые технологии, источники энергии или развивать CCUS-проекты. Ископаемые виды топлива вероятнее всего останутся базовым источником энергии для многих стран мира, включая Россию. Поэтому CCUS-инициативы играют важную роль в декарбонизации производственных решений без радикальных изменений ключевых технологий и сохранении конкурентоспособности российских компаний на международных рынках.

В РФ емкость потенциальных резервуаров составляет около 157 Гт, при этом Волго-Уральский регион является самым перспективным местом для улавливания и хранения CO₂, так как обладает коллекторами с выработанными запасами полезных ископаемых и минерализованными водоносными пластами, при этом эти места имеют небольшую удаленность до ключевых источников эмиссии CO₂ [32]. Вместе с тем предварительные оценки по затратам улавливания и хранения показывают высокую себестоимость в расчете на 1 т на уровне \$263 [33]. Поэтому для повышения экономической эффективности CCUS в РФ возможно использование CO₂ для повышения нефтеотдачи, поток доходов от которого компенсирует инвестиционные вложения.

Другим возможным направлением для применения CCUS с учетом экономической целесообразности является производство водорода на основе природного газа. Без улавливания CO₂ получение водорода на основе ископаемого топлива является углеродоемким процессом [34], а низкоуглеродный водород может обеспечить около 20% потребления энергии во всем мире к 2050 г., 60% из которых будет приходиться на получение водорода на основе ВИЭ, остальные 40% за счет ископаемых видов топлива с применением CCUS. И у РФ есть существенный потенциал, чтобы занять конкурентное положение на мировом рынке водородной энергетики, который по прогнозам к 2030 г. составит более 100 млн т в год. Согласно российской дорожной карте «Развитие водородной энергетики», планируемый объем производства водорода к 2030 г. достигнет от 1,5 до 3,5 млн т, из которых низкоуглеродный водород в объеме 550 тыс. т в основном будет направлен на внутренне потребление. Ключевыми регионами производства водорода станут Сахалин, Якутия, Ямал, Восточная Сибирь, Северо-Запад. Согласно Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов, до 2050 г. должен быть создан экспортно ориентированный сектор низкоуглеродного водорода для замещения экспорта ископаемых видов топлива. Так применение CCUS-технологий при производстве водорода на основе природного газа поможет реализовать потенциал декарбонизации энергетического сектора РФ.

Для оптимизации затрат в России особую роль играет кластеризация в отраслях эмитентах климатически активных газов и использующих CO₂ в качестве ресурса для производства. Формирование кластеров

позволит создать единую систему транспортировки CO_2 и обеспечить его равномерный поток для дальнейшего использования. Например, возможно создание кластера «Водород на основе природного газа, черная металлургия и нефтедобыча», который будет направлен на улавливание CO_2 в процессе производства стали путем прямого восстановления железа с использованием водорода и дальнейшей закачкой уловленного CO_2 в пласты для повышения нефтеотдачи. При этом нефтегазовые компании будут являться ядром таких кластеров на базе имеющихся технологий и инфраструктуры, которые не требуют радикальной модернизации для транспортировки и хранения CO_2 . Помимо прочего основными потребителями CO_2 в РФ после 2030 г. с учетом разработки и адаптации новых технологий использования углерода станут: цементная и химическая промышленность, производство удобрений и полимеров.

Сегодня для развития CCUS-технологий в РФ необходимо создание благоприятных условий в первую очередь для реализации масштабируемых проектов, так как именно благодаря эффекту масштаба снижается себестоимость улавливания, транспортировки, хранения и использования CO_2 .

Ключевые рекомендации по формированию необходимых условий можно разделить на несколько направлений:

1. Рыночные механизмы. Развитие углеродного рынка, правил и стандартов верификации климатических проектов в области улавливания, транспортировки и хранения CO_2 обеспечит возможность компенсации инвестиционных и операционных затрат. Разработка стандартов для низкоуглеродного топлива и обязательств по его закупке, в том числе в виде торговых сертификатов, обеспечит стабильный сбыт более дорогой на первых этапах углероднейтральной энергии, полученной с помощью CCUS.
2. Система финансовой поддержки. Разработка систем грантовой поддержки по финансированию капитальных затрат целевых проектов CCUS; налоговых льгот, покрывающих разницу между себестоимостью углеродных единиц, полученных с помощью CCUS, и рыночной ценой; механизмов льготной тарификации и государственных закупок углероднейтральной энергии и продукции позволят оптимизировать затраты частных инвесторов и сделать более привлекательными вложения в CCUS-технологии.
3. Нормативно-правовое регулирование и стандартизация. Разработка национальной стратегии развития CCUS-отрасли, стандартов по улавливанию, транспортировке, хранению и использованию CO_2 , требований для использования резервуаров хранения CO_2 и системы стимулирования нефтегазовых компаний к использованию существующей инфраструктуры для реализации CCUS-проектов, введение прогрессивных ставок налогообложения производства продукции с высоким углеродным следом позволят сформировать институциональную среду для эффективного развития CCUS.

4. Стимулирование инноваций и НИОКР. Грантовое финансирование НИОКР в области технологий декарбонизации, создание площадок для взаимодействия научно-исследовательских институтов и углеродоемких бизнес-структур позволят обеспечить разработку и практическое использование передовых технологий декарбонизации.
5. Снижение рисков. Разработка финансовых инструментов для покрытия рисков утечек CO_2 при хранении, закрепление прав собственности на хранимый CO_2 в том числе за государством при истечении срока реализации проекта снизят риски применения CCUS-технологий.

Сегодня не существует универсальных подходов для развития CCUS-отрасли. Для каждой страны сочетание инструментов и технологий зависит от географических, институциональных, экономических и производственных факторов. В РФ путь CCUS-технологий очевидно будет проложен нефтегазовым сектором благодаря имеющейся инфраструктуре, финансовым возможностям и потребности в снижении эмиссии CO_2 для обеспечения конкурентоспособности на формирующихся энергетических углероднейтральных рынках.

Заключение

Технологии улавливания, транспортировки, хранения и использования CO_2 привлекают все большее внимание со стороны научного и бизнес-сообщества в связи с обострением климатической повестки и актуализацией краткосрочных и среднесрочных задач декарбонизации углеродоемких производственно-технологических процессов, так как способны обеспечить достижение климатической нейтральности без радикального изменения ключевых технологий и источников энергии. Вместе с тем CCUS-технологии сегодня используются точно в виду высокой капиталоемкости и отсутствия экономической целесообразности коммерческих проектов, а также малой технологической готовности большинства способов промышленного применения CO_2 . Однако аналитические агентства и правительства многих стран называют CCUS ключевой технологией достижения климатической нейтральности, которая обеспечит переход к безуглеродному будущему при непрерывном промышленном прогрессе и минимальных затратах в сравнении с другими технологиями декарбонизации, предполагающими ликвидацию и замещение углеродоемких производственных процессов с неоконченным инвестиционным циклом.

В условиях отсутствия эффекта масштаба и концентрированных источников эмиссии климатически активных газов CCS-проекты демонстрируют высокую себестоимость улавливания и хранения CO_2 , которая полностью не компенсируется при текущих ценах на углеродные единицы и налоговые ставки на выбросы CO_2 . Однако использование CO_2 для повышения нефтеотдачи и другие перспективные способы его промышленного применения имеют большой потенциал для повышения экономической эффектив-

ности CCUS-технологий. В странах с углеродоемкими производствами и энергетическом секторе, основанном на ископаемом виде топлива, таких как Россия, CCUS-технологии станут ключевым способом обеспечения углеродно-нейтрального экономического роста. РФ имеет особый потенциал в области хранения CO₂ благодаря наличию истощенных коллекторов после добычи полезных ископаемых, использования CO₂ для повышения нефтеотдачи в виду широко-масштабной нефтяной промышленности, а также в перспективных областях промышленного применения CO₂ с учетом организации кластеров из разных углеродоемких отраслей и формирования сектора водородной энергетики на основе природного газа с использованием технологий улавливания CO₂ при имеющейся нефтегазовой инфраструктуре. Таким образом, задачи разработки национальной стратегии развития CCUS-отрасли, систем финан-

совой поддержки и нормативно-правового регулирования климатических проектов в области улавливания, транспортировки, хранения и использования CO₂, а также формирования развитых рыночных механизмов являются остроактуальными для РФ, так как их решение позволит обеспечить долгосрочную конкурентоспособность российских предприятий на международных рынках в условиях глобального энергоперехода и структурных сдвигах экономики.

Благодарность. Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке гранта «От карбонового полигона к углеродному регулированию: потенциал и пути развития секвестрационной углеродной индустрии на территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга: этап 1».

Список использованных источников

1. IPCC (2023) AR6 Synthesis Report. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr>.
2. R. Way, M. Ives, P. Mealy. Empirically grounded technology forecasts and the energy transition//Joule. Vol. 6 (9). 2022. P. 2057-2082. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.009>.
3. BP (2022) Statistical Review of World Energy. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
4. Energy Transitions Commission. Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy. 2021. <https://www.energytransitions.org/publications/making-clean-hydrogen-possible>.
5. Н. Пахомова, К. К. Рихтер, М. Ветрова. Глобальные климатические вызовы, структурные сдвиги в экономике и разработка бизнесом проактивных стратегий достижения углеродной нейтральности//Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика, 38 (3), 2022, 331-364. <https://doi.org/10.21638/spbu05.2022.301>.
6. IEA (2021) About CCUS. <https://www.iea.org/reports/about-ccus>.
7. European Climate Law, 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>.
8. Circular economy action plan, 2019. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en.
9. UK Government. CCS deployment at dispersed industrial sites, 2020. <https://www.gov.uk/government/publications/carbon-capture-usage-and-storage-ccus-deployment-at-dispersed-sites>.
10. IEA (2022) Section 45Q Credit for Carbon Oxide Sequestration. <https://www.iea.org/policies/4986-section-45q-credit-for-carbon-oxide-sequestration>.
11. A. Ku, P. Cook, P. Hao et al. Cross-regional drivers for CCUS deployment//Clean Energy. Vol. 4 (3). 2020. P. 202-232. <https://doi.org/10.1093/ce/zkaa008>.
12. Global CCS Institute. 2022. Status Report. <https://status22.globalccsinstitute.com/2022-status-report/appendices>.
13. Приказ № 273 от 03.02.2022 г. «Об организации деятельности технического комитета по стандартизации "Улавливание, транспортирование и хранение углекислого газа" (ТК 239)». Росстандарт, 2022. <https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/302294>.
14. Ученые составили карту перспективных мест в России для захоронения углекислого газа. Экология производства, 2022. <https://news.ecoindustry.ru/2022/04/uchenye-sostavili-kartu-perspektivnyh-mest-v-rossii-dlya-zahoroneniya-uglekislogo-gaza>.
15. «Газпром нефть» раскрыла детали российского проекта улавливания CO₂. Ведомости, 2021. <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2021/12/17/901240-gazprom-neft-raskrila>.
16. «Роснефть» планирует три пилотных проекта по хранению и использованию CO₂. Интерфакс, 2022. <https://www.interfax.ru/business/823667>.
17. IEA (2020) Regional opportunities CCUS. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/ccus-technology-innovation>.
18. CCUS – экономика и перспективы в России. Инфотек, 2023. <https://itek.ru/analytics/ccus-ekonomika-i-perspektivy-v-rossii>.
19. Energy Transition Institute (2021). Carbon Capture Utilization and Storage. <https://www.kearney.com/documents/17779499/17781864/CCUS-2021%2BFactBook.pdf/718e94af-1536-b23e-1ac9-a4de74ffef25?t=1623398953000>.
20. M. Bui, C. Adjiman, A. Bardow, P. Webley. Carbon capture and storage (CCS): the way forward//Energy & Environmental Science. Vol. 11. 2018. P. 1062-1176. <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A>
21. M. Moch, W. Xue, J. Holdren. Carbon Capture, Utilization, and Storage: Technologies and Costs in the U.S. Context. Policy Brief, 2022. <https://www.belfercenter.org/publication/carbon-capture-utilization-and-storage-technologies-and-costs-us-context>.
22. National Petroleum Council Report (2019). A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use, and Storage. <https://dualchallenge.npc.org>.
23. IEA (2022) CCUS in Clean Energy Transitions. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>.
24. J. Alcalde, S. Flude, M. Wilkinson. Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation//Nature Communications. Vol. 9. 2018. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04423-1>.
25. IEA (2022). CCUS technology innovation. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/ccus-technology-innovation#reference-7>.
26. K. Jiang, P. Ashworth. The development of Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) research in China: A bibliometric perspective//Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 138. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110521>.
27. F. Bruns, T. Babadagli. Heavy-oil recovery improvement by additives to steam injection: Identifying underlying mechanisms and chemical selection through visual experiments//Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 188. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106897>.
28. Росгидромет. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научно-технологические, 2022. 124 с. http://downloads.igce.ru/reports/Doklad_o_klimat_RF_2022_s_podpisiyu_compressed_with_cover.pdf.
29. Распоряжение Правительства РФ от 11 марта 2023 г. № 559-р. «Национальный план мероприятий второго этапа адаптации к изменениям климата на период до 2025 г.». <http://static.government.ru/media/files/DzVPGII7JgT7QYRoogphW69KKQREGTB.pdf>.
30. Мониторинг экологических стратегий крупнейших российских нефинансовых компаний 2021 г. – первое полугодие 2022 г. Банк России, 2023. http://www.cbr.ru/Content/Document/File/144502/analytic_note_20230202_dfs.pdf.
31. J. Li. Comparative life cycle energy consumption, carbon emissions and economic costs of hydrogen production from coke oven gas and coal gasification//International Journal of Hydrogen Energy, 45 (51), 2020. P. 27979-27993.
32. A. Cherepovitsyn, S. Fedoseev, P. Tsvetkov et al. Potential of Russian Regions to Implement CO₂-Enhanced Oil Recovery//Energies. Vol. 11 (6): 1528. 2018. <https://doi.org/10.3390/en11061528>.
33. A. Cherepovitsyna, E. Kuznetsova, T. Guseva. The costs of CC(U)S adaptation: The case of Russian power industry//Energy Reports. Vol. 9 (1). 2023. P. 704-710. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.11.104>.
34. IEA (2022). Opportunities for Hydrogen Production with CCUS. <https://www.iea.org/reports/opportunities-for-hydrogen-production-with-ccus-in-china>.

References

1. IPCC (2023) AR6 Synthesis Report. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr>.
2. R. Way, M. Ives, P. Mealy. Empirically grounded technology forecasts and the energy transition//*Joule*. Vol. 6 (9). 2022. P. 2057-2082. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.08.009>.
3. BP (2022) Statistical Review of World Energy. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>.
4. Energy Transitions Commission. Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy. 2021. <https://www.energytransitions.org/publications/making-clean-hydrogen-possible>.
5. N. Pahomova, K. K. Rihter, M. Vetrova. Global'nye klimaticheskie vyzovy, strukturnye sdvigi v ekonomike i razrabotka biznesom proaktivnykh strategij dostizheniya uglerodnoj nejtral'nosti//*Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ekonomika*, 38(3), 2022, 331-364 . <https://doi.org/10.21638/spbu05.2022.301>.
6. IEA (2021) About CCUS. <https://www.iea.org/reports/about-ccus>.
7. European Climate Law, 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119>.
8. Circular economy action plan, 2019. https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en.
9. UK Government. CCS deployment at dispersed industrial sites, 2020. <https://www.gov.uk/government/publications/carbon-capture-usage-and-storage-ccs-deployment-at-dispersed-sites>.
10. IEA (2022) Section 45Q Credit for Carbon Oxide Sequestration. <https://www.iea.org/policies/4986-section-45q-credit-for-carbon-oxide-sequestration>.
11. A. Ku, P. Cook, P. Hao et al. Cross-regional drivers for CCUS deployment//*Clean Energy*. Vol. 4 (3). 2020. P. 202-232. <https://doi.org/10.1093/ce/zkaa008>.
12. Global CCS Institute. 2022. Status Report. <https://status22.globalccsinstitute.com/2022-status-report/appendices>.
13. Prikaz № 273 ot 03.02.2022 «Ob organizacii deyatelnosti tekhnicheskogo komiteta po standartizacii "Ulavlivanie, transportirovanie i hranenie uglekisloga gaza" (TK 239)». Rosstandart, 2022. <https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/302294>.
14. Uchenye sostavili kartu perspektivnykh mest v Rossii dlya zahoroneniya uglekisloga gaza. *Ekologiya proizvodstva*, 2022. <https://news.ecoindustry.ru/2022/04/uchenye-sostavili-kartu-perspektivnykh-mest-v-rossii-dlya-zahoroneniya-uglekislogo-gaza>.
15. «Gazprom neft» raskryla detali rossijskogo proekta ulavlivaniya CO₂. *Vedomosti*, 2021. <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2021/12/17/901240-gazprom-neft-raskrila>.
16. «Rosneft» planiruet tri pilotnykh proekta po hraneniyu i ispol'zovaniyu CO₂. *Interfaks*, 2022. <https://www.interfax.ru/business/823667>.
17. IEA (2020) Regional opportunities CCUS. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/ccus-technology-innovation>.
18. CCUS – ekonomika i perspektivy v Rossii. *Infotek*, 2023. <https://itek.ru/analytics/ccus-ekonomika-i-perspektivy-v-rossii>.
19. Energy Transition Institute (2021). Carbon Capture Utilization and Storage. <https://www.kearney.com/documents/17779499/17781864/CCUS-2021%2BFactBook.pdf/718e94af-1536-b23e-1ac9-a4de74ffef25?t=1623398953000>.
20. M. Bui, C. Adjiman, A. Bardow, P. Webley. Carbon capture and storage (CCS): the way forward//*Energy & Environmental Science*. Vol. 11. 2018. P. 1062-1176. <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A>
21. M. Moch, W. Xue, J. Holdren. Carbon Capture, Utilization, and Storage: Technologies and Costs in the U.S. Context. *Policy Brief*, 2022. <https://www.belfercenter.org/publication/carbon-capture-utilization-and-storage-technologies-and-costs-us-context>.
22. National Petroleum Council Report (2019). A Roadmap to At-Scale Deployment of Carbon Capture, Use, and Storage. <https://dualchallenge.npc.org>.
23. IEA (2022) CCUS in Clean Energy Transitions. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>.
24. J. Alcalde, S. Flude, M. Wilkinson. Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation//*Nature Communications*. Vol. 9. 2018. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04423-1>.
25. IEA (2022). CCUS technology innovation. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/ccus-technology-innovation#reference-7>.
26. K. Jiang, P. Ashworth. The development of Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) research in China: A bibliometric perspective//*Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 138. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110521>.
27. F. Bruns, T. Babadagli. Heavy-oil recovery improvement by additives to steam injection: Identifying underlying mechanisms and chemical selection through visual experiments//*Journal of Petroleum Science and Engineering*. Vol. 188. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106897>.
28. Rosgidromet. Tretij ocenochnyj doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii. *Obshchee rezjume*. SPb.: Naukoemkie tekhnologii, 2022. 124 p. http://downloads.igce.ru/reports/Doklad_o_klimate_RF_2022_s_podpisiyu_compressed_with_cover.pdf.
29. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 11 marta 2023 g. № 559-r. «Nacional'nyj plan meropriyatij vtorogo etapa adaptacii k izmeneniyam klimata na period do 2025 g.» <http://static.government.ru/media/files/DzVPLI7JgT7QYRoogpW69KKQREGTB.pdf>.
30. Monitoring ekologicheskikh strategij krupnejshih rossijskikh nefinansovykh kompanij 2021 g. – pervoe polugodie 2022 g. *Bank Rossii*, 2023. http://www.cbr.ru/Content/Document/File/144502/analytic_note_20230202_dfs.pdf.
31. J. Li. Comparative life cycle energy consumption, carbon emissions and economic costs of hydrogen production from coke oven gas and coal gasification//*International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (51), 2020. P. 27979-27993.
32. A. Cherepovitsyn, S. Fedoseev, P. Tsvetkov et al. Potential of Russian Regions to Implement CO₂-Enhanced Oil Recovery//*Energies*. Vol. 11 (6): 1528. 2018. <https://doi.org/10.3390/en11061528>.
33. A. Cherepovitsyna, E. Kuznetsova, T. Guseva. The costs of CC(U)S adaptation: The case of Russian power industry//*Energy Reports*. Vol. 9 (1). 2023. P. 704-710. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.104>.
34. IEA (2022). Opportunities for Hydrogen Production with CCUS. <https://www.iea.org/reports/opportunities-for-hydrogen-production-with-ccus-in-china>.