

DOI: 10.37930/1990-9780-2024-3-81-165-181

А. А. Череповицына¹

УЛАВЛИВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА: КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ВИДЕНИЕ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК В РОССИИ²

Снижение выбросов парников газов (ПГ) в контексте решения климатических задач становится одним из основных вызовов для развития промышленности. Одним из перспективных направлений признаётся комплекс технологий улавливания и хранения углекислого газа (УХУ), который направлен на предотвращение попадания в атмосферу уже образовавшихся выбросов ПГ. В мире действуют порядка 40 таких проектов, в России, по разным причинам, они отсутствуют. Цель исследования заключается в формировании концептуального видения развития технологических цепочек УХУ в промышленном секторе России с учётом существующих предпосылок, определяющих их перспективное развитие стратегических факторов и проблем реализации таких проектов. Представлен анализ мирового опыта реализации технологических цепочек УХУ, определены преимущества и проблемы их реализации в контексте общей карты декарбонизации промышленности. Выявлены базовые предпосылки для внедрения технологий в России, определены их суть и возможные направления для развития. Представлен набор стратегических факторов, которые будут определять будущее развитие УХУ в России. Факторы носят управляемый характер и составляют базу функционирования технологических цепочек в промышленности. Сформулированы выводы касательно перспектив развития данного направления в России. Обозначена важность совершенствования мер государственного регулирования для развития технологий улавливания и хранения углекислого газа.

Ключевые слова: улавливание и хранение, углекислый газ, технологические цепочки, промышленность, Россия, предпосылки, стратегические факторы, УХУ.

УДК 338.1

Введение

Решение глобальных климатических вопросов, активно обсуждаемых в мировом масштабе, будет зависеть от уровня вовлеченности отдельных государств. Необходимость интеграции низкоуглеродного развития в общую траекторию социально-экономического развития России признано на государственном уровне, в частности в

¹ Алина Александровна Череповицына, зав. лаб., ст. науч. сотр. Института экономических проблем им. Г. П. Лузина Кольского научного центра РАН (184209, Россия, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24а), канд. экон. наук, доцент, e-mail: iljinovaaa@mail.ru.

² Статья подготовлена в рамках государственного задания ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук» в части проведения НИР Института экономических проблем им. Г. П. Лузина FMEZ-2023-0001 «Разработка научных основ устойчивого развития природоэксплуатирующих отраслей Арктической зоны хозяйствования РФ в условиях энергетической трансформации, глобальных экономических и климатических изменений».

рамках принятой в 2021 г. Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. (далее – Стратегия с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 г.)³. В России определены национальные климатические цели по снижению выбросов парниковых газов (ПГ) до 70 % к 2030 г. от уровня 1990 г.⁴ и достижению углеродной нейтральности не позднее 2060 г.⁵ Государством признаётся важность разработки соответствующей политики и мер по снижению выбросов ПГ на всех уровнях.

Вместе с тем переход к низкоуглеродному развитию должен проводиться планомерно, с учётом национальных интересов и особенностей отдельных стран и регионов. Преобладание традиционных системообразующих отраслей промышленности, высокая роль добывающих и обрабатывающих производств в экономике страны, доминирование традиционных энергетических ресурсов и производственных мощностей, имеющийся значительный ресурсный потенциал – всё это должно быть учтено при планировании и реализации национальной политики низкоуглеродного развития. Перед промышленным и энергетическим секторами России стоит новая уникальная задача снижения выбросов ПГ без ущерба для их основной деятельности, требующая индивидуальных комплексных решений в каждом конкретном случае.

Согласно доступным оценкам экспертов, особый интерес среди обсуждаемых в науке и используемых на практике мер вызывают решения по предотвращению попадания уже образовавшегося углекислого газа в атмосферу – улавливание, использование и хранение углерода, известные как решения УХУ. Именно они часто оказываются важной составляющей наиболее реалистичного пути к снижению выбросов ПГ в атмосферу. Признанным является факт того, что использование УХУ в сочетании с другими опциями декарбонизации позволит достичь наиболее эффективной по стоимости комбинации⁶, что в последние несколько лет определило рост активности в области УХУ по всему миру.

Важно, что первый этап всей технологической цепочки – улавливание углекислого газа на источнике выбросов – «работает» непосредственно с уже образовавшимся углекислым газом (CO₂), предотвращая его попадание в атмосферу. Это позволяет снижать выбросы ПГ постепенно, минуя радикальные изменения в традиционных процессах в энергетике и промышленности.

В России в настоящее время нет ни одного действующего проекта УХУ. Вместе с тем улавливание и хранение углерода рассматривается как одно из направлений в Стратегии с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 г.⁷, а промышленные компании

³ Об утверждении Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.: Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 г. № 3052-р. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402894476/> (дата обращения: 20.06.2024).

⁴ О сокращении выбросов парниковых газов: Указ Президента РФ от 04.11.2020 г. № 666. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45990> (дата обращения: 20.06.2024).

⁵ Об утверждении Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.: Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 г. № 3052-р // Собрание законодательства Российской Федерации. 08.11.2021 г.

⁶ См.: Global Status of CCS 2021: CCS Accelerating to net Zero / Global CCS Institute. – 2021. – 79 p. – URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf (дата обращения: 01.07.2024), а также: [1].

⁷ URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402894476/> (дата обращения: 20.06.2024).

проявляют интерес к данному комплексу технологий. Это подтверждает перспективность развития технологических цепочек УХУ в промышленном секторе России.

В аналитических материалах ведущих мировых организаций, освещающих вопросы изменения климата (например, Global CCS Institute, The Intergovernmental Panel on Climate Change, International Energy Agency и др.), а также в зарубежной академической литературе (например, [2–5]) вопросы развития инициатив и проектов УХУ рассмотрены достаточно широко. Ведущими российскими учёными и экспертами активно изучаются общие аспекты низкоуглеродного развития экономики и энергетики России [6–11], тогда как опциям улавливания и хранения углерода в контексте декарбонизации промышленности в российской литературе уделяется недостаточное внимание.

Цель исследования заключается в выявлении основных преимуществ и проблем реализации технологических цепочек УХУ с определением базовых предпосылок и формированием общего концептуального видения развития данного направления в промышленном секторе России. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- определена сущность технологических цепочек УХУ, представлен анализ мирового опыта, проблем и перспектив развития технологий;
- выявлены базовые предпосылки для реализации проектов в условиях России с ориентацией на возможности построения полных цепочек по стадиям технологического процесса обращения с углекислым газом «улавливание – транспортировка – хранение»;
- идентифицированы ключевые управляемые стратегические факторы, определяющие перспективное развитие УХУ в России;
- представлены общие рекомендации по интенсификации развития данного направления в промышленном секторе России.

Технологические цепочки УХУ: сущность, мировой опыт, преимущества и проблемы реализации

В общем виде, когда речь идёт об улавливании и последующем обращении с техногенным CO₂, технологическая цепочка УХУ включает в себя три последовательных этапа: 1) улавливание углекислого газа на источнике выбросов; 2) подготовка и транспортировка газа; 3) использование газа и/или его закачка для долгосрочного хранения под землёй.

Согласно базе данных Глобального института CCS (*англ.* CCS Database – Global CCS Institute)⁸, по состоянию на 2023 г. мировые действующие мощности улавливания и хранения углерода, которые уже сегодня вносят свой вклад в снижение выбросов ПГ энергетикой и промышленностью, составляют около 40–50 Мт CO₂ в год. Активное развитие мощностей в последние годы обусловило появление десятков новых проектов на разных стадиях с потенциалом улавливания около 360 Мт CO₂ в год. С 2020 г. среднегодовой темп роста мощностей стабильно превышает 50 %, что подтверждает активный интерес к внедрению данного комплекса технологий. Несмотря на то что на разных этапах развития находится около 400 проектов, действующих – только порядка 40 (рис. 1). Следует отметить достаточно медленный темп ввода проектов в эксплуатацию, что обусловлено длительным периодом строительст-

⁸ CCS Facilities Database // Global CCS Institute. – 2023. – URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 10.04.2024).

ва мощностей, сложностью организации и реализации полной технологической цепочки, а также проблемами экономического характера.

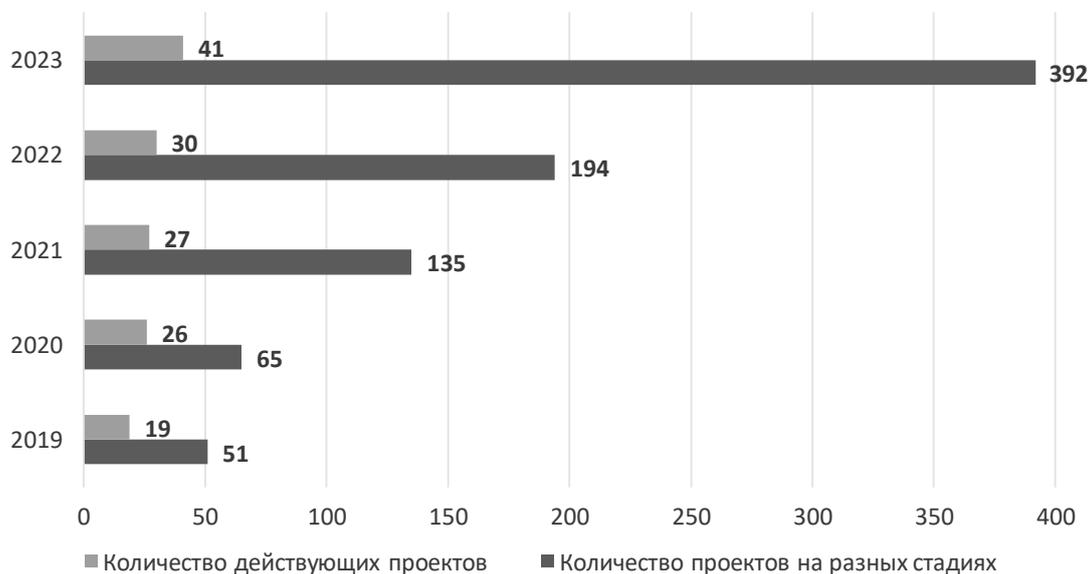


Рис. 1. Динамика количества проектов УХУ в мире в 2019–2023 гг.
(составлено автором по данным CCS Facilities Database // Global CCS institute. – 2023 г.
URL: <https://co2re.co/FacilityData>) (дата обращения: 10.04.2024)

Основными источниками техногенного CO₂ являются крупные объекты энергетики и промышленности (нефте- и газоперерабатывающие мощности, угольные электростанции, сталелитейные, химические и цементные заводы и пр.), что определяет их ключевую роль при построении технологической цепочки. Уловленный на источнике выбросов CO₂ может использоваться или закачиваться под землю для перманентного хранения «на месте», а может транспортироваться трубопроводами, морскими судами и другими видами транспорта (первые – чаще). В случае захоронения углекислый газ может размещаться в глубоких геологических формациях, таких как истощённые нефтяные и газовые резервуары, соленосные пласты⁹. Следует отметить, что технологии полезного использования углекислого газа (прямого или с преобразованием CO₂) находятся на начальных этапах развития, за исключением одной. Применение CO₂ для повышения нефтеотдачи пластов (*англ.* CO₂ enhanced oil recovery – CO₂-EOR) с последующим хранением в нефтяных и газовых месторождениях достигло промышленных масштабов, что определяет особую роль нефтегазовых компаний в развитии данного направления.

Если говорить о достоинствах УХУ, определяющих перспективность развития данного комплекса технологий, то можно отметить, что они способны решить сразу несколько потенциальных проблем, а именно:

⁹ CCUS Policies and Business Models: Building a commercial market / IEA. 2023. 123 p. URL: <https://www.developmentaid.org/api/frontend/cms/file/2023/11/CCUSPoliciesandBusinessModels.pdf> (дата обращения: 06.06.2024).

1) сократить уровень выбросов на традиционных промышленных и энергетических объектах путём предотвращения попадания ПГ в атмосферу;

2) сократить уровень выбросов в трудно декарбонизируемых энергоёмких секторах промышленности (например, цементная промышленность, производство чугуна и стали, химическая промышленность)¹⁰;

3) внести существенный вклад в продолжение эксплуатации действующих промышленных и энергетических мощностей, позволяя избежать преждевременного вывода ценных активов¹¹;

4) смягчить и сделать постепенным процесс энергетического перехода.

Так, потенциальные преимущества УХУ для достижения климатических целей достаточно очевидны. Вместе с тем их реализация по миру сопряжена с рядом существенных трудностей. Прежде всего, это связано с высокой стоимостью реализации таких решений. Полная технологическая цепочка УХУ может быть реализована в диапазоне затрат от 20–25 до 200 и выше долларов за одну тонну CO₂, при этом большая часть затрат – это затраты на улавливание газа на источнике выбросов [12]. К сложностям технологического характера можно отнести отсутствие зрелых масштабированных технологий, которые позволяют улавливать углекислый газ с умеренными затратами, а дальнейшие этапы технологической цепочки – использование углекислого газа и/или геологическое захоронение – также по большей части остаются проблематичными и по ряду аспектов спорными.

Большинство действующих проектов, реализующих закачку CO₂ в геологические формации, используют его для повышения нефтеотдачи (CO₂-EOR), однако и здесь возникает ряд вопросов. Сложно реализуемым аспектом при организации полных технологических цепочек УХУ является необходимость их территориальной «привязки» к нефтегазовым месторождениям. Отсутствие «реального» спроса на CO₂ со стороны нефтегазовых компаний, имеющих более конкурентоспособные альтернативные решения по повышению нефтеотдачи, влечёт за собой необходимость обязательного развития соответствующей институциональной среды. Безопасность захоронения углекислого газа под землёй всё ещё изучается и является предметом обеспокоенности общественности в местах реализации таких инициатив [13], а отсутствие или недостаточность доходной части проектов в большинстве случаев сдерживает участие бизнеса в реализации технологических цепочек.

Проекты CO₂-EOR могут компенсировать часть затрат на УХУ за счёт дополнительной добычи нефти, но и они реализуются, согласно мировому опыту, лишь в странах с соответствующими мерами государственного регулирования, которые подразумевают значительную поддержку компаний-инициаторов таких проектов. В условиях отсутствия в большей части стран и регионов должного регулирования затраты на улавливание и хранение углерода на сегодня не сопоставимы с потенциальными выгодами, что осложняет развитие данного направления.

¹⁰ Технологический обзор «Углеродно-нейтральные энергоёмкие отрасли промышленности» / UNECE. 2023. – 29 p. URL: https://unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_RU_draft_1.pdf (дата обращения: 14.05.2024).

¹¹ CCUS Policies and Business Models: Building a commercial market.

Предпосылки развития технологических цепочек УХУ в России

Существует множество причин отсутствия как пилотных, так и коммерческих проектов улавливания и хранения углерода в России. Известно лишь о некотором опыте реализации на территории страны пилотных проектов CO₂-EOR [14]. Единственным заявленным на сегодня проектом на ранних этапах разработки является «Ямал СПГ» CCS (ПАО «НОВАТЭК»), в рамках которого планируется улавливать углекислый газ на заводе по производству сжиженного природного газа с его последующей закачкой в геологические пласты для перманентного хранения. Однако этот комплекс технологии вызывает интерес со стороны промышленных компаний, в том числе нефтегазовых. Например, ПАО НК «Роснефть»¹² рассматривает возможность использования подземных хранилищ и собственных выработанных месторождений для хранения углекислого газа. Следует отметить, что Россия обладает серьезным потенциалом для реализации УХУ с организационно-экономической точки зрения.

Россия является одним из крупнейших мировых эмитентов ПГ с долей порядка 4 % от суммарных выбросов (рис. 2), что обуславливает повышенное внимание к стране на глобальном уровне и необходимость поиска различных решений по сокращению выбросов ПГ в атмосферу.

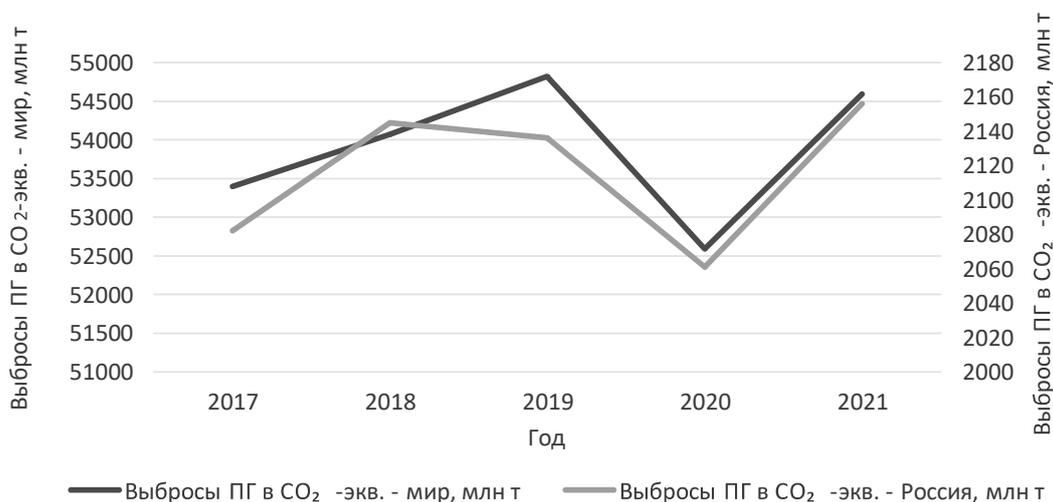


Рис. 2. Динамика выбросов ПГ в 2017–2021 гг. (мир и Россия) (составлено автором по данным Федеральной службы государственной статистики РФ. Совокупные выбросы ПГ. URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/K1-2.xlsx> (дата обращения: 03.07.2024)

Большая часть выбросов ПГ в России приходится на энергетический сектор — около 78 %; выбросы от промышленной деятельности составляют порядка 12 %¹³. Наибольшая концентрация промышленных объектов-эмитентов ПГ характерна для

¹² Роснефть анонсирует климатические цели до 2035 г. // ПАО «Роснефть»: официальный сайт. 2020. URL: <https://www.rosneft.ru/press/today/item/204805> (дата обращения: 12.06.2024).

¹³ Greenhouse Gas Inventory Data. GHG Profiles – Annex 1. Russian Federation / United Nations. Climate Change. 2022. URL: https://di.unfccc.int/ghg_profiles/annexOne/RUS/RUS_ghg_profile.pdf (дата обращения: 18.06.2024).

территорий Уральского, Центрального, Приволжского федеральных округов, которые могут рассматриваться как потенциальные перспективные территории для улавливания углекислого газа.

Оценки касательно пригодных для размещения газа хранилищ по России существенно разнятся, но все они превышают любой вероятный объём CO_2 , который может улавливаться в рамках цепочек УХУ в стране, и предполагают значительный объём «свободных» мощностей хранения в будущем при соответствующем уровне их изученности, что является благоприятным фактором стратегического характера для реализации УХУ в России. Развитая инфраструктура хранения и легитимность всего процесса, связанного с долгосрочным размещением углекислого газа под землёй, – одна из базовых составляющих, необходимых для реализации технологических цепочек УХУ в промышленности.

Наибольший потенциал, по приблизительным оценкам, в рамках проектов CO_2 -EOR имеют Приволжский и Центральный федеральные округа, который оценивается в 720 Мт, а также Уральский федеральный округ – порядка 470 Мт. Потенциально большие резервуары могут располагаться в крупнейших нефтегазовых провинциях, в частности Волго-Уральской, Западно-Сибирской и Северо-Кавказской [15; 16]. По последним более реалистичным оценкам Госкомиссии по запасам полезных ископаемых, на территории России могут быть созданы мощности, потенциально размещающие до 4,6 Гт CO_2 в год. Вместе с тем данное направление требует основательного комплексного подхода к его развитию – вопросы безопасного хранения CO_2 под землёй требуют выделения данного направления в отдельный вектор государственной политики низкоуглеродного развития.

Ещё одной значимой предпосылкой для реализации УХУ в России является развитая на территории страны газотранспортная система, которая частично может быть использована при реализации технологических цепочек. Системообразующая роль нефтегазовой отрасли определяет набор накопленных компетенций по обращению с углекислым газом на всех этапах технологической цепочки, за исключением этапа улавливания, а также наличие потенциального спроса на углекислый газ со стороны нефтегазовых компаний. Доминирующая роль ископаемых видов топлива, традиционный характер промышленных отраслей повышают степень заинтересованности в таких решениях, которые способны отвечать принципам низкоуглеродной политики без существенных изменений в промышленных и энергетических процессах.

Нами обобщена оценка базовых организационно-экономических предпосылок развития инициатив и проектов УХУ в России (табл.).

Вместе с тем необходимо отметить, что таких базовых предпосылок общего характера недостаточно для развития технологических цепочек УХУ в условиях России. Для того чтобы такие проекты смогли внести реальный вклад в снижение выбросов ПГ, необходимы технологии, стимулы и особые условия, позволяющие обеспечить их экономическую жизнеспособность. Развитие УХУ в национальном масштабе будет зависеть от ряда управляемых стратегических факторов, которые будут обсуждены далее.

Оценка базовых предпосылок для развития УХУ в России
(составлено автором)

Параметр	Значение	Направление развития
Существенные объёмы выбросов ПГ (2,1–2,2 млрд т CO ₂ -экв. на 2020–2021 гг., из них энергетический сектор – 78 %, промышленность – 12 %)	Определяют высокую степень заинтересованности в решениях по сокращению / предотвращению выбросов ПГ, в том числе в части УХУ	Необходимо создание национальной базы крупных эмитентов CO ₂ с соответствующей классификацией источников выбросов по категориям, а также совершенствование механизмов инвентаризации объёмов выбросов ПГ в субъектах РФ
Большие объёмы доступных для размещения CO ₂ хранилищ – до 4,6 Гт CO ₂ (Госкомиссия по запасам полезных ископаемых)	Определяют благоприятные потенциальные условия для реализации УХУ с точки зрения обеспечения долгосрочного хранения углекислого газа под землёй	Необходимо проведение комплекса масштабных дорогостоящих работ по изучению потенциальных хранилищ, а также создание национальной базы месторождений на поздних стадиях / истощённых, подходящих для долгосрочного хранения CO ₂
Традиционный характер энергетических и промышленных мощностей	Определяет высокую степень заинтересованности в решениях по снижению выбросов ПГ, доступных для внедрения без ущерба для их основной деятельности	Необходимо развитие организационно-экономических основ формирования технологических цепочек с участием компаний-эмитентов, потребителей и операторов, транспортных и сервисных структур, а также разработка механизмов для интеграции УХУ в действующие и новые производства, энергетические объекты и выстраивания межотраслевых взаимодействий в реальном секторе экономики
Доминирующая роль ископаемых видов топлива в экономике	Определяет высокую степень заинтересованности в решениях по снижению выбросов ПГ, позволяющих «продлить жизнь» традиционным источникам энергии	
Развитая нефтегазовая отрасль	Определяет набор существующих компетенций по обращению с углекислым газом на всех этапах (за исключением улавливания), а также потенциальный спрос на CO ₂ со стороны нефтегазовых компаний и доступ к необходимой инфраструктуре	Необходимо выстраивание технологических цепочек УХУ при участии / на базе нефтегазовых компаний и производств с развитием и совершенствованием форм реализации технологической цепочки и договорных отношений

Стратегические факторы, определяющие будущее развитие УХУ в России

Степень распространённости технологий улавливания и хранения углерода в промышленном и энергетическом секторах в будущем крайне не определена. Перспективы развития и масштабирования УХУ во всех странах, в том числе и в России, зависят от множества факторов, включая уровень развития и, как следствие, стоимость технологий, наличие трубопроводных сетей и мощностей для хранения углекислого газа, проводимой государственной политики на разных уровнях, а также от уровня развития других технологий «чистой» энергии, которые могут повлиять на спрос на УХУ.

Вместе с тем можно обозначить те основные стратегические факторы, которые определяют будущее развитие УХУ в России (рис. 3). При этом можно говорить о зарождении и развитии целой отрасли УХУ как совокупности предприятий, участвующих в реализации всей технологической цепочки.



Рис. 3. Стратегические факторы, определяющие развитие УХУ в России (составлено автором)

Стоимость улавливания углекислого газа

До 75 % стоимости всей технологической цепочки УХУ приходится на улавливание углекислого газа. Снижение затрат на данном этапе является важным фактором внедрения УХУ в будущем и будет напрямую влиять на решения, которые компании будут готовы принимать в части использования этой технологии. Снижение затрат на улавливание может произойти по двум основным причинам: 1) как результат накопления опыта (эффект обучаемости и накопления опыта); 2) в результате исследований и разработок по поиску более дешёвых способов улавливания.

Можно предположить, что самые первые мощности улавливания углекислого газа в России будут самыми дорогими. По мере того как всё больше установок будет проектироваться и вводиться в работу, затраты будут снижаться, поскольку опыт первых (в том числе пилотных, демонстрационных) проектов обеспечивает следующие объекты знаниями о том, как улучшить все процессы – от концепции до вывода мощностей улавливания на полную мощность. Эта тенденция уже сегодня проявляется в мировом масштабе. В качестве примера можно привести снижение затрат на улавливание на угольных электростанциях – в 2014 г. такие затраты на объекте “Boundary Dam” (Канада) составляли порядка 105 долл./т CO₂ (в ценах 2020 г.), тогда как на объекте “Petra Nova” (США) к 2017 г. снизились до уровня 70 долл./т CO₂ (в ценах 2020 г.).

В целом, в России существует ряд наработок по различным решениям в области улавливания, но многие технологии требуют соответствующей доработки и развития [17]. Технологии не используются в промышленных масштабах, не масштабированы и энергозатратны. Главная цель с этой точки зрения – совершенствование известных решений и обеспечение их применения в промышленных масштабах, что

станет возможным в том числе благодаря повышению их энергоэффективности. Для активизации в области УХУ в промышленном секторе России критически необходимо развитие данного направления.

Транспортная инфраструктура

Очевидно, что транспортная инфраструктура является неотъемлемой частью функционирования всей технологической цепочки, так как связывает источник CO₂ с местами его использования/хранения. Самым вероятным способом транспортировки газа в условиях России является трубопровод. Инвестиции, необходимые для создания сети транспортировки CO₂, согласно мировому опыту, оцениваются в несколько миллиардов долларов для регионального уровня и в несколько сотен миллиардов долларов для национального ¹⁴. Так как строительство трубопроводов зачастую связано с большим объёмом капитальных затрат, стоимость является ключевым фактором, определяющим объём мощностей, которые могут быть введены в эксплуатацию в перспективе. При моделировании транспортных сетей в России следует учитывать положения, представленные ниже:

1. Необходимо фокусироваться на тех регионах, где технологические цепочки УХУ потенциально могут масштабироваться и существует возможность последующего введения в эксплуатацию дополнительных объектов улавливания газа с минимальными затратами. В некоторых исследованиях подтверждается целесообразность создания избыточных транспортных мощностей, которые со временем будут полностью задействованы по мере ввода в эксплуатацию дополнительных объектов улавливания газа [18].

2. Следует оценивать стоимость строительства новых трубопроводных сетей, а не перепрофилирования существующих, так как пригодность существующих для транспортировки углекислого газа всё ещё ставится под сомнение и изучается во всём мире.

По общим оценкам экспертов, стоимость строительства трубопровода в России составляет до 1 млн долл./км [17]. Проведённые автором исследования показали, что стоимость строительства трубопровода в России может быть конкурентоспособной и составляет порядка 10–50 млн руб./км для разных мощностей и условий.

Инфраструктура хранения

Как было отмечено ранее, Россия обладает огромным потенциалом хранения CO₂, и данный аспект рассматривается как серьёзная благоприятная предпосылка для развития УХУ в стране. В России уже сегодня разрабатываются первые нормативно-правовые документы, регламентирующие вопросы хранения углекислого газа. В 2023 г. в России был утверждён проект Методических рекомендаций по обоснованию пригодности участков недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых, с целью размещения углекислого газа ¹⁵.

Этот документ устанавливает «единые для Российской Федерации принципы выбора, геологического изучения и обоснования возможности использования участков

¹⁴ Carbon Capture and Storage in the United States: Report // Congressional Budget Office. 2023. – 31 p. URL: <https://www.cbo.gov/system/files/2023-12/59345-carboncapture-storage.pdf> (дата обращения: 05.06.2024).

¹⁵ Методические рекомендации по обоснованию пригодности участков недр для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых, с целью размещения углекислого газа // Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых: официальный сайт. – 2023. – 17 с. URL: https://gkz-rf.ru/sites/default/files/docs/mr_po_vyboru_uchastkov_so2.pdf?ysclid=ls1vp2p8ea789587638 (дата обращения: 01.03.2024).

недр для целей, не связанных с добычей полезных ископаемых, при размещении в пластах горных пород углекислого газа, с учётом природоохранных и других ограничений в соответствии с действующим законодательством». С 2022 г. в России действует отдельная лицензия на строительство и эксплуатацию подземных сооружений для размещения углекислого газа (ПСРУГ). Геологическое изучение участка недр и оценка его пригодности для строительства и эксплуатации ПСРУГ также разрешены в рамках лицензий на разведку и добычу полезных ископаемых или совмещённых лицензий на геологическое изучение, разведку и добычу полезных ископаемых. С 2024 г. уже введена возможность строительства и эксплуатации ПСРУГ в рамках упомянутых лицензий.

С практической точки зрения наиболее перспективными и понятными для целей долгосрочного хранения газа в России являются уже существующие подземные хранилища газа (ПХГ), которые в будущем могут быть перепрофилированы, и выработанные месторождения углеводородов [19].

Вместе с тем для более точной оценки пригодности и ёмкости потенциальных хранилищ необходимо проведение серьёзного комплекса трудоёмких и дорогостоящих работ. Оценки касательно примерной стоимости такого хранения и обеспечения перманентного мониторинга также будут зависеть от степени изученности и наличия соответствующей разноплановой информации по определённым хранилищам. Для развития данного направления необходимы специальные государственные программы. Глубокому изучению должны подвергаться как потенциальные хранилища, так и сам процесс секвестрации больших объёмов углекислого газа под землёй с последующей оценкой его безопасности и стоимости.

На сегодня, по оценке Госкомиссии по запасам полезных ископаемых, срок от начальных этапов (скрининг потенциальных участков недр) до получения разрешения на закачку и запуск проекта в рамках его жизненного цикла составляет примерно 3–5 лет – без стадии опытно-промышленной эксплуатации (ОПЭ) и 6–8 лет – с ОПЭ.

Государственное регулирование

Государственное регулирование является базовым условием для развития УХУ, что подтверждается мировым опытом. В перспективе всё будет зависеть от того, насколько направление УХУ будет признано на государственном уровне, какие решения на данном уровне будут приняты. Всё это может достаточно серьёзно сдерживать или ускорять развитие комплекса технологий. В Стратегии с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 г. также отмечается, что развитие технологий УХУ «требует дополнительных стимулирующих мер со стороны государств и институтов развития»¹⁶.

Помимо упомянутой выше Стратегии, в 2021 г. в России вышел Федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов», который «определяет основы правового регулирования отношений в сфере хозяйственной и иной деятельности, которая сопровождается выбросами парниковых газов и осуществляется на территории Российской Федерации, а также на континентальном шельфе, в исключительной экономической зоне Российской Федерации, российском секторе Каспийского моря»¹⁷. В 2022 г. был принят Федеральный закон «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федера-

¹⁶ Об утверждении Стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.

¹⁷ Об ограничении выбросов парниковых газов: ФЗ РФ от 02.07.2021 № 296-ФЗ. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202107020031> (дата обращения: 18.06.2024).

ции»¹⁸, в котором обозначены основы проведения эксперимента по квотированию выбросов ПГ на территории Сахалинской области.

Вместе с тем упомянутые нормативно-правовые документы носят общий характер. В части УХУ специфические меры регулирования, институты поддержки развития технологий отсутствуют. В мировой практике чаще всего отмечаются смешанные формы регулирования на национальном и региональном уровнях, а также применение различных мер поддержки в комплексе для создания институциональной среды, способствующей развитию технологических цепочек УХУ.

На развитие УХУ в будущем также могут влиять и другие факторы. Например, альтернативные технологии декарбонизации (низкоуглеродные источники энергии, прорывные решения в области повышения энергоэффективности и прочее) могут «затормозить» их развитие, но для условий России данный сценарий рассматривается автором как маловероятный. С другой стороны, если будет активизирована деятельность в области изучения геологических хранилищ и их соответствующей сертификации, будут развиваться известные и открываться всё новые способы улавливания и полезного использования углекислого газа, степень развития и внедрения УХУ в реальном секторе экономики России может быть значительной.

В качестве примера можно привести возможности использования уловленного углекислого газа для производства строительных материалов, в частности его использование в качестве отвердителя для бетона. Данный пример может рассматриваться как альтернативный способ секвестрирования (не геологического) – хранение CO₂ в отвердевшей массе. Этот тип секвестрации и другие способы использования углекислого газа при соответствующем развитии технологических решений будут связаны с возможностью получения дополнительного дохода, способного компенсировать часть затрат на УХУ.

Заключение

Среди различных направлений и технологий, нацеленных на сокращение выбросов ПГ в атмосферу, особое место для условий России могут занять решения по улавливанию и хранению углерода. Именно они могут быть внедрены на промышленных и энергетических объектах без существенной модернизации действующих систем. В условиях доминирующей роли ископаемых видов топлива в экономике и энергетике России данный аргумент может выступать как критически значимый. На сегодня технологические цепочки УХУ рассматриваются как одни из ключевых для декарбонизации энергоёмких отраслей промышленности, снижение выбросов в которых при движении к углеродной нейтральности на мировом уровне признаётся приоритетной задачей¹⁹.

Россия обладает рядом благоприятных предпосылок для внедрения технологических цепочек УХУ, что подтверждается национальной статистикой по выбросам ПГ в атмосферу, оценками различных организаций в части потенциальной ёмкости подземных хранилищ для размещения углекислого газа, развитой газотранспортной

¹⁸ О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации: Федеральный закон РФ от 06.03.2022 № 34-ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_411051/ (дата обращения: 18.06.2024).

¹⁹ Технологический обзор «Углеродно-нейтральные энергоёмкие отрасли промышленности» / UNECE.

системой и другими факторами. Развитие и масштабирование УХУ в промышленном секторе необходимо осуществлять с учётом национальных интересов и приоритетов. Первые технологические цепочки УХУ целесообразно формировать на территориях, приближённых к крупным промышленным объектам, нефтегазовым месторождениям, а также вблизи развитой инфраструктуры. На начальных этапах развития УХУ в России следует ориентироваться на возможности использования углекислого газа для повышения нефтеотдачи (CO₂-EOR) для компенсации части затрат на весь комплекс технологий.

Перспективы развития УХУ как в мире, так и в России являются крайне неопределёнными. Они зависят от множества факторов, включая уровень развития технологий, наличие мощностей для хранения углекислого газа, проводимой государственной политики на разных уровнях, а также от степени интеграции различных стран в решение климатических задач, развития других низкоуглеродных технологий. В рамках общей оценки перспектив развития УХУ в России можно обозначить четыре группы управляемых стратегических факторов, которые определяют их будущее развитие, – это стоимость улавливания углекислого газа, уровень развития транспортной инфраструктуры и инфраструктуры хранения, государственная политика в данной области. Все эти факторы, в конечном счёте, будут определять перспективы реализации цепочек улавливания и хранения углерода в промышленном секторе России. Очевидно, что факторы являются зависимыми – например, государственная политика в данной области будет существенно влиять на все остальные группы. В России уровень развития УХУ и степень их внедрения в промышленности во многом будут зависеть от государства.

С учётом высокого уровня затрат на УХУ, наиболее жизнеспособными в мире являются проекты с использованием решений CO₂-EOR. Однако основной доступный на сегодня финансовый стимул в виде доходов от дополнительной добычи и реализации нефти также будет «работать» только при наличии государственной поддержки компаний-операторов. В этой связи можно заключить, что развитие УХУ в России целесообразно начать с выстраивания технологических цепочек на базе или при участии крупных нефтегазовых компаний с максимально возможной реализацией решений CO₂-EOR и использованием доступных мер государственной поддержки, когда это станет применимо.

Активное финансирование инициатив и проектов УХУ на всех стадиях как в мире, так и в России будет постепенно приводить к снижению уровня затрат. В долгосрочной перспективе, когда такие технологии и решения будут масштабироваться, реализация УХУ может привести к повышению устойчивости компаний-участников, модернизации энергетики и промышленности, возникновению новых производств и рабочих мест, дополнительным общественным эффектам и пр., что представляется важным для экономики и общества в целом. Вместе с тем в настоящее время это требует больших вложений как государственных средств, так и частных.

В России уже сегодня предпринимаются попытки разработки общей нормативной правовой базы, однако точечные механизмы развития и инструменты поддержки УХУ отсутствуют. Комплексный подход к формированию соответствующей институциональной среды для планомерного развития данного направления является наиболее эффективным решением.

Список литературы

1. *Pacala, S.* Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies / Pacala S., Socolow R. // *Science*. – 2004. – Vol. 305 (5686). – P. 968–972. DOI: 10.1126/science.1100103.
2. *Budinis, S.* An assessment of CCS costs, barriers and potential / Budinis S., Krevor S., Mac Dowell N., Brandon N., Hawkes A. // *Energy strategy reviews*. – 2018. – Vol. 22. – P. 61–81. DOI: 10.1016/j.esr.2018.08.003.
3. *Herzog, H.* Financing CCS Demonstration Projects: Lessons Learned from Two Decades of Experience / Herzog H. // *Energy Procedia*. – 2017. – V. 114. – P. 5691–5700.
4. *Chen, W.* A Comparison of Incentive Policies for the Optimal Layout of CCUS Clusters in China's Coal-Fired Power Plants Toward Carbon Neutrality / Chen W., Lu X., Lei Y. // *Engineering*. – 2021. – V. 7. – P. 1692–1695.
5. *Wang, X.* Research on CCUS business model and policy incentives for coal-fired power plants in China / Wang X., Tang R., Meng M. // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2023. – V. 125. P. 103871
6. *Порфирьев, Б. Н.* Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов: сценарии и реалии для России / Б. Н. Порфирьев, А. А. Широков // *Вестник Российской академии наук*. – 2022. – Т. 92, № 5. – С. 415–423. DOI: 10.31857/S086958732205005X.
7. *Юлкин, М. А.* Глобальная декарбонизация и её влияние на экономику России / М. А. Юлкин // АНО «Центр экологических инвестиций». – 2023. URL: http://downloads.igce.ru/news/Yulkin_M_A_ext_abstract_IGCE_06022019.pdf (дата обращения: 16.03.2023).
8. *Башмаков, И. А.* Стратегия низкоуглеродного развития российской экономики / И. А. Башмаков // *Вопросы экономики*. – 2020. – Т. 7. – С. 51–74. DOI: 10.32609/0042-8736-2020-7-51-74.
9. *Сафонон, Г.* Декарбонизация мировой экономики и Россия / Г. Сафонон // *Нефтегазовая вертикаль*. – 2020. – № 21-22. – С. 66–70.
10. *Ветрова, М. А.* Стратегии развития российской энергетики в условиях климатических вызовов и геополитической нестабильности / М. А. Ветрова, Н. В. Пахомова, К. К. Рихтер // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*. – 2023. – Т. 39, № 4. – С. 439–469. DOI 10.21638/spbu05.2023.401.
11. *Кудрявцева, О. В.* Индикаторы перехода России к низкоуглеродному развитию / О. В. Кудрявцева, К. С. Ситкина, А. В. Барабошкина // *География и природные ресурсы*. – 2023. – Т. 44, № 3. – С. 144–155. DOI 10.15372/GIPR20230315.
12. *Скобелев, Д. О.* Технологии секвестрации углекислого газа: роль в достижении углеродной нейтральности и подходы к оценке затрат / Д. О. Скобелев, А. А. Череповицына, Т. В. Гусева // *Записки Горного института*. – 2023. – Т. 259. – С. 125–140. DOI: 10.31897/PMI.2023.10.
13. *Tsvetkov, P.* Public perception of carbon capture and storage: A state-of-the-art overview / Tsvetkov P., Cherepovitsyn A., Fedoseev S. // *Heliyon*. – 2019. – Vol. 5. – Is. 12: e02845. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02845.
14. *Сидорова, К. И.* Разработка технико-экономической модели улавливания CO₂ для энергетического сектора / К. И. Сидорова // *Экология и промышленность России*. – 2014. – № 12. – С. 20–25. DOI: 10.18412/1816-0395-2014-12-20-25.

15. Сидорова, К. И. Оценка возможностей захоронения углекислого газа в геологических резервуарах / К. И. Сидорова, А. Е. Череповицын // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2013. – Т. 8, № 4. – С. 5. DOI: 10.17353/2070-5379/47_2013.

16. Череповицын, А. Е. Оценка перспектив внедрения технологий секвестрации CO₂ / А. Е. Череповицын, Ю. Н. Васильев, А. Ю. Цветкова // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2018. – № 2. – С. 86–89.

17. Bazhenov, S. Technical and economic prospects of CCUS projects in Russia / Bazhenov S., Chubokсарov V., Maximov A., Zhdaneev O. // Sustainable Materials and Technologies. – 2022. – Vol. 33: e00452. DOI: 10.1016/j.susmat.2022.e00452.

18. Abramson, E. Transport Infrastructure for Carbon Capture and Storage. Whitepaper on Regional Infrastructure for Midcentury Decarbonization / E. Abramson, D. McFarlane, J. Brown // Great Plains Institute. – 2020. – 41 p. – URL: https://www.betterenergy.org/wp-content/uploads/2020/06/GPI_RegionalCO2Whitepaper.pdf (дата обращения: 01.03.2024).

19. Новиков, Д. А. Региональный прогноз перспектив реализации проектов CCUS на территории Российской Федерации / Д. А. Новиков, [и др.] // Материалы XVIII международной научной конференции Интерэкспо ГЕО-Сибирь – "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология", 18–20 мая 2022 г., Новосибирск. – Новосибирск: СГУГиТ. – 2022. – Т. 2, № 1. – С. 248–255.

References

1. Pacala S., Socolow R. (2004) Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies. *Science*, 305(5686), pp. 968–972. DOI: 10.1126/science.1100103.

2. Budinis S., Krevor S., Mac Dowell N., Brandon N., Hawkes A. (2018) An Assessment of Ccs Costs, Barriers and Potential. *Energy Strategy Reviews*, 22, pp. 61–81. DOI: 10.1016/j.esr.2018.08.003.

3. Herzog H. (2017) Financing CCS Demonstration Projects: Lessons Learned from Two Decades of Experience. *Energy Procedia*, 114, pp. 5691–5700.

4. Chen W., Lu X., Lei Y. (2021) A Comparison of Incentive Policies for the Optimal Layout of CCUS Clusters in China's Coal-Fired Power Plants Toward Carbon Neutrality. *Engineering*, 7, pp. 1692–1695.

5. Wang X., Tang R., Meng M. (2023) Research on CCUS Business Model and Policy Incentives for Coal-Fired Power Plants in China. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. V. 125. P. 103871.

6. Porfiryev B. N., Shirov A. A. (2022) Strategii sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya s nizkim urovnem vybrosov parnikovyykh gazov: stsenarii i realii dlya Rossii [Strategies for Low Greenhouse Gas Emission Socio-Economic Development: Scenarios and Realities for Russia]. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 92(5), pp. 415–423. DOI: 10.31857/S086958732205005X.

7. Yulkin M. A. (2023) Global'naya dekarbonizatsiya i yeyo vliyaniye na ekonomiku Rossii [Global Decarbonisation and Its Impact on the Russian Economy]. ANO «Tsentr ekologicheskikh investitsiy». URL: http://downloads.igce.ru/news/Yulkin_M_A_ext_abstract_IGCE_06022019.pdf (Access date: 16.03.2023).

8. Bashmakov I. A. (2020) Strategiya nizkouglerodnogo razvitiya rossiyskoy ekonomiki [Low-Carbon Strategy for the Russian Economy]. *Questions of Economics*, 7. pp 51–74. DOI: 10.32609/0042-8736-2020-7-51-74.

9. Safonov G. (2020) Dekarbonizatsiya mirovoy ekonomiki i Rossiya [Decarbonisation of the Global Economy and Russia]. *Oil and Gas Vertical*, 21-22, pp. 66–70.

10. Vetrova M. A., Pakhomova N. V., Rikhter K. K. (2023) Strategii razvitiya rossiyskoy energetiki v usloviyakh klimaticheskikh vyzovov i geopoliticheskoy nestabil'nosti [Strategies for Russian Energy Sector Development in the Context of Climate Challenges and Geopolitical Instability]. *St Petersburg University Journal of Economic Studies*, 39(4), pp. 439–469. DOI 10.21638/spbu05.2023.401.

11. Kudryavtseva O. V., Sitkina K. S., Baraboshkina A. V. (2023) Indikatory perekhoda Rossii k nizkouglerodnomu razvitiyu [Indicators of Russia's Transition to Low-Carbon Development]. *Geography and Natural Resources*, 44(3), pp. 144–155. DOI 10.15372/GIPR20230315.

12. Skobelev D. O., Cherepovitsyna A. A., Guseva T. V. (2023) Tekhnologii sekvestratsii uglekislogo gaza: rol' v dostizhenii uglerodnoy neytral'nosti i podkhody k otsenke zatrat [Carbon Dioxide Sequestration Technologies: Role in Achieving Carbon Neutrality and Approaches to Cost Estimation]. *Journal of Mining Institute*, 259, pp. 125–140. DOI: 10.31897/PMI.2023.10.

13. Tsvetkov P., Cherepovitsyn A., Fedoseev S. (2019) Public Perception of Carbon Capture and Storage: A State-Of-The-Art Overview. *Heliyon*, 5(12), e02845. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02845.

14. Sidorova K. I. (2014) Razrabotka tekhniko-ekonomicheskoy modeli ulavlivaniya CO₂ dlya nergeticheskogo sektora [Development of a Techno-Economic Model of CO₂ Capture for the Energy Sector]. *Ecology and Industry of Russia*, 12. pp. 20–25. DOI: 10.18412/1816-0395-2014-12-20-25.

15. Sidorova K. I., Cherepovitsyn A. E. (2013) Otsenka vozmozhnostey zakhroneniya uglekislogo gaza v geologicheskikh rezervuarakh [Assessment of Possibilities of Carbon Dioxide Burial in Geological Reservoirs]. *Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*, 8(4), p. 5. DOI:10.17353/2070-5379/47_2013.

16. Cherepovitsyn A. E., Vasiliev Y. N., Tsvetkova A. Y. (2018) Otsenka perspektiv vnedreniya tekhnologiy sekvestratsii CO₂ [Assessment of Prospects for the Implementation of CO₂ Sequestration Technologies]. *RISK: Resources, Information, Supply, Competition*, 2, pp. 86–89.

17. Bazhenov S., Chubokсарov V., Maximov A., Zhdaneev O. (2022) Technical and economic prospects of CCUS projects in Russia. *Sustainable Materials and Technologies*, 33, e00452. DOI: 10.1016/j.susmat.2022.e00452.

18. Abramson E., McFarlane D., Brown J. (2020) Transport Infrastructure for Carbon Capture and Storage. *Whitepaper on Regional Infrastructure for Midcentury Decarbonization*. Great Plains Institute, p. 41. URL: https://www.betterenergy.org/wp-content/uploads/2020/06/GPI_RegionalCO2Whitepaper.pdf (Access date: 01.03.2024).

19. Novikov D. A., et al. (2022) Regional'nyy prognoz perspektiv realizatsii proyektov CCUS na territorii Rossiyskoy Federatsii [Regional Outlook for the Prospects of CCUS Project Implementation in the Russian Federation]. In: *Materialy XVIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii Interkespo GEO-Sibir' – "Nedropol'zovaniye. Gornoye delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh. Ekonomika. Geoekologiya"* [Proceedings of the 18th international scientific conference Interexpo GEO-Siberia – "Subsoil use. Mining. Directions and technologies for prospecting, exploration and development of mineral deposits. Economy. Geoecology"]. Novosibirsk: Siberian State University of Geosystems and Technologies. Vol. 2, no. 1, pp. 248–255.

A. A. Cherepovitsyna²⁰. **Carbon Capture and Storage: a Conceptual Vision of Technology Chains' Development in Russia.** Reducing greenhouse gas (GHG) emissions in the context of addressing climate changes is becoming one of the main challenges for industry. One of the promising options is a set of technologies for carbon capture, utilization and storage (CCS), which is aimed at preventing GHG emissions already formed from entering the atmosphere. There are about 40 CCS projects in the world, while they are absent in Russia. The purpose of the study is to present a conceptual vision of the CCS technological chains' development in the industrial sector of Russia, taking into account the existing prerequisites, determining their future development strategic factors and problems of the implementation. The analysis of the world experience of CCS projects is presented, the advantages and problems of their implementation in the context of the general map of industrial decarbonization are defined. The basic prerequisites for technology implementation in Russia are identified, their essence and possible directions for development are defined. A set of strategic factors that will determine the future development of CCS in Russia is presented. The factors are of a controllable nature and form the basis for the functioning of CCS technological chain in industry. The conclusions concerning the prospects of development of this direction in Russia are formulated. The importance of the state regulation measures for the development of CCS technologies is outlined.

Keywords: capture and storage, carbon dioxide, carbon, technological chains, industry, Russia, prerequisites, strategic factors, CCS.

²⁰ *Alina A. Cherepovitsyna*, Head of the Laboratory, Senior researcher, Luzin Institute for Economic Studies, Kola Science Centre of the RAS, (24a, Fersmana st., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209), Ph.D. (Economics), Docent. e-mail: iljinovaaa@mail.ru