

*На правах рукописи*

**Цветков Павел Сергеевич**



**УГЛЕРОДНАЯ ЭКОНОМИКА ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА  
КАК ИНСТРУМЕНТ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Специальность 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика  
(экономика промышленности)*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора экономических наук**

Санкт-Петербург - 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

**Научный консультант:**

доктор экономических наук, профессор

*Череповицын Алексей Евгеньевич*

**Официальные оппоненты:**

*Бобылев Сергей Николаевич*

доктор экономических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра экономики устойчивого развития и природопользования, заведующий кафедрой;

*Ильинский Александр Алексеевич*

доктор экономических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Высшая школа производственного менеджмента, профессор;

*Потравный Иван Михайлович*

доктор экономических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова», базовая кафедра «Управление проектами и программами Капитал Групп», профессор.

**Ведущая организация** – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный экономический университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **10 июня 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.1 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 10 марта 2026 г.

УЧЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВ  
Юрий Николаевич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** Повсеместное экстенсивное использование сырьевых ресурсов, распространение практик нерационального обращения с отходами, а также производства и потребления промышленной продукции привело к усилению антропогенного воздействия на окружающую среду. Результаты этого нашли отражение и были обобщены в рамках концепции 9 планетарных границ, 6 из которых по данным 2023 года уже были нарушены, включая границы климатической системы.

Предотвращение дальнейшего нарушения границ климатической системы связывается большинством исследователей с необходимостью сокращения выбросов парниковых газов (ПГ), основным из которых, с точки зрения общей массы, считается CO<sub>2</sub>. Тем не менее результаты, изложенные в глобальном анализе (статья 14 Парижского соглашения), представленном на 28-й Конференции Сторон, показали невозможность необходимого к 2035 году сокращения выбросов на 60% по отношению к 2019 году (54 млрд т CO<sub>2</sub>e), а к 2050 г. на 84% только за счет мер, реализуемых в настоящее время.

Решение проблемы резкого сокращения выбросов уже к 2030 году потребует кратного роста климатических инвестиций, ежегодная потребность в которых составит более 7 млрд долл. США, расширения углеродных рынков, емкость которых может превысить 30 млрд долл. США, а также развития новых, еще недостаточно апробированных в производственных условиях технологий сокращения выбросов.

Необходимость развития новых технологий определяется тем, что практика масштабирования возобновляемой энергетики (ВИЭ), успешная в отдельных странах, может являться менее эффективной для таких стран, как Россия, обладающих развитыми углеродоемкими промышленными комплексами, включая металлургию, цементную отрасль, топливно-энергетический комплекс и др. При этом, являясь одним из крупнейших мировых эмитентов CO<sub>2</sub>, Россия не может игнорировать актуальность проблемы сокращения выбросов.

С учетом роли России в глобальной экономике и в формировании выбросов CO<sub>2</sub> в 2019 году было ратифицировано Парижское соглашение. Это позволило ускорить разработку основополагающих

нормативных правовых актов, определяющих ориентиры, стратегии и механизмы низкоуглеродного развития национальной экономики и промышленного сектора в частности. Ядром национального подхода являются лесоклиматические проекты, тогда как технологическим проектам сокращения выбросов в промышленности, наряду с развитием ВИЭ, отводится второстепенная роль, что нашло отражение, например, в энергетической стратегии Российской Федерации до 2050 года.

Среди технологий сокращения выбросов существует ряд недостаточно изученных альтернатив, таких как утилизация CO<sub>2</sub> с его преобразованием в различные продукты (CCU). Подобные технологии на стыке концепций низкоуглеродного развития и экономики замкнутого цикла могут способствовать не только сокращению выбросов CO<sub>2</sub>, но также созданию новых моделей и механизмов устойчивого функционирования промышленного производства, например, за счет повышения ресурсоэффективности предприятий, создания новых внутри- и межотраслевых производственно-логистических цепочек, а также повышения эффективности потребления природных ресурсов.

**Степень разработанности темы исследования.** Внимание к вопросам экологизации человеческой деятельности стало повышаться с середины прошлого века и практически сразу она ассоциировалась с проблемой истощаемости природных ресурсов. Результатом этого стало формирование множества системообразующих эколого-экономических направлений исследований, особое место среди которых занимает концепция устойчивого развития, глобально признанная в 1992 году, одним из важнейших элементов которой является концепция низкоуглеродного развития (НУР).

Изучением технологий и механизмов низкоуглеродного развития промышленности занимались И.А. Башмаков, Н.И. Диденко, О.В. Жданев, А.Е. Закондырин, А.Л. Иванников, В.Ю. Поташников, Г.А. Стройков, А.Е. Череповицын, А.А. Череповицына, Я.Э. Шклярский и др.

Проблемами устойчивого развития в целом и эколого-сбалансированного развития экономической деятельности в частности занимались С.А. Агарков, А.Г. Бездудная, С.Н. Бобылев, К.Б. Герасимов,

Т.В. Гусева, П. Дасгупта, П.В. Дружинин, В.С. Жаров, С.В. Жуков, М.В. Иванова, В.Л. Квинт, А.А. Макаров, Д. Медоуз, Н.В. Пахомова, И.М. Потравный, М.А. Пашкевич, М.Г. Трейман, К. Ричардсон, Дж. Рокстрём, Д.О. Скобелев, Д.Ф. Скрипнюк, И.В. Филимонова, В.В. Юрак и др.

Вопросы, связанные с сокращением выбросов ПГ, а также с исследованием влияния климатических изменений на мировую экономику и промышленные сектора изучали В.П. Ануфриев, В.И. Данилов-Данильян, И.А. Макаров, У. Нордхаус, Б.Н. Порфирьев, Г.В. Сафонов, Н. Штерн, М.А. Юлкин и др.

Существенный вклад в формирование теоретических основ экономики природопользования и развитие концептуальных положений экологической экономики внесли К. Боулдинг, Е.Н. Быкова, В.И. Вернадский, Х. Дейли, Н. Джорджеску-Ройген, Р. Костанца, Р. Коуз, С. Кузнец, А. Пигу, Дж. Стиглиц и др.

Проблемами устойчивого развития минерально-сырьевого и топливно-энергетического комплекса, а также государственного регулирования недропользования занимались В.М. Васильцова, Д.М. Дмитриева, А.В. Душин, Ю.Л. Жуковский, А.А. Ильинский, В.А. Крюков, В.С. Литвиненко, Ф.Д. Ларичкин, Е.Р. Магарил, В.А. Маслобоев, Л.А. Мочалова, М.А. Невская, Г.Ю. Пешкова, Т.В. Пономаренко, А.М. Фадеев, С.В. Федосеев и др.

Несмотря на значительное количество выполненных исследований, многие методологические и методические аспекты управления выбросами ПГ требуют детализации и уточнения. Так, на концептуально-методологическом уровне наблюдается подмена понятия «низкоуглеродное развитие» на «развитие возобновляемой энергетики», что влечет за собой дисбаланс механизмов и инструментов реализуемой сегодня климатической политики.

На инструментально-методическом уровне, несмотря на активно развивающуюся методологию анализа жизненных циклов, наблюдается нехватка исследований цепочек формирования стоимости в рамках высокотехнологичных производств низкоуглеродной ориентации.

Многие авторы игнорируют необходимость диверсификации низкоуглеродных технологий, фокусируясь на ВИЭ, которые не позволяют решить проблемы сокращения выбросов в ряде отраслей тяжелой промышленности, таких как металлургия, производство цемента, химическая промышленность и пр.

Вышеперечисленное свидетельствует об актуальности проблемы совершенствования механизмов сокращения выбросов CO<sub>2</sub> в промышленности, а также определяет направление и цель данного диссертационного исследования.

**Объект исследования:** промышленные объекты, формирующие отрасль секвестрации углекислого газа, создание которой обеспечивает диверсификацию механизмов НУР.

**Предмет исследования:** экономические и управленческие отношения, возникающие в рамках процессов улавливания, транспортировки и утилизации промышленного CO<sub>2</sub>.

**Цель работы** – разработка научных основ углеродной экономики замкнутого цикла, способствующих достижению целей устойчивого развития экономики промышленных отраслей.

**Идея исследования.** Для достижения поставленной цели необходим переход от принципа регулирования выбросов CO<sub>2</sub> к принципу управления ими на основе совершенствования методологии низкоуглеродного развития, ядром которой является углеродная экономика замкнутого цикла (УЭЗЦ), что создаст предпосылки для структурных изменений в промышленных отраслях.

**Задачи исследования:**

1. Осуществить синтез концепций НУР и экономики замкнутого цикла (ЭЗЦ) в контексте достижения целей устойчивого развития промышленности.

2. Обобщить теоретические основы, структурировать методологическое обеспечение, систематизировать предпосылки формирования и методические особенности концепции УЭЗЦ, способствующей НУР промышленности.

3. Выявить отраслевые, пространственные и временные закономерности, связанные с динамикой и структурой промышленных выбросов CO<sub>2</sub> на макро- и мезоэкономическом уровне, а также их взаимосвязи с производством и потреблением различных видов энергии.

4. Систематизировать информацию о барьерах и перспективах развития технологий и проектов сокращения выбросов CO<sub>2</sub> в углеродоемких отраслях промышленности.

5. Обосновать теоретические положения концепции углеродного метаболизма и ее роль в управлении промышленными выбросами CO<sub>2</sub>.

6. Обосновать формирование межотраслевого комплекса секвестрации CO<sub>2</sub> и его структуру, оценить потенциал и выявить барьеры развития.

7. Оценить экономический эффект использования кластерного подхода при организации процесса улавливания CO<sub>2</sub> от промышленных стационарных источников.

8. Выполнить анализ технологической, экономической и организационной специфики проектов улавливания и утилизации CO<sub>2</sub> с учетом имеющихся пробелов в научных знаниях об их характеристиках и перспективах развития.

9. Разработать методический подход к сравнительной многокритериальной оценке продуктов переработки углекислого газа (ППУ), произведенных в рамках технологических цепочек ССУ.

#### **Научная новизна исследования**

1. Разработаны теоретико-методологические положения углеродной экономики замкнутого цикла, направленной на переход к моделям организации промышленной деятельности с низким уровнем выбросов ПГ без необходимости полного отказа от углеродоемких технологий.

2. Предложен концептуальный подход к анализу эффектов от выбросов CO<sub>2</sub> с точки зрения возможности формирования ими положительных экстерналий, при условии реализации технологических цепочек улавливания и утилизации CO<sub>2</sub>.

3. Выявлены проблемы сокращения выбросов ПГ в разных отраслях промышленности, а также барьеры развития ключевых технологий, составляющих основу текущих стратегий НУР.

4. Установлена зависимость между динамикой промышленных выбросов ПГ и национальными показателями экономического

развития на основе разработанных эконометрических моделей, в которых независимыми переменными выступают социально-экономические и производственные факторы.

5. Предложен механизм регулирования выбросов CO<sub>2</sub>, основанный на необходимости изменения принципов обращения с ними и переходе от цели повсеместного сокращения к цели их рационального использования.

6. Введена авторская трактовка понятия «углеродный метаболизм» и сформулированы концептуальные положения использования метаболического подхода при переходе от механизмов регулирования к механизмам управления выбросами CO<sub>2</sub>.

7. Разработан методический подход к оценке влияния эффектов масштаба и концентрации CO<sub>2</sub> в выбросах промышленных объектов на экономические показатели кластеров улавливания CO<sub>2</sub>.

8. Выявлены условия формирования отрасли секвестрации углекислого газа, интегрирующей предприятия химической промышленности, минерально-сырьевого и топливно-энергетического комплексов, а также прочие углеродоемкие производства.

9. Установлены преимущества использования метода анализа жизненного цикла низкоуглеродной продукции для изучения эффектов, создаваемых проектами секвестрации CO<sub>2</sub>, по сравнению с текущей практикой расчета эколого-экономических характеристик отдельно взятых процессов улавливания, транспортировки и/или утилизации.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономика промышленности) по пунктам: п. 2.11. «Формирование механизмов устойчивого развития экономики промышленных отраслей, комплексов, предприятий»; п. 2.15. «Структурные изменения в промышленности и управление ими».

**Теоретическая и методологическая значимость** результатов заключается в совершенствовании механизмов управления низкоуглеродным развитием промышленности за счет формулировки авторских положений углеродной экономики замкнутого цикла. Это

позволило устранить ряд пробелов в научных знаниях о механизмах устойчивого развития макро-, мезо- и микроэкономических структур.

Выделены закономерности, свидетельствующие о формировании отрасли секвестрации углекислого газа, усовершенствована терминология в данной сфере, предложены конкретные механизмы, модели и алгоритмы анализа и оценки проектов секвестрации CO<sub>2</sub>, в частности его утилизации, а также выявлены их особенности как объектов управления и регулирования.

**Практическая значимость работы:**

1. Выполнена оценка влияния производства и потребления различных видов энергетических ресурсов, проектов секвестрации CO<sub>2</sub>, а также показателей энергоэффективности на масштабы национальных выбросов парниковых газов в более чем 120 странах, что позволило доказать необходимость совершенствования текущих подходов к НУР.

2. Определены барьеры развития технологий предотвращения выбросов ПГ в энергетике, включая ВИЭ, производство и энергетическое использование водорода, а также повышение энергоэффективности, выявленные на основе авторских моделей и методических подходов.

3. Выполнена оценка взаимосвязи между показателями добавленной стоимости, формируемой отдельными секторами экономики России, в том числе промышленными отраслями, и масштабами выбросов ПГ соответствующих субъектов страны.

4. Предложены рекомендации по повышению эффективности мер регулирования и управления выбросами CO<sub>2</sub> в промышленности, предполагающие воздействие на рынки сбыта продуктов переработки углекислого газа, а также повышение гибкости действующих рыночных механизмов.

5. Разработан прогноз развития мощности проектов секвестрации CO<sub>2</sub>, показывающий значительный потенциал увеличения масштабов его улавливания и утилизации в ближайшие годы и возможность формирования на базе новых проектов отрасли секвестрации углекислого газа.

6. Разработана и апробирована методика поиска географических регионов концентрации промышленных объектов-эмитентов

СО<sub>2</sub>, перспективных с точки зрения организации кластеров улавливания, базирующаяся на плотностном алгоритме кластеризации пространственных данных с присутствием шума (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662463).

7. Предложена корректировка методики расчета приведенных затрат на производство энергии и улавливание СО<sub>2</sub>, предлагаемой международными аналитическими агентствами.

8. Разработана и апробирована экономико-математическая модель оценки экономического эффекта от использования кластерного подхода при реализации улавливания техногенного СО<sub>2</sub> на промышленных стационарных источниках (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025617009).

9. Разработана и апробирована методика многокритериальной оценки ППУ, и их последующего ранжирования в рамках сценарных условий, определяемых лицом, принимающим решение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663878).

10. Получены акты, подтверждающие внедрение результатов в деятельность ФГАУ «НИИ «ЦЭПП» (акт об использовании результатов от 05.09.2025 № 07-1/955), ФГБУ «ВНИИ Экология» (акт о применении результатов от 12.09.2025), ПАО «Газпром» (акт о внедрении результатов от 17.09.2025), ПАО «ОГК-2» (акт о внедрении результатов от 19.09.2025), АО «НЦ ВостНИИ» (акт об использовании от 29.09.2025), ПАО «Камаз» (акт о внедрении результатов от 29.09.2025), ФГАОУ ВО «СПбПУ» (акт о внедрении результатов от 25.09.2025), Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (акт о внедрении результатов от 08.09.2025), прошедшие экспертное рассмотрение на совещании Министерства энергетики Российской Федерации (Протокол от 23.12.2025 № ПС-311 пр).

**Методология и методы исследований.** Теоретической базой диссертационного исследования являются научные труды российских и зарубежных ученых в области теории и практики НУР отраслей промышленности, разработки экономических механизмов регулирования выбросов ПГ, экономики замкнутого цикла, государственного регулирования вопросов экологосбалансированного функционирования промышленных предприятий.

В основе методологии диссертации лежат: методы экономико-математического моделирования; инструменты системного, ситуационного и стратегического анализа; методы прогнозирования; методы многокритериальных оценок; методы инвестиционного анализа. Графические материалы подготовлены в продуктах MS Office, Adobe Illustrator, Scimago Graphica. Для отдельных задач построения графиков, а также для выполнения расчетов и моделирования использовался язык программирования Python.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Использование предложенной концепции углеродной экономики замкнутого цикла, учитывающей возможность реализации положительных экстерналий техногенного CO<sub>2</sub>, позволит диверсифицировать национальную климатическую политику, являющуюся одним из механизмов устойчивого развития промышленных отраслей.

2. Методологические подходы к низкоуглеродному развитию промышленности должны учитывать ее текущее состояние, структуру и изменения, которые в значительной степени определяют тенденции устойчивого развития, в частности, техногенных выбросов парниковых газов.

3. Для вовлечения в процесс декарбонизации большинства углеродоемких отраслей промышленности требуется переход от механизмов регулирования выбросов, нацеленных на их предотвращение, к механизмам управления, предполагающим рациональное обращение с потоками CO<sub>2</sub>.

4. Учет потенциала организации кластеров улавливания промышленного CO<sub>2</sub> по схеме «многие к одному» позволит использовать положительный эффект масштаба и сократить затраты проектов отрасли секвестрации углекислого газа за счет создания совместной инфраструктуры предприятий-участников.

5. Развитие проектов улавливания и утилизации CO<sub>2</sub> будет способствовать структурным изменениям в промышленных отраслях национальной экономики, характеризующихся высокими показателями углеродоемкости, что указывает на необходимость учета в стратегиях низкоуглеродного развития потенциала производства продуктов переработки углекислого газа.

**Достоверность результатов исследования** обеспечивается использованием современных инструментов статистического анализа, методов оценки экономической эффективности проектов с использованием сценарного подхода, верификацией полученных результатов путем их сравнения с результатами тематически близких работ, изучением и анализом представительного объема научной литературы, отраслевых отчетов и аналитических обзоров, а также прочих открытых источников статистических и аналитических данных.

**Апробация результатов диссертации** (за последние 10 лет) проведена на 11 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 11 международных: Международной научной конференции «Арктика: история и современность» (г. Санкт-Петербург, 20-21 апреля 2016); XXI Международной научно-практической конференции «Процессы глобальной экономики. Global Economic Processes» (г. Санкт-Петербург, 26-27 октября 2016); Международной конференции «International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA 2017)» (г. Сингапур, 25-27 марта 2017); Международной конференции «International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (SEEPE 2018)» (г. Сеул, 15-18 июня 2018); IX Международной научно-практической конференции «Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения - 2018» (г. Апатиты, 24-28 сентября 2018); Международной конференции «6<sup>th</sup> International Conference on Power and Energy Systems Engineering, CPESE 2019» (г. Окинава, 20-23 сентября 2019); Международной конференции «The 4<sup>th</sup> International Conference on Electrical Engineering and Green Energy - SEEGE 2021» (г. Мюнхен, 10-13 июня 2021); Международной конференции «8<sup>th</sup> International Conference on Power and Energy Systems Engineering - CPESE 2021» (г. Фукуок, 10-12 сентября 2021); Международной конференции «The 4<sup>th</sup> International Conference on Clean Energy and Electrical Systems - CEES 2022» (г. Токио, 02-04 апреля 2022); Международной научно-технической конференции «Автоматизация, энергетика и машиностроение: технологии и инновации» (г. Грозный, 14-16 мая 2024); XVIII Международной научно-практической конференции Российского общества экологической экономики (РОЭЭ) «Национальные эколого-экономические и социальные интересы в эпоху больших вызовов» (г. Апатиты, 30 июня - 05 июля 2025).

**Личный вклад автора.** Проведен анализ российской и зарубежной научной литературы, посвященной формированию и реализации механизмов устойчивого развития промышленности с акцентом на проблемы сокращения выбросов углекислого газа. Обобщен международный опыт внедрения различных конфигураций проектов секвестрации CO<sub>2</sub>. Разработана серия эконометрических моделей, позволяющих выявить ключевые факторы, влияющие на рост выбросов ПГ, в том числе углекислого газа. Предложены теоретические положения, методологические подходы и методический инструментарий для изучения процесса формирования концепции УЭЗЦ, а также для экономического анализа и оценки технологий сокращения промышленных выбросов CO<sub>2</sub>. Построен прогноз сокращения выбросов за счет развития технологий утилизации углекислого газа с его преобразованием в различные виды продукции. Разработаны теоретические и методологические положения, способствующие достижению целей устойчивого развития экономики промышленных отраслей, и выступающие в качестве научной основы для формирования системы управления выбросами CO<sub>2</sub>. Сформулированы цель, задачи, идея, положения научной новизны, защищаемые положения и основные выводы диссертационного исследования.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 30 печатных работах, в том числе в 7 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 21 статье – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получены 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из оглавления, введения, пяти глав с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 469 наименований, и 18 приложений. Диссертация изложена на 402 страницах машинописного текста, содержит 105 рисунков и 59 таблиц.

**Благодарности.** Автор искренне признателен:

- научному консультанту, профессору Череповицыну А.Е., за ценные идеи и всестороннюю поддержку, оказавшие существенное влияние на проведение диссертационного исследования;

- профессору Литвиненко В.С., содействие и внимание которого способствовали профессиональному развитию автора и успешному завершению этой работы;

- сотрудникам управления по публикационной деятельности, а также кафедры организации и управления за поддержку на всех этапах подготовки диссертации.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, раскрыты пункты научной новизны, теоретическая и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен анализ сущности, содержания и тенденций развития концепций НУР и ЭЗЦ. Определены предпосылки их интеграции и формируемые в рамках этого процесса мультипликативные эффекты, способствующие достижению ряда целей устойчивого развития (ЦУР). Разработаны теоретические и методологические положения, развивающие научные основы УЭЗЦ, в том числе уточнена сущность категории «углеродный метаболизм». Сформулирован концептуальный подход к анализу выбросов техногенного CO<sub>2</sub> через призму формируемых им положительных экстерналий.

**Во второй главе** выполнен структурный, пространственный и отраслевой анализ выбросов ПГ. Изучены взаимосвязи между выбросами ПГ и дисбалансом экономического развития стран. Выполнен анализ технико-экономических характеристик широкого перечня низкоуглеродных технологий. Для России выполнен факторный анализ динамики выбросов CO<sub>2</sub> в субъектах страны, а также определены географические области, перспективные с точки зрения организации промышленных кластеров улавливания углекислого газа.

**В третьей главе** выполнен анализ текущего состояния глобальной климатической повестки, включая механизмы регулирования и ее взаимосвязи с динамикой национальных выбросов. Предложена концептуальная модель перехода от политики регулирования к

политике управления выбросами CO<sub>2</sub> на основе методологии УЭЗЦ. Предложены рекомендации по повышению эффективности мер нормативно-правового регулирования и управления выбросами CO<sub>2</sub> в промышленности. Выполнен анализ текущего состояния климатической политики России и предложен запуск национальной программы изучения перспектив развития отрасли секвестрации углекислого газа, в том числе технологий улавливания и утилизации CO<sub>2</sub> (CCU).

**В четвертой главе** выполнен анализ технологических этапов различных конфигураций проектов секвестрации CO<sub>2</sub> (CCU|S), в частности CCU. Выявлены пробелы, имеющиеся в научных знаниях о технологиях и бизнес-моделях проектов CCU|S. Предложена экономико-математическая модель для оценки экономического эффекта создания промышленных кластеров улавливания и транспортировки CO<sub>2</sub>. Обосновано наличие глобальной тенденции формирования отрасли секвестрации углекислого газа, для которой выполнен анализ перспектив и барьеров дальнейшего развития.

**В пятой главе** систематизирована информация о технологиях производства ППУ в рамках технологических цепочек CCU. Разработана модель оценки потенциала сокращения выбросов CO<sub>2</sub> за счет технологий CCU, апробированная как на глобальных, так и на российских данных. Разработана методика сценарного анализа различных видов ППУ, которая позволяет выполнить их сравнительную оценку.

**В заключении** обобщены результаты проведенного диссертационного исследования и сформулированы рекомендации по их дальнейшему использованию и развитию.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Использование предложенной концепции углеродной экономики замкнутого цикла, учитывающей возможность реализации положительных экстерналий техногенного CO<sub>2</sub>, позволит диверсифицировать национальную климатическую политику, являющуюся одним из механизмов устойчивого развития промышленных отраслей.**

Проблема выбросов ПГ является частным случаем проявления «Трагедии Общин» (the Tragedy of the Commons), создающим

негативные экстерналии планетарного масштаба. Борьбу с этими экстерналиями, как правило, осуществляют с помощью рыночных инструментов (теорема Коуза) либо на основе механизмов налогообложения (подход Пигу). При этом практически не рассматривается вариант, что сам по себе CO<sub>2</sub> может быть носителем положительных экстерналий (таблица 1) в случае его использования в качестве производственного ресурса.

Таблица 1 – Группы положительных экстерналий утилизации CO<sub>2</sub>

<b>Группа</b>	<b>Описание</b>
Климатическая (углеродный баланс)	Утилизация CO <sub>2</sub> - кластер решений, предоставляющий возможность возврата выбросов в природные и/или технологические циклы на сроки, достигающие сотен лет
Диверсификация и создание межотраслевых связей	Формирование отрасли секвестрации углекислого газа, интегрирующей действующие промышленные предприятия на базе новых производственно-логистических цепочек, в основе которых лежат технологии утилизации CO <sub>2</sub>
Технологические эффекты	Создание условий для формирования новых рынков инновационных промышленных технологий, в том числе связанных с изъятием CO <sub>2</sub> из природных систем.
«Ресурсная» безопасность	CO <sub>2</sub> может быть использован для производства удобрений, строительных материалов, химикатов и других продуктов промышленного производства, в т.ч. массового потребления.
Экологизация экономики	Утилизация промышленного CO <sub>2</sub> сокращает углеродный след цепочек «производства-потребления» и способствует распространению механизмов формирования спроса на более экологичные продукты.

Учет этих экстерналий дает возможность развития подходов к рациональному обращению с выбросами CO<sub>2</sub> (таблица 2), в основе которых лежит интеграция концепций НУР и ЭЗЦ, позволяющая:

- усилить работу по сокращению выбросов CO<sub>2</sub>, которое за последние годы наблюдалось лишь в связи с локдаунами во время пандемии COVID-19, но не оказало долгосрочного эффекта;

- сбалансировать портфель глобальных климатических инвестиций, характеризующийся концентрацией ресурсов в отраслях солнечной и ветряной энергетики, инфраструктурные проблемы которых до сих пор являются барьером для их дальнейшего масштабирования;

- диверсифицировать технологии сокращения выбросов с учетом того, что многие из них еще не достигли приемлемого уровня технологической готовности.

Таблица 2 - Различия между принципами сокращения выбросов CO<sub>2</sub>

<b>Характеристика</b>	<b>Предотвращение</b>	<b>Рациональное обращение</b>
Цель	Сокращение масштаба выбросов CO <sub>2</sub>	Сокращение масштаба не утилизируемых выбросов
Экономическая модель	Избежание затрат, связанных с выбросами; снижение потребления углеводов.	Создание новых товарных рынков, где CO <sub>2</sub> является ресурсом производства.
Влияние на существующую промышленную инфраструктуру	Фундаментальная трансформация.	Модернизация и интеграция.
Отраслевой охват	Преимущественно энергогенерация и энергопотребление	Любые промышленные источники выбросов CO <sub>2</sub>
Ключевые механизмы	ВИЭ, повышение энергоэффективности процессов, электрификация.	Интеграция технологий секвестрации CO <sub>2</sub> в промышленные производственные цепочки.
Модель производства и потребления	Преимущественно линейная. Циклическая модель - редкость.	Преимущественно циклическая.
Уровень технологической зрелости	Высокая для многих технологий	От умеренной до низкой. Многие технологии на начальных этапах развития.

Важно отметить, что значение имеет не столько отказ от опоры на принцип предотвращения выбросов CO<sub>2</sub> за счет, например, перехода на ВИЭ (значимый элемент глобальной энергетики), сколько появление альтернативной группы решений (в рамках принципа рационального обращения с выбросами). Синергия указанных принципов необходима для нахождения рациональных экологосбалансированных решений в области сокращения промышленных выбросов CO<sub>2</sub> и возможна за счет интеграции концепций НУР и ЭЗЦ.

По своей сущности вышеуказанная интеграция является закономерным этапом развития указанных концепций, являющимся не только ответом на проблемы, связанные с ростом выбросов техногенного CO<sub>2</sub>, но и механизмом получения синергетических эффектов в контексте достижения целей устойчивого развития.

Основным результатом обозначенной интеграции является формирование новой концепции УЭЗЦ, являющейся во многих смыслах самостоятельной и эмерджентной по отношению к НУР и ЭЗЦ (таблица 3).

Таблица 3 - Сравнительная характеристика НУР, ЭЗЦ и УЭЗЦ

Аспект	НУР	ЭЗЦ	УЭЗЦ
Цель	Сокращение выбросов ПГ	Повышение эффективности использования имеющихся ресурсов	Создание, расширение и управление циклами обращения углерода
Приоритетная область применения	Углеродоемкие отрасли промышленности	Материальные и энергетические потоки в процессах производства и потребления	Потоки углерода, формирующиеся в рамках антропогенной и природной систем
Учет экстерналий выбросов CO <sub>2</sub>	Преимущественно отрицательных	CO <sub>2</sub> рассматривается как один из множества видов отходов	Преимущественно положительных
Базовый принцип сокращения выбросов CO <sub>2</sub>	Предотвращение выбросов		Рациональное обращение с выбросами

Это стало возможно благодаря активному участию различных заинтересованных сторон, формирующих благоприятную среду для интеграции указанных концепций:

1. Государство играет важнейшую роль в создании механизмов, стимулирующих интеграцию, и инструментов поддержки проектов, включая разработку национальных стратегий; установление особого налогового режима для отдельных участников рынка; разработку прочих элементов регуляторного воздействия.

2. Промышленные компании играют системообразующую роль во внедрении низкоуглеродных и ресурсосберегающих бизнес-моделей, разработке инновационных технологий и стимулировании рыночного спроса на более экологичные продукты и услуги.

3. Потребители. Несмотря на то что отдельные потребители, как правило, не влияют на общие тенденции и конъюнктуру рынка (за исключением случаев проявления монополии), их совокупность с определенными потребительскими предпочтениями и культурой потребления (отдельные сегменты), которые формируют спрос на продукцию и услуги с новыми характеристиками, начинает играть все более значимую роль в процессах декарбонизации и повышения ресурсоэффективности.

4. Отдельные ученые и исследовательские институты развивают знания и создают инновации, необходимые для поддержки интеграции концепций в самых различных областях, начиная с социологии (в частности, изучение общественного восприятия низкоуглеродных технологий) и заканчивая техническими средствами улавливания CO<sub>2</sub>.

5. Неправительственные организации, например, экологические сообщества, выступают за устойчивую политику, повышают осведомленность населения и реализуют проекты, имеющие общественное значение.

6. Международные организации, такие как ООН и Всемирный банк, обеспечивают финансирование и организацию технической помощи инициативам в области интеграции НУР и ЭЗЦ, поскольку они способствуют достижению ряда глобальных целей развития человечества, которыми сегодня являются ЦУР.

Взаимодействие указанных стейкхолдеров позволяет согласовать социальные, экономические, экологические и технологические аспекты деятельности промышленных предприятий, необходимые для реализации потенциала положительных экстерналий, которым обладает техногенный CO<sub>2</sub>. Это, в свою очередь, способствует достижению целей устойчивого развития экономики промышленных отраслей и позволяет диверсифицировать национальную климатическую политику за счет масштабирования практик УЭЗЦ.

**2. Методологические подходы к низкоуглеродному развитию промышленности должны учитывать ее текущее состояние, структуру и изменения, которые в значительной степени определяют тенденции устойчивого развития, в частности, техногенных выбросов парниковых газов.**

Проблема неравномерного развития стран и регионов, являющаяся одной из ключевых в современной экономической науке, в последние годы усугубилась в результате попыток поиска ответственных за наблюдаемые климатические изменения. Непосредственность влияния экономического роста на масштабы выбросов ПГ сегодня подвергается сомнению многими учеными. Тем не менее вполне очевидно, что существует сложная система взаимосвязей между экономическим развитием, ресурсопотреблением и определенными отраслевыми тенденциями, что приводит к различиям и в динамике выбросов ПГ.

Обобщенно эти различия прослеживаются через классическое уравнение Кайи, однако для оценки вклада промышленного сектора в выбросы требуется выполнение декомпозиции, что может быть реализовано методом LMDI (Logarithmic Mean Divisia Index). Для этого уравнение Кайи было модифицировано следующим образом (1):

$$F = P \times \left(\frac{G}{P}\right) \times \left(\sum_i \frac{E_i}{G_i} \times \frac{G_i}{G}\right) \times \left(\frac{F}{E}\right) \quad (1)$$

где  $F$  – выбросы ПГ, т CO<sub>2</sub>е;  $P$  – численность населения, чел.;  $G$  – ВВП, долл. США;  $E$  – потребление энергии, Дж;  $i$  – промышленный либо непромышленный сектор экономики.

Тогда вклад каждого компонента модифицированного уравнения Кайи ( $D$ ) в изменение выбросов ПГ рассчитывается через логарифмическое среднее, гарантирующее полноту аддитивного разложения между двумя точками времени  $t$  (2):

$$\Delta F_D^t = \frac{F^t - F^0}{\ln(F^t) - \ln(F^0)} \times \ln\left(\frac{D^t}{D^0}\right) \quad (2)$$

По результатам выполненной оценки (рисунок 1) для стран с различным уровнем дохода были сделаны два следующих ключевых вывода:

1. В индустриальных странах с высоким уровнем дохода динамика показателей промышленного сектора имеет обратную взаимосвязь с выбросами ПГ, что может быть воспринято положительно. Тем не менее сравнительно низкие темпы роста валовой добавленной стоимости, генерируемой промышленным сектором, свидетельствует о появлении новых индустриальных центров роста за пределами этих стран (таблица 4).

Таблица 4 – Экономические и энергетические показатели промышленности в рассмотренных группах стран

Группа стран*	Суммарный ВДС промышленности, млрд \$ 2011		Изменение ВДС промышленности, %	Суммарное потребление энергии в промышленности, млн ТДж		Изменение потребления энергии, %
	2000	2020		2000	2020	
ИВД	8 137,07	9 504,86	16,81	97,31	80,50	-17,27
ИИВД	653,36	1 331,01	103,72	5,76	9,67	67,88
ИСД	6 228,67	16 225,16	160,49	67,23	160,84	139,25
ИИСД	1 484,33	4 136,80	178,70	19,38	34,63	78,73
СНД	154,54	237,33	53,58	1,14	1,88	65,42

\*ИВД – индустриальные страны с высоким уровнем дохода; ИИВД – индустриализирующиеся страны с высоким уровнем дохода; ИСД – индустриальные страны со средним уровнем дохода; ИИСД – индустриализирующиеся страны со средним уровнем дохода; СНД – страны с низким уровнем дохода.

2. В странах с низким уровнем дохода демографический рост является одним из основных факторов роста выбросов ПГ. В странах с высоким уровнем дохода, помимо численности населения, существенное влияние на рост выбросов оказывает рост подушевого ВВП,

хотя в случае индустриальных экономик с высоким уровнем дохода совокупное влияние факторов отрицательное, что говорит об общем снижении выбросов.

Заключение, что экономическое развитие в отдельных случаях способствует сокращению выбросов, может быть проверено через гипотезу экологической кривой Кузнеця. Эта проверка была сделана для стран Шанхайской Организации Сотрудничества (ШОС), на которую приходится порядка 42% глобальных выбросов CO<sub>2</sub>, 35% мирового ВВП и 43% населения планеты, на основе следующей модели (3):

$$\ln(GHG)_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln(GDP)_{it} + \beta_2 \ln(GDP)_{it}^2 + \beta_3 \ln(GDP)_{it}^3 + \beta_4 \ln(REC)_{it} + \beta_5 \ln(NRR)_{it} + \beta_6 \ln(TO)_{it} + \beta_7 \ln(FDI)_{it} + \varepsilon_{it}, \quad (3)$$

где  $GHG$  – выбросы ПГ, CO<sub>2</sub>e;  $GDP$  – ВВП на душу населения;  $REC$  – доля ВИЭ, % от общего конечного потребления энергии;  $NRR$  – рента за использование природных ресурсов, % ВВП;  $TO$  – доля торговли в ВВП;  $FDI$  – чистый приток средств, % от ВВП;  $\beta_0$  – константа;  $\beta_n$  – коэффициенты регрессии;  $\varepsilon_{it}$  – погрешность.

Результаты моделирования (таблица 5) подтверждают гипотезу, что ускорение экономического развития стран может привести к сокращению выбросов ПГ, однако следует учитывать, что экономический рост большинства стран ШОС во многом связан с развитием промышленного сектора, что определяет, во-первых, специфику структуры выбросов ПГ, а во-вторых, перечень приемлемых технологий.

Таблица 5 – Результаты регрессионного анализа

Коэффициент	Статистическая ошибка	t-статистика	p-значение	Нижняя граница 95%	Верхняя граница 95%	
L(GDP)	-1,690	0,527	-3,206	0,002	-2,73	-0,65
L(GDP) <sup>2</sup>	0,237	0,071	3,323	0,001	0,096	0,377
L(GDP) <sup>3</sup>	-0,011	0,003	-3,340	0,001	-0,017	-0,004
L(REC)	0,009	0,008	1,168	0,244	-0,006	0,024
L(NRR)	0,031	0,010	3,117	0,002	0,011	0,050
L(TO)	-0,146	0,016	-9,017	0,000	-0,178	-0,114
L(FDI)	0,015	0,007	2,262	0,025	0,002	0,028

В связи с этим важно, что многим странам с развитым промышленным комплексом не подходит моноотраслевой вариант декарбонизации, основанный на ускоренном замещении углеводородной энергетики, что связано, как минимум, с двумя факторами, выявленными с помощью методов квантильной и квантиль-квантильной регрессии:

1. Форсированное развитие сектора ВИЭ не является гарантией того, что совокупные выбросы CO<sub>2</sub> будут уменьшаться в кратко- или среднесрочной перспективе.

2. Проанализированные для более чем 100 стран макропоказатели энергетической эффективности, в том числе связанные с промышленным сектором, не претерпели статистически значимых изменений за период 2010-2020 гг. Следовательно, повышение энергетической эффективности промышленных секторов отдельных стран не может характеризовать общемировую динамику.

Два указанных фактора говорят о необходимости создания условий для диверсификации применяемых технологий сокращения выбросов CO<sub>2</sub> и совершенствования подходов к НУР промышленности.

**3. Для вовлечения в процесс декарбонизации большинства углеродоемких отраслей промышленности требуется переход от механизмов регулирования выбросов, нацеленных на их предотвращение, к механизмам управления, предполагающим рациональное обращение с потоками CO<sub>2</sub>.**

К основным инструментам климатической политики и, соответственно, мерам регулирования выбросов CO<sub>2</sub>, общая характеристика которых показана в таблице 6, относятся углеродный налог (Carbon Tax, УН) и системы торговли квотами на выбросы (Emissions Trading Systems, СТВ).

В 2024 г. в мире насчитывалось более 75-ти таких механизмов с разбросом цен от 0,6 до 162 долл. США за тонну CO<sub>2</sub>. Несмотря на кажущуюся позитивной тенденцию географического расширения и увеличения доли охватываемых выбросов, их дальнейшее развитие сопряжено с наличием барьеров.

Во-первых, даже самые успешные региональные СТВ или системы налогообложения не смогут решить глобальную проблему выбросов при наблюдающемся разбросе цен. При этом, несмотря на рост доли охваченных глобальными выбросами, эти механизмы приходятся на страны с развитой либо активно развивающейся экономикой, тогда как страны, от которых ожидается стремительный рост в ближайшие десятилетия, не всегда обладают ими.

Во-вторых, наблюдается перемещение промышленных производств, чья деятельность сопряжена с выбросами загрязняющих веществ, в страны с более мягким регулированием, что в научной литературе определено как «гипотеза убежища для загрязнения» (Pollution Haven Hypothesis). Это справедливо и в части сокращения выбросов ПГ, где миграция загрязняющих производств в более мягкие регуляторные условия подрывает глобальные усилия и потенциально приводит к росту совокупных выбросов, что принято обозначать термином «утечка углерода» (Carbon Leakage).

Таблица 6 – Характеристика мер регулирования выбросов CO<sub>2</sub>

<b>Мера</b>	<b>Характеристика</b>
Углеродный налог	Налог, уплачиваемый за сверхнормативные выбросы CO <sub>2</sub>
Контракты на разницу цен	Предполагает заключение контракта между правительством и оператором проекта, согласно которому ему гарантируется определенный уровень цен, обеспечиваемых субсидией
Льготные тарифы	Механизм повышения конкурентоспособности ВИЭ за счет субсидий на производство низкоуглеродной энергии. Субсидия может покрывать полную цену или только ее часть
Стандарт портфеля продукции / услуг	Обеспечение минимальной доли «зеленой» продукции либо услуг, которая производится либо реализуется компанией
Налоговые льготы	Снижение налоговой нагрузки компаний, осуществляющих проекты, связанные с сокращением выбросов. Ценность таких льгот растет при наличии системы торговли ими

Продолжение Таблицы 6

Мера	Характеристика
СТВ	Рыночный механизм, предполагающий установление квот на общую массу выбросов и создание рынка для торговли ими
Зеленые закупки	Введение стандартов на закупку продукции с определенными характеристиками, например, в части углеродоемкости
Прямое государственное участие	Реализация такого участия может выражаться в разных формах (субсидии, гранты и т.д.) и в отношении различных инфраструктурных объектов

Решение обозначенных проблем предлагается за счет диверсификации и модернизации действующих механизмов регулирования с целью перехода к практике управления выбросами (таблица 7). Необходимость в таких действиях назрела уже достаточно давно и может быть заметна на примере климатической политики Евросоюза, которая начала подвергаться серьезной трансформации в 2024-2025 гг.

Таблица 7 – Сравнительная характеристика методов регулирования и методов управления выбросами CO<sub>2</sub>

Характеристика	Регулирование выбросов	Управление выбросами
Подход	Директивный, нисходящий. Установление ограничений	Адаптивный, восходящий. Поиск приемлемых для эмитента альтернатив
Механизм реализации	Нормативные правовые акты	Стратегии, цели и добровольные действия, адаптированные к потребностям организации
Гибкость	Требования нормативных правовых актов подлежат строгому соблюдению	Методы управления могут быть скорректированы в зависимости от технологических достижений, рыночных условий и приоритетов развития организации
Стимулы	Негативные стимулы за несоблюдение требований	Положительные стимулы за сокращение выбросов

Продолжение Таблицы 7

Характеристика	Регулирование выбросов	Управление выбросами
Проблемы	Низкая адаптивность, концентрация на «универсальных» подходах	Система, требующая координации многих сторон, развития научного и экономического партнерства
Результат	Достижение требуемого уровня сокращения выбросов	Более глубокое сокращение выбросов за счет попытки гармонизации с показателями экономического развития

Важно, что речь идет не об отказе от существующих механизмов регулирования (минимизация отклонений фактических показателей от плановых), но акцентируется необходимость придания им дополнительных свойств, позволяющих реализовать цикл управления (включая планирование, организацию, мотивацию, координацию и контроль).

Предлагаемый подход базируется на концепции УЭЗЦ, в которой одной из центральных научных категорий является «углеродный метаболизм». Этот термин хоть и встречается в экономических научных работах, но не имеет однозначной трактовки и теоретического обоснования.

Термин «метаболизм» является заимствованным из биологических наук, где под ним понимается в предельно упрощенном варианте сложная цепочка преобразований ресурсов в энергию, необходимую организму. Аналогичные идеи поддаются переносу и в экономическую плоскость, например, в виде теории метаболического масштабирования, используемой при оценке затрат промышленных объектов по методу аналогий.

В данном исследовании дана авторская трактовка категории «углеродный метаболизм», предполагающая, что он представляет собой совокупность биогеохимических процессов обмена и преобразования потоков углерода в природных и антропогенных системах, поддающуюся управлению за счет реализации мероприятий, инициируемых в социально-экономических системах.

Таким образом, углеродный метаболизм является, с одной стороны, процессом, поддающимся управлению за счет методов и инструментов концепции УЭЗЦ. С другой стороны, это обобщающая категория для достаточно обширного перечня взаимодействий, формирующих углеродные циклы, стороной которых является человеческая деятельность, в том числе промышленная. Эта двойственная природа имеет значение при переходе от точечного (объектного) регулирования выбросов CO<sub>2</sub> к управлению углеродоемкостью цепочек жизненного цикла продукции.

Такой переход может быть продемонстрирован на примере анализа влияния процесса улавливания CO<sub>2</sub> при производстве цемента и стали на характеристики углеродного следа и себестоимости получаемых из них продуктов. В качестве примера в таблице 8 показан такой анализ для 5-ти инфраструктурных объектов. Исходные данные в силу их вариативности приняты в качестве диапазонов.

Таблица 8 – Влияние процесса улавливания CO<sub>2</sub> при производстве стали и цемента на характеристики объектов инфраструктуры

Объект инфраструктуры	Улавливание только на цементном заводе, %		Улавливание при производстве стали, %		Улавливание на обоих объектах, %	
	Δ затрат	Δ углеродного следа	Δ затрат	Δ углеродного следа	Δ затрат	Δ углеродного следа
Жилая площадь МКД, м <sup>2</sup>	+1,7%	-29,2%	+3,5%	-22,1%	+5,2%	-51,1%
Мост, ед.	+4,3%	-31,0%	+3,7%	-23,7%	+8,1%	-54,6%
Дорога, м <sup>2</sup>	+14,9%	-45,3%	+5,3%	-15,1%	+20,0%	-60,3%
Трубопровод, км	+3,5%	-16,5%	+11,2%	-30,0%	+14,5%	-46,5%
Тоннель, км	+9,8%	-33,2%	+3,1%	-17,6%	+13,2%	-50,4%

Работа с диапазонами осуществлялась с помощью метода Монте-Карло, предполагающего многократное повторение расчета необходимых параметров (выполнено 10 000 итераций для каждого объект инфраструктуры) с использованием входных данных, имеющих заданное статистическое распределение.

Результаты анализа показывают, что удлинение цепочки формирования стоимости создает рычаг в соотношении показателей сокращения углеродного следа и понесенных затрат, который может быть использован для поддержки и распространения технологий улавливания CO<sub>2</sub>.

Использование таких рычагов, в свою очередь, будет способствовать переходу от механизмов регулирования выбросов, нацеленных на их предотвращение, к механизмам управления, предполагающим рациональное обращение с потоками CO<sub>2</sub>. Перспективными в данном ключе являются меры, ориентированные на создание и стимулирование развития рынков низкоуглеродной продукции (в том числе ППУ).

**4. Учет потенциала организации кластеров улавливания промышленного CO<sub>2</sub> по схеме «многие к одному» позволит использовать положительный эффект масштаба и сократить затраты проектов отрасли секвестрации углекислого газа за счет создания совместной инфраструктуры предприятий-участников.**

Несколько десятилетий ведутся дискуссии о роли технологий CCU|S в процессе декарбонизации. Одна из позиций заключается в том, что это промежуточные, в ряде случаев излишние технологии. Согласно другой позиции, они необходимы для достижения целей межправительственных соглашений.

Вопреки этой неоднозначности и протекающим спорам, в последние годы наблюдается усиление интереса инвесторов к деятельности производителей и потребителей продукции/технологий CCU|S. Более того, проведенный автором анализ показал наличие предпосылок для формирования отрасли секвестрации углекислого газа (ОСУ), что обусловлено тремя основными факторами:

1. Диверсифицированность направлений возможного использования CO<sub>2</sub>, начиная с повышения ресурсоотдачи месторождений

(нефти, газа), заканчивая его преобразованием в различные продукты (рисунок 2).

2. С 2019 по 2024 гг. число планируемых проектов CCU|S увеличилось со 199 до 844, а масштабы улавливания CO<sub>2</sub> к 2035 г., по данным Международного энергетического агентства, должны увеличиться в 2,5 раза и превысить 500 млн т в год (рисунок 3).

3. Прогнозируемое расширение числа отраслей, вовлекаемых в технологические цепочки захвата, транспортировки, хранения и утилизации углерода, то есть отраслей, формирующих ОСУ.

Исходя из вышесказанного, наполнение ОСУ можно классифицировать по ряду признаков, связанных с технологиями CCU|S:

1. Исходя из сущности проектов, выделяются проекты CCS, CCUS и CCU. Последние являются наименее изученной и наиболее недооцененной альтернативой, что связано с их малым масштабом, существенными различиями в уровне развития отдельных технологий и дефицитом оценок рынков продукции переработки CO<sub>2</sub> как инструмента поддержки развития ОСУ.

2. Исходя из бизнес-моделей, организационные схемы которых можно разделить на 4 основные группы, согласно данным международных аналитических отчетов, в зависимости от степени децентрализации (рисунок 4). В настоящее время преобладают линейные модели «первых в своем роде» проектов, однако в ближайшее время вероятно развитие более сложных вариантов, например, связанных с созданием кластеров улавливания и транспортировки CO<sub>2</sub>.

Необходимость перехода к кластерным организационным структурам определяется тем, что они позволяют использовать механизмы сокращения затрат на улавливание, которые зависят от двух ключевых характеристик потока, содержащего CO<sub>2</sub>: парциальное давление и мощность потока газа. Учитывая это, в основе объединения источников выбросов в кластеры должны лежать следующие принципы:

1. Увеличение мощности потока CO<sub>2</sub>-содержащего газа.

2. Увеличение среднего парциального давления CO<sub>2</sub> в потоке за счет комбинации высоко- и слабоконцентрированных источников.

Анализ влияния эффекта масштаба был выполнен для угольных электростанций в диапазоне установленной мощности от

100 МВт до 1,5 ГВт (рисунок 5), поскольку в последние годы для угольной отрасли осуществляются активные поиски путей ее экологизации и решения прочих накопленных проблем. Для каждого варианта были рассчитаны приведенные затраты на улавливание CO<sub>2</sub>. Помимо этого, построена обобщенная зависимость изменения затрат на улавливание от парциального давления CO<sub>2</sub> в потоке газа (рисунок 5), а также зависимость затрат на трубопроводную транспортировку от объема газа.

Указанные зависимости позволяют сформулировать принципиальный подход к формированию кластеров улавливания CO<sub>2</sub>, предназначенный для решения оптимизационной задачи снижения затрат с учетом следующих наблюдений:

1. Эффект масштаба наиболее значимо проявляется при малых объемах выбросов от объектов-эмитентов.

2. Эффект роста парциального давления заметнее при объединении малых объектов-эмитентов.

3. Совокупный эффект перечисленных двух факторов формирует широкий диапазон удельной стоимости улавливания CO<sub>2</sub>, максимальные значения которого кратно больше минимальных.

Для апробации подхода была разработана модель, позволяющая найти оптимальное расположение кластера (-ов) (совместный завод по улавливанию CO<sub>2</sub>), где концентрируются потоки промышленных газов, с учетом указанных выше характеристик объектов-источников выбросов; расстояния до пункта «хранения» CO<sub>2</sub>; затрат на улавливание; затрат на транспортировку; возможности объединения трубопроводов нескольких кластеров.

В основе данной модели лежит алгоритм, включающий три оптимизационные задачи (рисунок 6) (формулы 4-5): основная - нацеленная на минимизацию общих затрат всей системы (Greedy Algorithm); дополнительная задача 1 – оптимизация расположения кластера для минимизации общих затрат (алгоритм последовательного квадратичного программирования, SLSQP); дополнительная задача 2 – минимизация совокупных транспортных затрат кластеров за счет поиска оптимальной точки соединения трубопроводов (метод Нелдера–Мида).

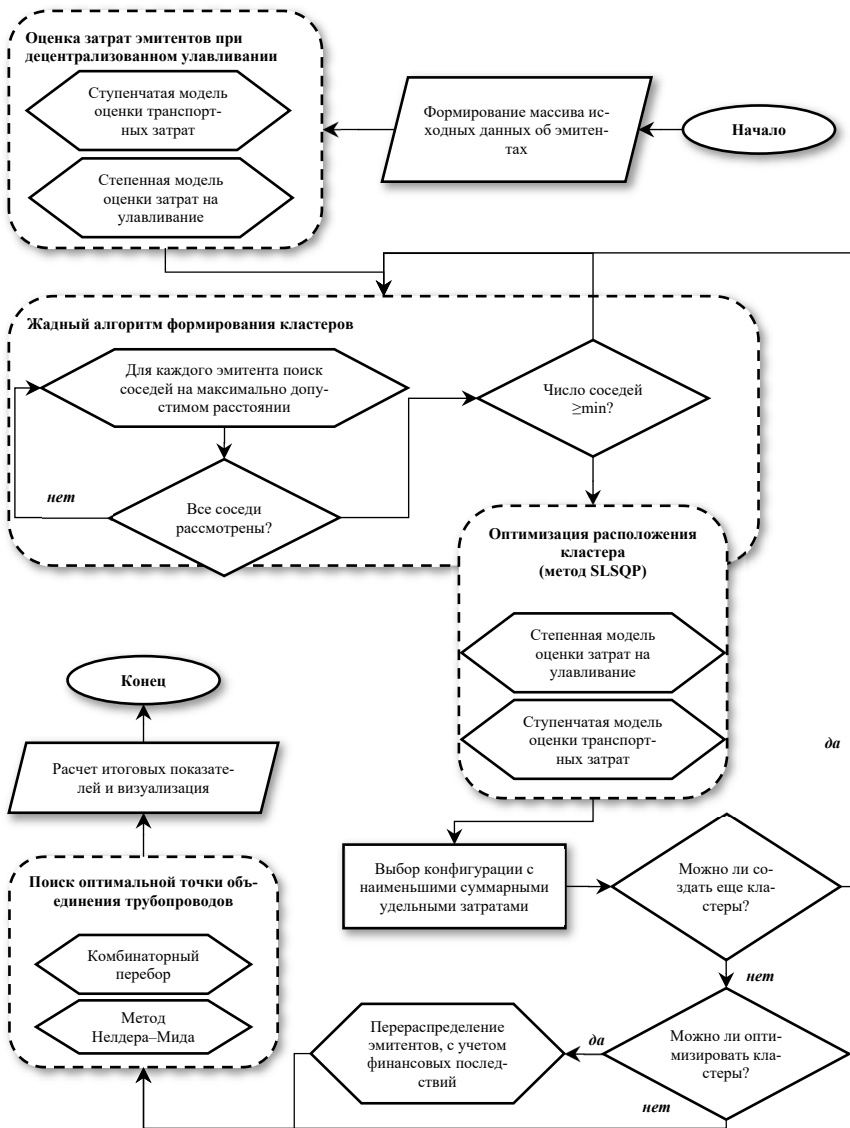


Рисунок 6 – Алгоритм модели поиска оптимальной конфигурации кластеров

Целевая функция:

$$\min \left[ \sum_{i \in rej} (C_c(V_i, P_i) + C_{tts}(V_i)) + \sum_{j=1}^k (C_c(V_j, P_j) + C_{tth}(V_j) + C_{tts}(V_j)) \right] \quad (4)$$

Некоторые ограничения:

$$\begin{aligned} 0 &\leq k \leq N \\ |N_j| &\geq 2, \forall j \in \{1, 2, \dots, k\}, \\ C(V, P) &> 0, \forall V, P > 0 \end{aligned} \quad (5)$$

где  $C_c$  – затраты на улавливание, руб.;  $V$  – объем выбросов в  $i$ -м пункте или  $j$ -м кластере, м<sup>3</sup>;  $P$  – парциальное давление CO<sub>2</sub> в потоке газа  $i$ -го пункта или  $j$ -го кластера, Па;  $C_{tts}, C_{tth}$  – затраты на транспортировку до общего хранилища/места утилизации ( $tts$ ) или до кластера улавливания ( $tth$ ), руб.;  $rej$  – множество пунктов, не вошедших ни в один кластер (с учетом процедуры перераспределения);  $N$  – количество пунктов выброса CO<sub>2</sub>;  $k$  – количество кластеров;  $k = N/2$  – максимальное число кластеров.

Укрупненно разработанная модель включает расчет затрат в двух конфигурациях: затраты на децентрализованное улавливание и затраты на улавливание в кластерах. Таким образом, имея информацию о механизмах снижения затрат за счет создания кластеров, модель позволяет выполнить оптимизацию совокупных затрат системы за счет реализации серии итерационных процедур.

Результаты моделирования для условных 15-ти источников выбросов, расположенных случайно на расстоянии не более 30-ти км друг от друга, имеющих годовую мощность от 400 до 800 тыс. т CO<sub>2</sub>, показывают возможность сокращения совокупных затрат на 15-19%.

Планирование кластеров в реальных условиях осуществляется исходя из имеющейся информации об объектах на территории страны/региона. Учитывая масштаб России, для определения перспективных географических областей концентрации стационарных

промышленных источников выбросов предложена методика, основанная на плотностном алгоритме пространственной кластеризации с присутствием шума (DBSCAN).

Реализации предлагаемой методики для эмитентов цементной, металлургической и энергетической отраслей России позволила выделить 94 географические зоны скопления промышленных объектов, что показано на рисунке 7. Информация о промышленных предприятиях, формирующих шесть таких крупнейших зон, была использована для апробации алгоритма, показанного на рисунке 6. Сокращение совокупных затрат по рассмотренным конфигурациям составило в среднем 17,81% (рисунок 8).

**5. Развитие проектов улавливания и утилизации CO<sub>2</sub> будет способствовать структурным изменениям в промышленных отраслях национальной экономики, характеризующихся высокими показателями углеродоемкости, что указывает на необходимость учета в стратегиях низкоуглеродного развития потенциала производства продуктов переработки углекислого газа.**

Текущие знания о технологиях CCU не позволяют определить весь перечень потенциальных вариантов утилизации CO<sub>2</sub>, которые станут востребованы в ближайшие десятилетия. В существующих научных исследованиях наиболее часто встречающимися группами ППУ являются строительные материалы (наполнители, бетон и т.д.); топлива; метанол. Самые приближенные оценки потенциала годового потребления CO<sub>2</sub> по каждому из этих вариантов составляют сотни миллионов тонн, а в совокупности, по данным различных аналитических обзоров, превышают 1 млрд т.

Детализация оценок потенциала развития направления CCU сдерживается несколькими основными факторами:

1. Для многих технологических цепочек CCU характерен малый масштаб, что делает их практически незаметными по сравнению с крупными проектами, связанными с захоронением CO<sub>2</sub>. Это же делает их менее привлекательными с точки зрения крупных инвесторов. Таким образом, CCU, как и некоторые другие отрасли, например, малотоннажного сжиженного природного газа, оказываются подвержены влиянию негативных сторон эффекта масштаба.

2. Наблюдается дефицит исследований потенциала развития рынков ППУ, а также инструментов поддержки их производства.

3. Существенное различие уровней развития технологий преобразования CO<sub>2</sub> в различные ППУ. Зачастую вся группа технологий может ассоциироваться с ее наименее зрелыми представителями.

Первым шагом в решении проблемы совершенствования прогнозных оценок ССУ является определение ППУ, производство которых представляется возможным. На основе анализа литературы был собран список из 53-х наименований с указанием их технико-экономических характеристик, а также характеристик рынков сбыта. Оценка после предобработки и верификации данных осуществлялась для 45-ти наименований в двух вариантах:

1. Был разработан прогноз утилизации CO<sub>2</sub> до 2050 г., основанный на зрелости технологий и темпах роста рынков. В рамках прогноза также было учтено разделение по длительности цикла хранения CO<sub>2</sub> в различных ППУ.

Результаты показывают, что сокращение выбросов CO<sub>2</sub> за счет технологий ССУ для мировой экономики может превысить 3,59 млрд т в год (~10% от текущих выбросов CO<sub>2</sub>) для вариантов со средне- и долгосрочным хранением (рисунок 9), а также порядка 3,87 млрд т в год в вариантах с краткосрочным хранением.

Для России аналогичные значения составляют 61,1 и 251 млн т в год, то есть ~3,8% и 15,13% от текущих национальных выбросов CO<sub>2</sub> соответственно. При благоприятном сценарии развития ССУ эти значения могут увеличиться до 136 и 501 млн т CO<sub>2</sub> в год соответственно.

2. Стандартной практикой при оценке климатических проектов является опора на данные международной статистики. Однако текущее экономическое и политическое положение России делает такой подход нецелесообразным, поскольку реализация климатических инициатив, в том числе проектов производства ППУ, должна принимать в расчет национальные интересы. Учитывая это, была разработана методика сценарного ранжирования ППУ на основе их многокритериальной оценки (рисунок 10).

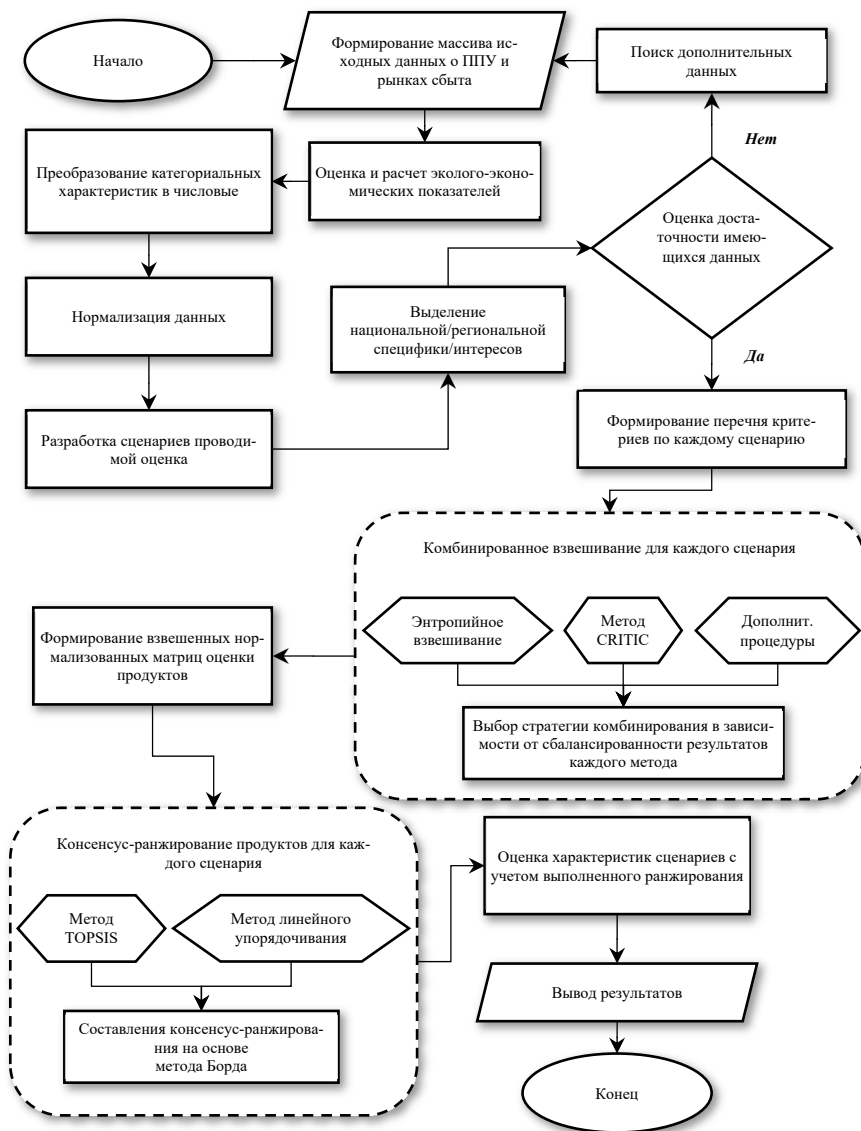


Рисунок 10 – Алгоритм ранжирования ППУ на основе технико-экономических и рыночных данных

Для апробации алгоритмической части были разработаны 4 сценария, 2 из которых характеризуют немедленные климатические действия, а 2 других основаны на приоритетной финансовой эффективности (таблица 9). Международные сценарии ориентированы на глобальные тенденции и международное взаимодействие, тогда как национальные сценарии основаны на национальных данных.

Таблица 9 – Критерии для каждого из сценариев ранжирования

<b>Сценарии</b>	<b>Перечень показателей</b>
Международная кооперация – немедленные действия (МК НД)	Емкость рынка традиционной продукции, являющейся аналогом к рассматриваемому ППУ, т (мировой рынок, либо рынок России); прогнозный потенциал сокращения выбросов CO <sub>2</sub> в 2030 г. (и аналогично в 2040 г.) за счет производства конкретного вида ППУ, т (для мира в целом либо для условий России); коэффициент преобразования CO <sub>2</sub> ; длительность цикла хранения CO <sub>2</sub> .
Национальные интересы – немедленные действия (НИ НД)	
Международная кооперация – экономическая перспектива (МК ЭП)	Прогнозная конкурентоспособность ППУ по цене в сравнении с традиционным аналогом (среднемировые данные либо для условий России) в 2030 г.; прогнозный потенциал сокращения выбросов CO <sub>2</sub> в 2040 г. за счет производства конкретного вида ППУ, т (для мира в целом либо для условий России); прогнозный среднегодовой темп роста рынка (мирового либо России), %; цена на традиционный аналог оцениваемого вида ППУ, руб.
Национальные интересы – экономическая перспектива (НИ ЭП)	

Результаты анализа показали (таблица 10), что при ориентации на сценарии международной кооперации потенциал утилизации CO<sub>2</sub> внутри России ниже, чем при ориентации на специфику национальной экономики. Это говорит о необходимости реализации гибкого подхода при разработке планов развития ОСУ, в частности ССУ.

Важным выводом является то, что сценарии, рассмотренные выше, могут пересекаться с целями национальных проектов, таких как «Экологическое благополучие» (в части сокращения выбросов

СО<sub>2</sub>), «Технологическое обеспечение биоэкономики» (развитие технологий преобразования СО<sub>2</sub>), «Эффективная и конкурентная экономика» (создание новых межотраслевых связей за счет развития ОСУ), «Новые материалы и химия» (производство ППУ) и др. Такое согласование при достаточно высоком уровне развития технологий ССУ позволит осуществлять планирование, распределение и использование потоков СО<sub>2</sub> для производства продукции, необходимой российской экономике, то есть перейти от механизмов регулирования выбросов к управлению ими.

Таблица 10 – Потенциал сокращения выбросов СО<sub>2</sub> за счет его преобразования в ТОП-10 продуктов каждого сценария, млн тСО<sub>2</sub>/год

Длительность хранения	Сценарий	Мировой потенциал			Потенциал России		
		2030	2035	2040	2030	2035	2040
Средне- и долгосрочное	МК НД	2,0	130,1	640,4	0,03	2,1	10,3
	МК ЭП	0,8	114,0	550,3	0,01	1,8	8,6
	НИ НД	-			0,03	1,9	9,5
	НИ ЭП				0,01	1,8	8,6
Краткосрочное	МК НД	3,8	41,2	96,8	0,03	0,7	2,0
	МК ЭП	0,2	5,4	26,3	0,01	0,1	0,3
	НИ НД	-			0,03	0,8	15,6
	НИ ЭП				0,00	0,5	16,0
Совокупные выбросы (условное значение)	МК НД	5,7	171,3	737,2	0,06	2,7	12,3
	МК ЭП	1,0	119,4	576,5	0,02	1,9	8,9
	НИ НД	-			0,06	2,7	25,1
	НИ ЭП				0,02	2,4	24,7

Таким образом, решения, принимаемые сегодня в отношении формирования ОСУ, включая совершенствование ее отдельных технологий, во многом определяют масштабы долгосрочного вклада ССУ не только в сокращение национальных выбросов, которое может варьироваться от сотен тысяч до сотен миллионов тонн СО<sub>2</sub> в год, но и в достижение целей устойчивого развития экономики промышленных отраслей страны.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе исследований, выполненных автором, разработаны теоретические и методологические положения углеродной экономики замкнутого цикла, вносящие существенный вклад в совершенствование научных основ устойчивого развития, что также имеет весомое значение для установления межотраслевых связей в российской промышленности и формирования отрасли секвестрации углекислого газа.

Рекомендации и выводы, сделанные по результатам диссертационного исследования:

1. Интеграция концепций НУР и ЭЗЦ является следствием проблем устойчивого развития промышленных отраслей, накопившихся в текущей климатической политике: дисбаланс глобальных климатических инвестиций; отсутствие прогресса в развитии большинства низкоуглеродных технологий, за исключением ВИЭ; отсутствие прогресса в сокращении глобальных выбросов CO<sub>2</sub>. Решение этих проблем возможно за счет развития научных основ и совершенствования методологии НУР через ее диверсификацию подходами, технологиями и методами концепции ЭЗЦ.

2. УЭЗЦ целесообразно определять как ответ на вызовы и проблемы, наблюдаемые сегодня в теории и практике НУР, предполагающий, что техногенный CO<sub>2</sub> является источником не только отрицательных, но и положительных экстерналий для обеспечения устойчивого развития углеродоемких отраслей промышленности. Реализовать эти экстерналии возможно за счет использования CO<sub>2</sub> в качестве производственного ресурса, что предполагается концепцией УЭЗЦ и проектами ССУ.

3. Структура промышленности, а также изменения, происходящие в ней под влиянием неравномерности глобального экономического развития, являются причиной дисбаланса национальных выбросов ПГ и определяют необходимость диверсификации отраслевых стратегий, механизмов и проектов в области НУР.

4. В настоящее время не существует низкоуглеродных технологий, которые могли бы стать универсальным решением в любых природно-климатических, социально-экономических и нормативно-правовых условиях. Перед стремительно развивавшимися с начала

XXI века ВИЭ в последние годы нарастают проблемы, связанные с недостаточной энергоэффективностью, утилизацией изношенного оборудования, созданием систем хранения и стабилизации выработки энергии. При этом в ряде углеродоемких отраслей применение энергетических технологий для сокращения выбросов не является безальтернативным решением, что требует объективной и взвешенной оценки возможных мер, включая как технологии секвестрации CO<sub>2</sub>, так и экосистемные решения.

5. Эффективное управление выбросами CO<sub>2</sub> в промышленности предполагает распределение и перераспределение потоков углерода за счет реализации мероприятий, инициируемых в социально-экономических системах. Реализуемые в рамках этих мероприятий циклы улавливания, транспортировки, поглощения и преобразования углерода являются процессами, формирующими «углеродный метаболизм» общества.

6. Тенденции роста числа проектов и объема климатических инвестиций, связанных с проектами CCU|S, наблюдаемые в последние несколько лет, свидетельствуют о формировании ОСУ, которая с учетом потенциала проектов CCU позволит связать предприятия-эмитенты CO<sub>2</sub> с многочисленными потребителями продуктов переработки углекислого газа.

7. Инструментарий современной климатической политики, нацеленный на декарбонизацию промышленности, требует перехода от механизмов регулирования выбросов, нацеленных на их предотвращение, к механизмам управления, предполагающим рациональное обращение с потоками углерода, что возможно за счет реализации подходов УЭЗЦ.

8. Разработана модель оценки экономического эффекта от использования кластерного подхода при реализации проектов улавливания промышленного CO<sub>2</sub> от множества стационарных источников, расположенных поблизости, и его транспортировки. Эта модель позволила выявить возможность сокращения совокупных затрат на 15% и более за счет эффекта масштаба при создании элементов совместной инфраструктуры. Потенциал сокращения затрат варьируется в зависимости от числа предприятий, их характеристик, а также относительного расположения.

9. ССУ является группой недооцененных технологий, преимущества развития которых долгое время были неочевидны. Несмотря на это, потенциал сокращения глобальных выбросов CO<sub>2</sub> за счет его утилизации с преобразованием в различные продукты, согласно выполненной оценке, может превышать 3,59 млрд т в год для вариантов со средне- и долгосрочным хранением, а также 3,87 млрд т в год для прочих вариантов. Для России аналогичные прогнозы составляют 61,1 и 251 млн т в год. Учитывая это, в ближайшие годы с высокой вероятностью может наблюдаться масштабирование подобных технологических цепочек, а также появление новых конфигураций пилотных проектов ССУ.

10. Развитие промышленных технологий ССУ требует проведения междисциплинарных исследований на стыке экономики, химии, физики и инженерного дела, а также реализации пилотных проектов, которые позволят: разработать детальную таксономию решений в области утилизации CO<sub>2</sub> с его преобразованием; выполнить серию оценок и расчетов, которые могут лечь в основу разработки ряда справочников наилучших доступных технологий; предоставить российским промышленным компаниям инструменты поиска альтернативных путей сокращения выбросов CO<sub>2</sub>.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Васильцова, В.М. Методические подходы к оценке экономической устойчивости предприятий / В.М. Васильцова, **П.С. Цветков** // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 5(56). – С. 147-151

2. **Цветков, П.С.** Проблемы оценки экономической устойчивости горнодобывающих предприятий / **П.С. Цветков** // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета (Предыдущее название: Известия Санкт-Петербургского университета экономики и финансов (с 1994 по 2014 год)). – 2014. – № 5(89). – С. 132-135.

3. Череповицын, А.Е. Экономическая оценка проектов ССС-EOR на примере месторождений Ямало-Ненецкого автономного

округа / А.Е. Череповицын, **П.С. Цветков**// Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2018. – № 5(61). – С. 62–72.

4. **Цветков, П.С.** Методологические предпосылки формирования концепции углеродной экономики замкнутого цикла / **П.С. Цветков**, А. Андрейчук // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». – 2025. – Т. 20, № 3. – С. 377–401. DOI 10.17072/1994-9960-2025-3-377-401.

5. **Цветков, П.С.** Роль технологий утилизации CO<sub>2</sub> (CCU) в развитии углеродной экономики замкнутого цикла / **П.С. Цветков** // Экономика и управление. – 2025. – Т. 31, № 10. – С. 1329–1338.

6. **Цветков, П.С.** Российский нефтегазовый комплекс в условиях перехода к низкоуглеродному развитию: анализ бизнес-моделей компаний / **П.С. Цветков**, А. Андрейчук, Ю.Н. Васильев// Экономика устойчивого развития. – 2025. – № 3(63). – С. 191-203.

7. **Цветков, П.С.** Углеродная экономика замкнутого цикла как инструмент перехода от принципов регулирования к принципам управления выбросами CO<sub>2</sub> / **П.С. Цветков**, А. Андрейчук, Ю.Н. Васильев // Kant. – 2025. – № 4(57). – с. 156 - 161.

*Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:*

8. Fedoseev, S.V. Statement and Mathematical Characterization of the Task of Assessing the Strategic Potential of Fuel and Energy Industry of Russia / S.V. Fedoseev, A.E. Cherepovitsyn, **P.S. Tsvetkov** // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol. 11, № 16. – pp. 9002–9006.

9. Nikolaichuk, L.A. Prospects of Ecological Technologies Development in the Russian Oil Industry / L.A. Nikolaichuk, **P.S. Tsvetkov** // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol. 11, no. 7. – pp. 5271–5276.

10. **Tsvetkov, P.** Prospects of CCS Projects Implementation in Russia: Environmental Protection and Economic Opportunities / **P. Tsvetkov**, A. Cherepovitsyn // Journal of Ecological Engineering. – 2016. – Vol. 17, no. 2. – pp. 24–32. DOI: 10.12911/22998993/62282

11. **Tsvetkov, P.** Ecological and economic efficiency of peat fast pyrolysis projects as an alternative source of raw energy resources /

- P. Tsvetkov**, A. Strizhenok // Journal of Ecological Engineering. – 2016. - Vol. 17, no. 1. - pp. 56–62. DOI: 10.12911/22998993/6119 0
12. **Tsvetkov, P.** The History, Present Status and Future Prospects of the Russian Fuel Peat Industry / **P. Tsvetkov** // Mires and Peat. – 2017. - Vol. 19. – Art. 14. DOI: 10.19189/Map.2016.OMB.256
13. Федосеев, С.В. Ключевые факторы общественного восприятия проектов захвата и захоронения углекислого газа / С.В. Федосеев, **П.С. Цветков** // Записки Горного института. – 2019. - Т. 237. - С. 361–368. – DOI: 10.31897/PMI.2019.3.361
14. **Tsvetkov, P.** Public perception of carbon capture and storage: A state-of-the-art overview / **P. Tsvetkov**, A. Cherepovitsyn, S.V. Cherepovitsyn // Heliyon. – 2019. - Vol. 5, no. 12. – Art. e02845. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02845
15. **Tsvetkov, P.S.** The Changing Role of CO<sub>2</sub> in the Transition to a Circular Economy: Review of Carbon Sequestration Projects / **P. Tsvetkov**, A. Cherepovitsyn, S. Fedoseev // Sustainability. – 2019. - Vol. 11, no. 20. - Art. 5834. DOI: 10.3390/su11205834
16. **Цветков, П.С.** Анализ специфики организации проектов малотоннажного производства СПГ / **П.С. Цветков**, С.В. Федосеев // Записки Горного института. – 2020. - Т. 246. - с. 678–686. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.10
17. Череповицын, А.Е. Критический анализ методических подходов к оценке устойчивости арктических проектов / А.Е. Череповицын, **П.С. Цветков**, О.О. Евсеева // Записки Горного института. – 2021. - Т. 249. - С. 463–479. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15
18. **Tsvetkov, P.S.** Climate Policy Imbalance in the Energy Sector: Time to Focus on the Value of CO<sub>2</sub> Utilization / **P. Tsvetkov** // Energies. – 2021. - Vol. 14, no. 2. – Art. 411. DOI: 10.3390/en14020411
19. Kopteva, A. Prospects and Obstacles for Green Hydrogen Production in Russia / A. Kopteva, L. Kalimullin, **P. Tsvetkov**, A. Soares // Energies. – 2021. - Vol. 14, no 3. – Art. 718. DOI: 10.3390/en14030718
20. Iakovleva, E. Technical and Economic Analysis of Modernization of Solar Power Plant: A Case Study from the Republic of Cuba / E. Iakovleva, D. Guerra, **P. Tsvetkov**, Y. Shklyarskiy // Sustainability. – 2022. – Vol. 14, no. 2. – Art. 822. DOI: 10.3390/su14020822

21. Andreichuk, A. Study of the Relationship between Economic Growth and Greenhouse Gas Emissions of the Shanghai Cooperation Organization Countries on the Basis of the Environmental Kuznets Curve / A. Andreichuk, **P. Tsvetkov** // Resources. – 2023. - Vol. 12, no. 7. - Art. 80. DOI: 10.3390/resources12070080
22. Buslaev, G. Hybrid system of hydrogen generation by water electrolysis and methane partial oxidation. / G. Buslaev, Al. Lavrik, An. Lavrik, **P. Tsvetkov** // International Journal of Hydrogen Energy. – 2023. - Vol. 48, no. 63. - pp. 24166-24179. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.098
23. **Tsvetkov, P.S.** The impact of economic development of primary and secondary industries on national CO<sub>2</sub> emissions: The case of Russian regions / **P. Tsvetkov**, A. Andreichuk, O. Kosarev // Journal of Environmental Management. - 2023. - Vol. 351. - p. 119881. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.119881
24. **Tsvetkov, P.S.** Heterogeneity of the impact of energy production and consumption on national greenhouse gas emissions / **P. Tsvetkov**, P. Samuseva // Journal of Cleaner Production. – 2024. - Vol. 434. - p. 139638. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139638
25. **Tsvetkov, P.** The research of the impact of energy efficiency on mitigating greenhouse gas emissions at the national level / **P. Tsvetkov**, P. Samuseva, L. Nikolaichyk // Energy Conversion and Management. – 2024. - Vol. 314. - p. 118671. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118671
26. Shabani, Z.D. Do social capital spillovers affect CO<sub>2</sub> emissions? / Z.D. Shabani, **P. Tsvetkov** // Journal of Cleaner Production. – 2025. – Vol. 522. – 146288. DOI 10.1016/j.jclepro.2025.146288
27. **Tsvetkov, P.** The Analysis of Goals, Results, and Trends in Global Climate Policy Through the Lens of Regulatory Documents and Macroeconomics / **P. Tsvetkov**, A. Andreichuk // Sustainability. – 2025. – Vol. 17. – Art. 4532. DOI 10.3390/su17104532
28. **Цветков, П.С.** Кластерный подход к улавливанию и транспортировке промышленного CO<sub>2</sub>: экономия за счет совместной инфраструктуры / **П.С. Цветков** // Записки Горного института. - 2025. - Т. 275. - С.110-129. EDN XPAQUN

*Публикации в прочих изданиях:*

29. Cherepovitsyn, A. Overview of the prospects for developing a renewable energy in Russia / A. Cherepovitsyn, **P. Tsvetkov** // Proceedings of 2017 International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA 2017). – 2017. – Art. 11. – DOI: 10.1109/ICGEA.2017.7925466

30. **Tsvetkov, P.S.** Engagement of resource-based economies in the fight against rising carbon emissions // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8, № 2. – P. 874–883. – DOI: 10.1016/j.egy.2022.05.259

*Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:*

31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019611493 Российская Федерация. Программа оценки экономической эффективности инвестиционного проекта методом Монте-Карло. Заявка № 2019610237: заявл. 10.01.2019; опубл. 28.01.2019; **П.С. Цветков**, А.Е. Череповицын, С.В. Наталенко; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 68 КБ.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025617009 Российская Федерация. Программа для определения параметров кластеров улавливания CO<sub>2</sub>, состоящих из стационарных промышленных источников выбросов. Заявка № 2025615258: заявл. 13.03.2025; опубл. 20.03.2025; **П.С. Цветков**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 33 КБ.

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025662463 Российская Федерация. Программа для автоматизированного поиска территорий, перспективных с точки зрения организации кластеров улавливания CO<sub>2</sub>. Заявка № 2025661398: заявл. 12.05.2025; опубл. 21.05.2025; **П.С. Цветков**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 30 КБ.

34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025663878 Российская Федерация. Программа

для многокритериальной оценки и ранжирования углеродных продуктов, произведенных из техногенного CO<sub>2</sub>. Заявка № 2025662323: заявл. 19.05.2025; опубл. 30.05.2025; **П.С. Цветков**; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 50 КБ.

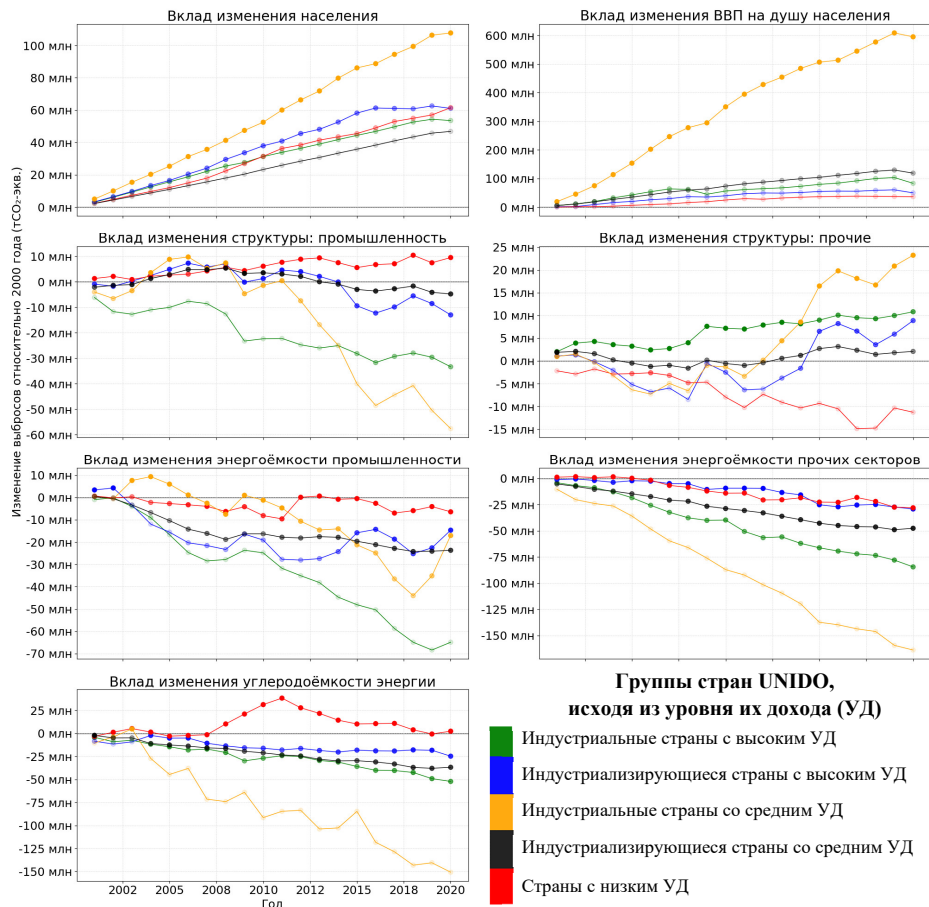


Рисунок 1 – Иерархическая LMDI декомпозиция национальных выбросов

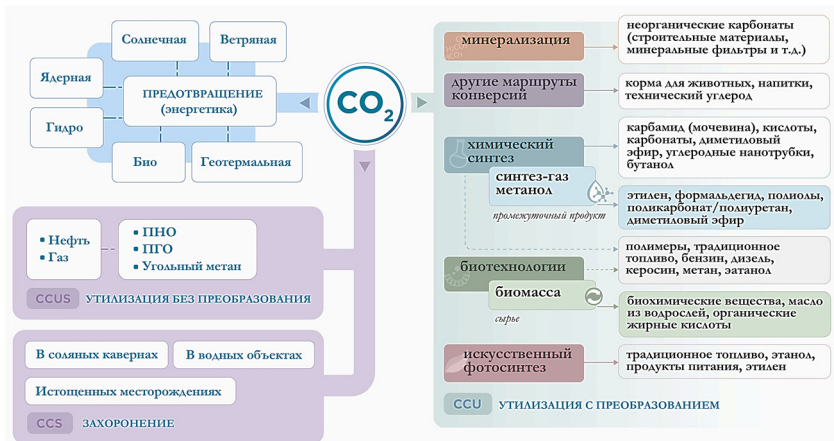


Рисунок 2 – Варианты сокращения выбросов техногенного CO<sub>2</sub> в атмосферу



Рисунок 3 – Прогнозная динамика улавливания CO<sub>2</sub> по отраслям (по данным Международного энергетического агентства)

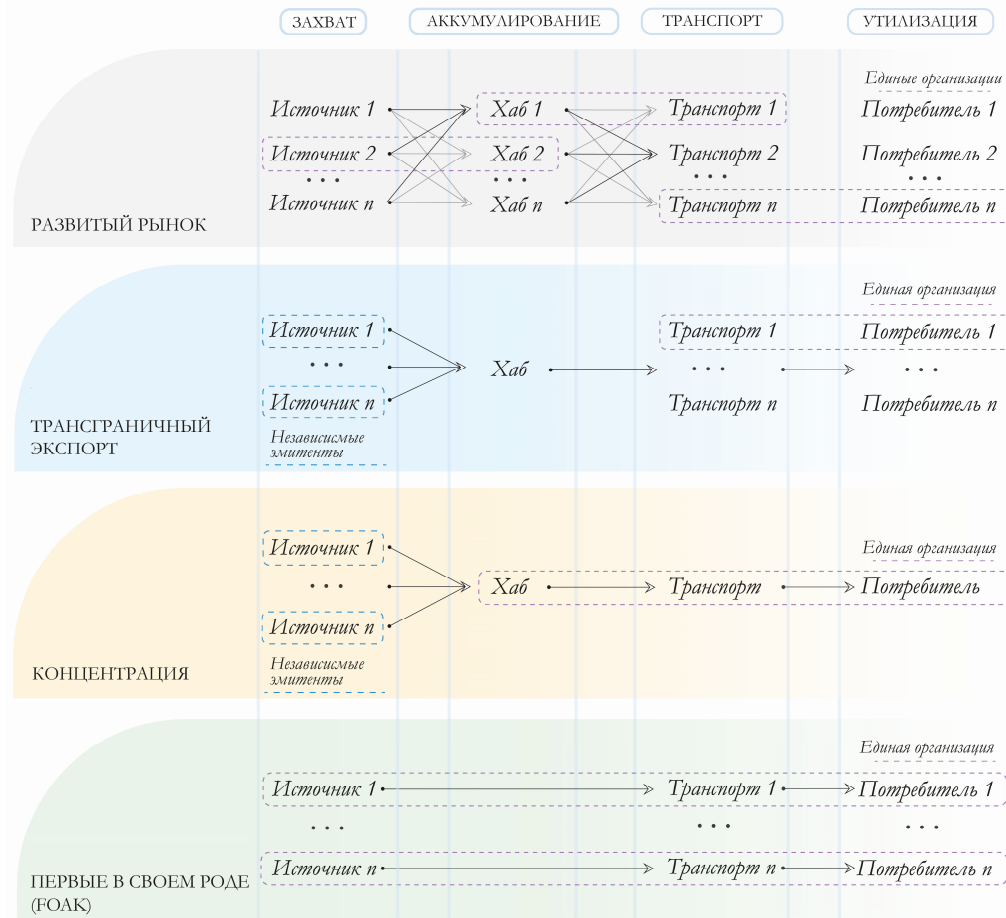


Рисунок 4 - Конфигурации бизнес-моделей проектов CCU|S

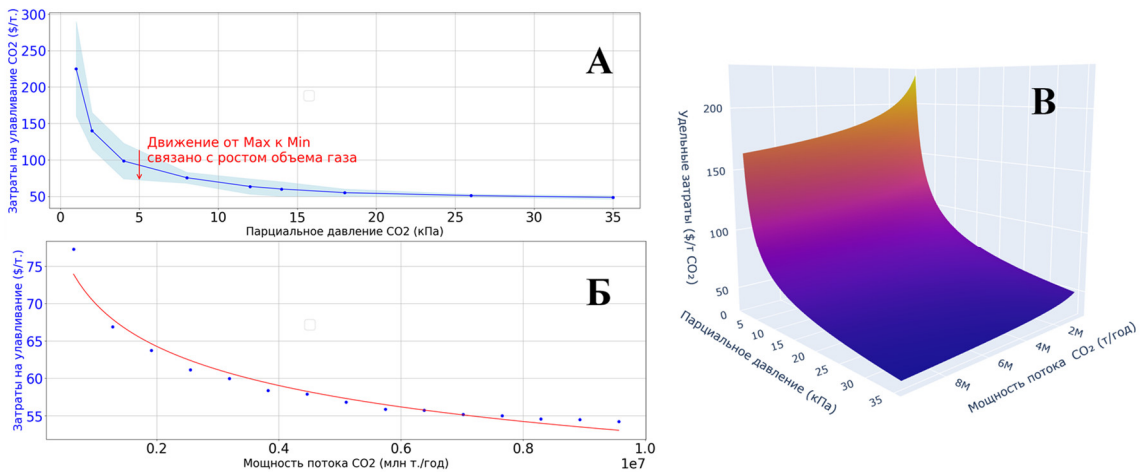


Рисунок 5 - Оценка зависимости затрат на улавливание CO<sub>2</sub> от парциального давления (А), мощности потока (Б) и обоих факторов (В)

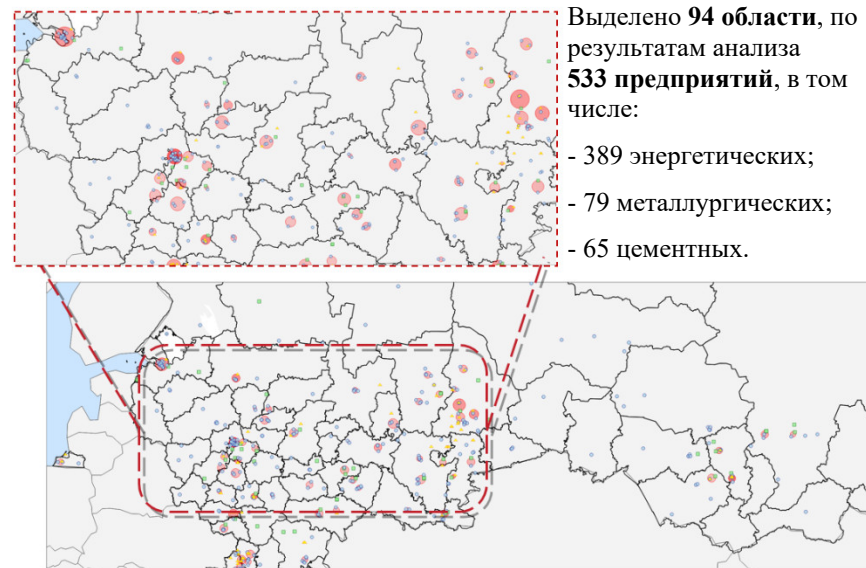


Рисунок 7 – Визуализация результатов поиска областей для организации кластеров улавливания и транспортировки CO<sub>2</sub> на территории РФ

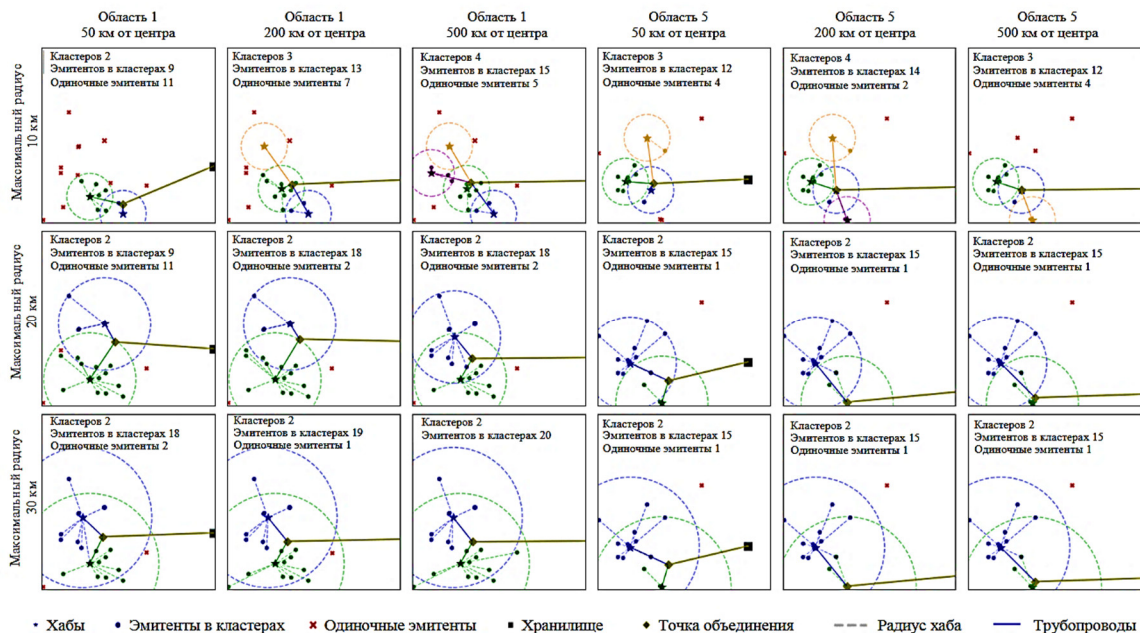


Рисунок 8 – Визуализация пространственной организации кластеров в конфигурациях, предполагающих расположение хранилища в 50, 200 и 500 км от центра, а также максимальный радиус кластера, равный 10, 20 и 30 км

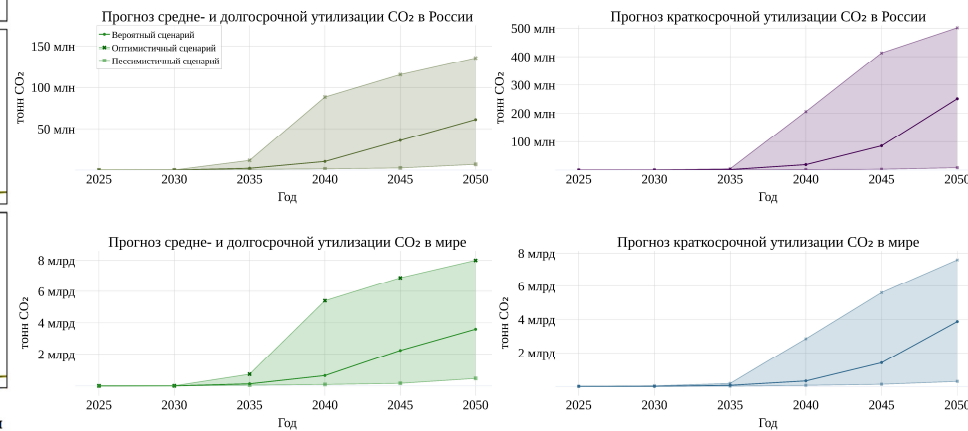


Рисунок 9 – Прогноз утилизации CO<sub>2</sub> с помощью технологий CCU