

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора экономических наук, профессора

Ильинского Александра Алексеевича

на диссертационную работу Цветкова Павла Сергеевича на тему: «Углеродная экономика замкнутого цикла как инструмент устойчивого развития промышленности», представленную на соискание ученой степени доктора экономических наук по специальности 5.2.3. «Региональная и отраслевая экономика» (экономика промышленности).

На рассмотрение представлены:

- диссертация, содержащая 402 страницы машинописного текста, 105 рисунков, 59 таблиц, список литературы из 469 наименований и 18 приложений;
- автореферат, содержащий 47 страницы машинописного текста, 10 рисунков и 10 таблиц.

Актуальность темы диссертационной работы.

Диссертационное исследование посвящено разработке теоретических и методологических основ углеродной экономики замкнутого цикла (УЭЗЦ) – концепции, возникающей на пересечении двух направлений современной экономической науки: низкоуглеродного развития (НУР) и экономики замкнутого цикла (ЭЗЦ). Актуальность темы определяется рядом факторов как глобального, так и национального масштаба.

На глобальном уровне человечество сталкивается с проблемой изменения климата: концентрация CO₂ в атмосфере превысила 400 ppm, объем ежегодных выбросов парниковых газов продолжает расти, а действующие механизмы климатической политики, такие как системы торговли квотами на выбросы, углеродные налоги, обязательства по масштабированию возобновляемой энергетики и т.д., демонстрируют ограниченную эффективность. Межправительственная группа экспертов по изменению климата в своих оценочных докладах неизменно констатирует недостаточный прогресс в сокращении выбросов. Климатические инвестиции распределены крайне неравномерно, а большинство низкоуглеродных технологий, за исключением возобновляемой энергетики, не вышли за рамки пилотных стадий.

В этих условиях наблюдается усиление интереса к технологиям улавливания, утилизации и хранения CO₂ (CCU|S), способным изменить подход к управлению углеродными потоками и перейти от логики предотвращения выбросов к их рациональному использованию в качестве производственного ресурса. Несмотря на потенциал, данная область остается слабо изученной в международной научной литературе, как на теоретико-методологическом, так и на инструментальном уровнях.

С точки зрения национальной экономики актуальность дополнительно подкрепляется задачами, стоящими перед Россией в области реализации климатической политики. Углеродоемкая структура отечественной промышленности (металлургия, цементная промышленность, энергетика и т.д.) делает разработку альтернативных путей декарбонизации, фокусирующихся не только на возобновляемой энергетике, значимой. Достижение «нетто-нулевых» выбросов потребует реализации широкого спектра мероприятий, включая проекты секвестрации CO₂, возможности которых для российской промышленности систематически не оценивались. Данная диссертация вносит вклад в восполнение указанного пробела, что также подтверждает ее актуальность.

Научная новизна диссертационной работы.

К основным элементам научной новизны относятся следующие:

1. Предложена и обоснована концепция УЭЗЦ как самостоятельное научное направление, интегрирующее цели НУР и принципы ЭЗЦ, но обладающее эмерджентными свойствами по

ОТЗЫВ

Вх. № 973 от 24.04.26 1
АУ УС

отношению к ним. Ключевым из них выступает возможность рассмотрения техногенного CO₂ как производственного ресурса, способного создавать положительные экстерналии.

2. Введена и концептуально разработана категория «углеродный метаболизм» – совокупность биогеохимических процессов обмена и преобразования потоков углерода в природных и антропогенных системах, поддающаяся управлению через мероприятия, инициируемые в социально-экономических системах. Данная категория органично вписывается в существующий ландшафт метаболических концепций и восполняет в нем структурные пробелы.

3. Разработана модель оценки экономического эффекта от применения кластерного подхода при реализации проектов улавливания и транспортировки промышленного CO₂, включающая три алгоритмических компонента: минимизация общих затрат всей системы (Greedy Algorithm); оптимизация расположения кластера для минимизации общих затрат (алгоритм последовательного квадратичного программирования); минимизация совокупных транспортных затрат кластеров за счет поиска оптимальной точки соединения трубопроводов (метод Нелдера–Мида). Апробация модели показала возможность снижения совокупных затрат при использовании кластерного подхода на 15% и более.

4. Выполнен авторский прогноз сокращения выбросов CO₂ до 2050 года за счет реализации потенциала технологий его утилизации с преобразованием в продукты переработки углерода. Для России значения составили 61,1 млн т CO₂ в год (для вариантов со средне- и долгосрочным хранением) и 251 млн т CO₂ в год (для вариантов с краткосрочным хранением); для мировой экономики – 3,59 и 3,87 млрд т в год соответственно

5. Выявлены предпосылки, сформулирована гипотеза и предложена концепция формирования «отрасли секвестрации углекислого газа» (ОСУ) как формирующегося сектора экономики. Разработана модель сценарного ранжирования продуктов переработки CO₂ на основе авторской комбинации методов многокритериальной оценки.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования обеспечиваются использованием широкого спектра современных научных методов, репрезентативностью эмпирической базы и логической непротиворечивостью выводов.

Теоретическую основу исследования составили фундаментальные труды в области отраслевой экономики, экологической экономики, экономики окружающей среды, теории устойчивого развития, климатологии и промышленной экологии. Автор опирается на концептуальные основы, предложенные такими международными организациями, как МГЭИК, МЭА, Всемирный банк, что обеспечивает соответствие работы мировому уровню исследований.

Эмпирическая база характеризуется высоким объемом и разнообразием. В работе использованы данные по более чем 100 странам за период 1990–2022 годов, статистика выбросов и энергопотребления из баз данных МЭА, Всемирный банк, Our World in Data, а также официальные данные Росстата и национальных кадастров выбросов РФ. Для анализа динамики выбросов применены эконометрические методы, включая квантильную и квантиль-квантильную регрессию, что позволило выявить нелинейные зависимости показателей национального уровня, которые часто упускаются при использовании традиционных методов.

Надежность результатов моделирования подтверждается использованием алгоритмов, хорошо зарекомендовавших себя при решении научных задач. Например, при поиске географических областей для кластеризации источников выбросов применен алгоритм DBSCAN. Результаты моделирования (снижение затрат на 15% и более) согласуются с данными международных аналитических отчетов, что свидетельствует об адекватности авторской модели.

Методика многокритериальной оценки продуктов переработки CO₂ включает процедуру перекрестной проверки. Использование нескольких методов взвешивания критериев (объективных и субъективных) и их согласование через метод Борда минимизирует риски субъективности экспертных оценок. Сценарный подход позволяет учесть неопределенность будущего развития технологий и рынков, что повышает надежность прогнозных оценок.

Логика исследования выстроена последовательно: от анализа глобальных барьеров и теоретических основ (Главы 1–2) к изучению регуляторных механизмов (Глава 3) и далее к разработке отраслевых решений и инструментов оценки (Главы 4–5). Выводы каждой главы логически вытекают из проведенного анализа и служат основанием для последующих разделов. Рекомендации, сформулированные в заключении, напрямую следуют из полученных результатов и адресованы конкретным стейкхолдерам (органы власти, промышленные компании, научное сообщество).

Таким образом, сочетание теоретического анализа, эконометрического моделирования, алгоритмической оптимизации и сценарного прогнозирования обеспечивает высокую степень достоверности научных положений, выводов и рекомендаций диссертации.

Научные результаты и их ценность.

Диссертация содержит шесть крупных взаимосвязанных блоков научных результатов, каждый из которых раскрыт в соответствующих разделах и отражен в выводах:

1) концептуальное обоснование УЭЗЦ как самостоятельного научного направления (предпосылки и механизм формирования, методологическое наполнение, контекст и специфика практического применения);

2) разработку понятийного аппарата (УЭЗЦ, углеродный метаболизм, отрасль секвестрации углерода, продукты переработки углерода, кластеры улавливания и транспортировки CO₂);

3) пространственно-отраслевой анализ структуры и динамики глобальных, а также российских выбросов CO₂ (разработка авторских эконометрических моделей и алгоритмов выполнения научного анализа);

4) сравнительный анализ регуляторных механизмов декарбонизации и обоснование необходимости перехода от регулирования выбросов к управлению ими (авторский подход к интегрированной оценке регуляторных тенденций и динамики национальных выбросов парниковых газов на основе LMDI декомпозиции, разработка предложений по повышению эффективности существующих мер регулирования);

5) модель кластерного анализа для оптимизации инфраструктуры улавливания CO₂ с апробацией на российских данных (уточнение зависимости затрат на улавливание промышленного CO₂ от мощности потока газа и парциального давления диоксида углерода, формулировка принципов и разработка модели оценки экономических эффектов организации кластеров);

6) прогнозные оценки теоретического потенциала сокращения выбросов CO₂ для российской и мировой экономики до 2050 года за счет технологий его улавливания и утилизации (синтез разрозненной технико-экономической информации о продуктах переработки углекислого газа, разработка методики их многокритериальной оценки, разработка и реализация подхода к построению сценарного прогноза сокращения выбросов).

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, в 21 статье – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus, большая

часть которых относится к 1 и 2 квартилям, а также в 2 материалах конференций Scopus. Получены 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методологического аппарата отраслевой экономики, экономики устойчивого развития, экономики окружающей среды и экологической экономики, позволяющего преодолеть разрыв между концепцией низкоуглеродного развития и экономикой замкнутого цикла. Введено понятие «углеродный метаболизм», которое расширяет теорию социального и промышленного метаболизма, добавляя спецификацию углеродных потоков. Это создает основу для системного моделирования углеродных циклов. Предложен учет положительных экстерналий выбросов CO₂, что вносит вклад в теорию общественных благ и интернализации внешних эффектов. Результаты исследования докладывались на 11 международных научно-практических конференциях, что свидетельствует об интересе мирового научного сообщества к материалам данной диссертации.

Практическая значимость результатов исследования высока и подтверждается возможностью их непосредственного внедрения в деятельность органов государственной власти и промышленных предприятий. Это подтверждается актами внедрения результатов диссертационного исследования в деятельность ФГАУ «НИИ «ЦЭПП», ФГБУ «ВНИИ Экология», ПАО «Газпром», ПАО «ОГК-2», АО «НЦ ВостНИИ», ПАО «Камаз», ФГАОУ ВО «СПбПУ», Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, прошедшими экспертное рассмотрение на совещании Министерства энергетики Российской Федерации.

Рекомендации по использованию результатов работы.

Результаты диссертационного исследования представляются эффективными для использования в рамках следующих направлений:

1. В сфере государственного управления при разработке и актуализации отраслевых стратегий низкоуглеродного развития, формировании таксономии зеленых и переходных проектов, а также при планировании мероприятий в рамках национальных проектов («Экологическое благополучие», «Эффективная и конкурентная экономика», «Новые материалы и химия»), подготовке позиций на международных климатических переговорах. Предложения по созданию межведомственного координационного совета по развитию отрасли секвестрации CO₂ также имеют прямое прикладное значение.

2. В корпоративном планировании и управлении при разработке стратегий декарбонизации крупными предприятиями металлургической, цементной и энергетической отраслей, формировании инвестиционных программ в области реализации проектов низкоуглеродного развития, оценке потенциала развития проектов производства продуктов переработки углекислого газа.

3. В образовательной деятельности материалы диссертации могут быть включены в университетские программы подготовки по направлениям «Экономика» и «Менеджмент», в курсы по устойчивому развитию, экономике окружающей среды, технологическому предпринимательству.

4. В научно-исследовательской деятельности как основа для проведения дальнейших исследований в области разработки таксономии технологий утилизации CO₂, управления межотраслевыми углеродными балансами, совершенствования рыночных механизмов оборота продуктов переработки CO₂, сравнительного анализа регуляторных моделей поддержки проектов секвестрации углекислого газа в разных юрисдикциях, моделирования логистических цепочек CCU|S, а также совершенствования теории и методологии устойчивого развития промышленности.

Замечания и вопросы по работе.

1. В диссертации разработана концепция УЭЗЦ (Глава 1) и предложена последовательность действий для запуска масштабной исследовательской программы по изучению потенциала утилизации CO₂ (раздел 3.3). Однако не вполне понятно, на какие именно действующие институциональные механизмы практическая реализация концепции и эта программа могут опираться в настоящее время. Какие действующие инструменты климатической политики России могут выступить в качестве «точек входа» для предлагаемых решений?

2. В работе технологии утилизации CO₂ (CCU) представлены как элемент альтернативной методологии низкоуглеродного развития. При этом в зарубежной литературе высказывается критика, согласно которой CCU может использоваться как инструмент «откладывания» структурной перестройки промышленности, сохраняя устаревшие технологические уклады. Разделяет ли автор эту критику применительно к российским условиям? Каким образом текущая геополитическая ситуация (санкции, разрыв цепочек поставок технологий, переориентация экспорта энергоносителей) меняет баланс между CCU и другими направлениями декарбонизации (ВИЭ, повышение энергоэффективности, электрификация, экосистемные услуги) в кратко- и среднесрочной перспективе?

3. В диссертации обосновывается необходимость перехода к новым производственным моделям на основе УЭЗЦ и технологий CCU/S. Однако в работе практически не затронуты социально-трудовые аспекты этого перехода. Между тем, опыт стран, осуществляющих энергетический переход, показывает, что такие изменения сопряжены с необходимостью массового переобучения персонала, формирования новых компетенций (в частности, в области химической инженерии, геологического моделирования, логистики CO₂) и, вероятно, сокращения рабочих мест в некоторых традиционных секторах. Как автор оценивает масштаб этих социальных последствий применительно к российской промышленности? Какие механизмы могли бы быть задействованы для смягчения негативных эффектов?

4. В диссертации УЭЗЦ рассматривается как инструмент декарбонизации промышленности. Вместе с тем, транспортный сектор, по данным, приведенным в самой работе (рисунки 23 и 24, таблица 16), генерирует значительный объем выбросов CO₂. Не вполне понятно, может ли предложенная концепция быть применена к этой сфере, помимо производства низкоуглеродного топлива, о чем говорится в Главе 5? Если да, то каковы основные барьеры на этом пути?

5. В заключении диссертации (стр. 306) автор указывает на необходимость проведения междисциплинарных исследований на стыке экономики, химии, физики и инженерного дела в области технологий CCU. Вместе с тем, опыт развития возобновляемой энергетики в России и других странах показывает, что значительная часть технологических решений импортируется, преимущественно из Китая, который занял лидирующие позиции в этом сегменте. Чем область CCU принципиально отличается от ВИЭ с точки зрения целесообразности импорта технологий? Являются ли технологии улавливания, транспортировки и преобразования CO₂ специфичными или чувствительными с точки зрения национальной безопасности, что их разработка должна вестись преимущественно силами отечественной науки? Не было бы более прагматичной стратегией выделить узкие, критически важные сегменты (например, катализаторы для процессов конверсии), сфокусировать исследования на них, а для остальных направлений использовать импортные решения?

Заключение

Диссертационная работа «Углеродная экономика замкнутого цикла как инструмент устойчивого развития промышленности», представленная на соискание ученой степени доктора экономических наук по специальности 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономика

промышленности), полностью отвечает требованиям раздела 2 «Положения о присуждении ученых степеней» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II», утвержденного приказом ректора Санкт-Петербургского горного университета от 20.05.2021 № 953 адм, а ее автор Цветков Павел Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени доктора экономических наук по специальности 5.2.3. Региональная и отраслевая экономика (экономика промышленности).

Я, Ильинский Александр Алексеевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

профессор Высшей школы производственного менеджмента, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доктор экономических наук (по специальности 08.00.05 «Экономика и управление народным хозяйством»), профессор



Ильинский Александр Алексеевич

« 08 » марта 2026 г.

Сведения об официальном оппоненте:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Адрес: ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург, 195251.

Телефон: +7 (812) 775-05-30.

Email: iliinskij_aa@spbstu.ru.

