

УДК 330.3

<http://doi.org/10.35854/1998-1627-2025-10-1329-1338>

Роль технологий утилизации CO₂ (CCU) в развитии углеродной экономики замкнутого цикла

Павел Сергеевич Цветков*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, pscvetkov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3049-7893>*

Аннотация

Цель. Оценка глобального и российского потенциала сокращения выбросов техногенного CO₂ за счет технологий его утилизации с производством различных видов углеродсодержащей продукции (CCU), а также рассмотрение этих технологий в качестве элемента концепции углеродной экономики замкнутого цикла как перспективного направления снижения антропогенных выбросов CO₂ в условиях трансформации мировой климатической политики.

Задачи. Осуществить сбор и систематизацию актуальной информации о текущем уровне развития технологий преобразования CO₂ в различные виды продукции; выполнить анализ конъюнктуры рынков этой продукции; провести оценку потенциала сокращения выбросов на период до 2050 г.

Методология. Методология исследования складывается из нескольких этапов, предусматривающих процессы от сбора и предобработки исходных данных до построения прогноза. На первых этапах применены подходы маркетингового анализа для выделения ключевых отраслевых трендов и тенденций. Использован анализ жизненного цикла продукции, производство которой возможно за счет CCU. После систематизации и унификации информации о каждом продукте выполнено моделирование процесса их выхода на существующие рынки (с учетом динамики этих рынков) с помощью логистической функции.

Результаты. При производстве из CO₂ продукции, характеризующейся длительным сроком хранения углерода, глобальный потенциал сокращения выбросов может достигать 3,6 млрд тонн CO₂ в год, а в вариантах с краткосрочным хранением — до 3,9 млрд тонн CO₂ в год. Для России эти значения составляют 61 и 251 млн тонн CO₂ в год соответственно, которые при благоприятных сценариях могут возрасти до 136 и 501 млн тонн CO₂ в год.

Выводы. Определены ключевые риски развития проектов CCU, такие как высокая капиталоемкость, длительные сроки реализации, технологические барьеры улавливания и утилизации CO₂. Показано, что CCU представляет собой пока недооцененную, но стратегически значимую группу низкоуглеродных технологий, способную в перспективе поддержать баланс между промышленным развитием и достижением климатических целей. Сделан вывод о том, что развитие углеродной экономики замкнутого цикла соответствует национальным интересам России и может стать значимым элементом новой климатической повестки, ориентированной на рациональное использование ресурсов и технологическую модернизацию.

Ключевые слова: углеродная экономика замкнутого цикла, низкоуглеродное развитие, устойчивое развитие, CO₂, смягчение последствий изменения климата, секвестрация CO₂, утилизация CO₂

Для цитирования: Цветков П. С. Роль технологий утилизации CO₂ (CCU) в развитии углеродной экономики замкнутого цикла // *Экономика и управление*. 2025. Т. 31. № 10. С. 1329–1338. <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2025-10-1329-1338>

The role of CO₂ capture and utilization technologies (CCU) in the development of a circular carbon economy

Pavel S. Tsvetkov

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia, pscvetkov@yandex.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-3049-7893>

Abstract

Aim. The work aimed to assess the global and Russian potential for reducing technogenic CO₂ emissions through carbon utilization technologies with the production of various types of carbon-containing products (CCU), and to consider these technologies as an element of the concept of a carbon circular economy as a promising way to reduce anthropogenic CO₂ emissions in the context of the global climate policy transformation.

Objectives. The work seeks to collect and systematize up-to-date information on the current level of development of CO₂ conversion technologies into various types of products, to analyze the market conditions for these products, and assess the potential for emissions reductions for the period up to 2050.

Methods. The research methodology consists of several stages, including the collection and pre-processing of initial data to forecasting. In the initial stages, marketing analysis approaches were applied to identify key industry trends and tendencies. The work applied a life cycle analysis of products, which manufacture is possible through CCU. After systematizing and standardizing the information on each product, their entry into existing markets was modeled (taking into account the trends in these markets) using a logistics function.

Results. For the production of CO₂-derived products, characterized by long-term carbon storage, the global emission reduction potential could reach 3.6 billion tons of CO₂ per year, and up to 3.9 billion tons of CO₂ per year for options with short-term storage. For Russia, these values are 61 and 251 million tons of CO₂ per year, respectively, which, under favorable scenarios, could increase to 136 and 501 million tons of CO₂ per year.

Conclusions. The work identified key risks associated with the development of CCU projects, including high capital intensity, long implementation periods, and technological barriers to CO₂ capture and utilization. CCU represent an undervalued but strategically significant group of low-carbon technologies, potentially capable of maintaining a balance between industrial development and achieving climate goals. It was concluded that the development of a Carbon circular economy is among Russia's national interests and could become a significant element of the new climate agenda focused on the rational use of resources and technological modernization.

Keywords: Carbon circular economy, low-carbon development, sustainable development, CO₂, climate change mitigation, CO₂ sequestration, CO₂ utilization

For citation: Tsvetkov P.S. The role of CO₂ capture and utilization technologies (CCU) in the development of a circular carbon economy. *Ekonomika i upravlenie = Economics and Management*. 2025;31(10): 1329-1338. (In Russ.). <http://doi.org/10.35854/1998-1627-2025-10-1329-1338>

Введение

Современная мировая климатическая политика демонстрирует ограниченную эффективность в достижении целей по сокращению выбросов парниковых газов. Исключением стал лишь кратковременный спад выбросов во время локдаунов, вызванных пандемией коронавирусной инфекции COVID-19. Выход США из Парижского соглашения еще больше подорвал устойчивость международных климатических договоренностей [1], что, на наш взгляд, неизбежно приведет к изменению глобальной

климатической повестки в ближайшие годы. В этих условиях ключевую роль, вероятно всего, начнут играть страны БРИКС, обладающие растущим экономическим и технологическим потенциалом.

Складывающаяся ситуация открывает для России возможности укрепления позиций в международной климатической политике и формирования новой повестки, в которой приоритет будет отдан национальным интересам, технологическому развитию и рациональному использованию природного потенциала [2]. Страна располагает значительными научными, промышленными

и ресурсными возможностями, что позволяет ей претендовать на роль одного из разработчиков альтернативной модели климатического регулирования.

Однако реализация подобного сценария сопряжена с рядом политических и институциональных рисков. Один из ключевых состоит в необходимости международного признания вклада российских лесоклиматических проектов в глобальные процессы декарбонизации. Эти проекты обладают высоким потенциалом, но требуют подтверждения на уровне международных стандартов учета углеродных единиц и систем верификации [3]. При этом нарастают темпы технологической трансформации мировой экономики, игнорирование которых может привести к утрате конкурентных преимуществ и ограничению доступа к новым рынкам.

В связи с этим перспективным для таких ресурсоориентированных стран, как Россия, представляется развитие углеродной экономики замкнутого цикла (УЭЗЦ). Это самостоятельное междисциплинарное направление, основанное на принципах низкоуглеродного развития и концепции экономики замкнутого цикла [4]. Концепция УЭЗЦ сегодня находится на начальном этапе становления, но тем не менее является перспективным направлением, способным стать инструментом технологической диверсификации в рамках формирования комплексных стратегий управления выбросами CO₂. УЭЗЦ может дополнить лесоклиматические инициативы и обеспечить переход от преимущественно природных решений, связанных с компенсацией выбросов углекислого газа, к более сбалансированной модели, включающей и технологические подходы.

Основной инструмент УЭЗЦ — технологии улавливания, транспортировки, использования и хранения углекислого газа (CCU|S), которые в течение последних лет стали предметом дискуссий в широком контексте [5; 6]. Существует два главных подхода к оценке их роли в мировой декарбонизации. Согласно первой точке зрения, CCU|S-технологии являются временной ме-

рой, а в ряде случаев — избыточной, оправданной лишь для энергоемких отраслей (цементной, химической, сталелитейной, нефтеперерабатывающей и электроэнергетики). Сторонники альтернативной позиции утверждают, что без масштабного внедрения таких технологий достичь глобальных климатических целей невозможно.

Несмотря на отсутствие консенсуса в научном сообществе, объемы финансирования CCU|S быстро растут. По данным McKinsey, в ближайшее десятилетие ежегодные инвестиции в этот сектор могут достичь 175–196 млрд долл. США^{1, 2} что почти в 17 раз превышает уровень 2023 г. (11,5 млрд долл. США). Более половины средств будет направлено на улавливание CO₂, около четверти — на его захоронение, сопоставимый объем — на транспортировку.

Динамика роста числа проектов также растущая: если за 1982–2019 гг. заявлено 122 проекта мощностью более 100 тыс. тонн CO₂ в год (или 1 тыс. тонн для DAC-технологий), то в 2020–2021 гг. — 257, а в 2022–2023 гг. — свыше 420³. Согласно данным IEA, к 2030–2035 гг. совокупная мощность систем улавливания CO₂ может достичь 424–440 млн тонн в год по сравнению с 65 млн тонн в 2024 г.

Указанные оценки лишь в малой степени охватывают сферу утилизации CO₂ (CCU), с учетом которой общий объем капиталовложений может превысить 250 млрд долл. США, а количество проектов может увеличиться на десятки. Направление CCU, предполагающее переработку углекислого газа в новые продукты (например, строительные материалы, топлива, химические соединения) [7], остается одним из наиболее недооцененных сегментов CCU|S. Основные причины этого заключаются в следующем.

1. Проекты CCU, как правило, имеют ограниченный масштаб [8] и не создают эффекта, сопоставимого с крупными системами захоронения CO₂.

2. До сих пор отсутствуют комплексные оценки потенциала рынков углеродсодержащей продукции, которая может быть произведена в рамках проектов CCU (CP-CCU) [9],

¹ *Hetal Gandhi*. CCUS: The US\$196 billion investment opportunity // Wood Mackenzie. June 26. 2024. URL: <https://www.woodmac.com/news/opinion/ccus-196-billion-investment-opportunity/> (дата обращения: 20.05.2025).

² *Global Energy Perspective 2023: CCUS outlook* // McKinsey. January 24. 2024. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023-ccus-outlook> (дата обращения: 20.05.2025).

³ *CCUS Projects Database* // IEA. April. 2025. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/ccus-projects-database> (дата обращения: 15.06.2025).

Перечень рассмотренных видов CP-CCU

Table 1. List of considered CP-CCU

| Отрасль потребления | CP-CCU |
|---|--|
| Химическая и нефтехимическая промышленность | Ацетальдегид, ацетон, бензол, бутадиен, толуол, ксилол, этилен, окись этилена, пропилен, пропилен оксид, метанол , изопропанол, пропанол, синтез-газ , угарный газ, формальдегид, полиэтилен, полипропилен, полиметилметакрилат, поликарбонат, полиоксиметилен, полиолы, изоцианаты, диметиловый эфир , диметилкарбонат, диэтилкарбонат, этиленкарбонат, пропиленкарбонат, глиоксиловая кислота |
| Фармацевтика и медицина | Бензойная кислота, салициловая кислота, муравьиная кислота, щавелевая кислота, карбамид , этанол |
| Пищевая промышленность | Пищевой CO ₂ , уксусная кислота, этанол , бикарбонат натрия, пропионовая кислота |
| Сельское хозяйство | Корма для животных, CO ₂ для теплиц, карбамид |
| Строительные материалы | Бетон, карбонат кальция, карбонат магния, кирпич, строительные наполнители |
| Топливо и энергетика | Биодизель, авиационное топливо, метан, метанол , диметиловый эфир , синтез-газ , угарный газ |
| Лакокрасочная и полимерная промышленность | Акриловая кислота, метилметакрилат, технический углерод |
| Электроника и новые материалы | Графен |

Примечание: выделены CP-CCU, потребляемые более чем в одной из указанных отраслей.

Источник: составлено автором.

и действенные механизмы государственной поддержки.

3. Уровень технологической зрелости в кластере CCU неравномерен [10]: наряду с передовыми решениями, превалируют малоэффективные, экспериментальные разработки, создающие искаженное восприятие отрасли.

Тем не менее, по прогнозам Boston Consulting Group и Oil&Gas Climate Initiative¹, в течение следующих 20–25 лет на технологии утилизации CO₂ может приходиться до трети от объема улавливаемого углекислого газа. Наиболее перспективными направлениями считают производство строительных материалов (в частности, бетона и минеральных наполнителей), синтетических топлив и метанола. Потенциальное годовое потребление CO₂ по указанным направлениям оценивают в сотни миллионов тонн.

Методология

Для углубления понимания возможностей данного направления сокращения выбросов CO₂ проведен анализ более 50 видов CP-CCU, показанных в таблице 1. Эти продукты находят применение в разных секторах: от строительства и энергетики до химической промышленности и сельского хозяйства.

¹ Owolabi B., Sarkar R., Sudmeijer B., Clayton C. Fulfilling the Promise of Carbon Capture and Utilization // BCG & OGCI. July 26. 2024. URL: <https://www.bcg.com/publications/2024/four-applications-of-carbon-capture-and-utilization> (дата обращения: 16.06.2025).

Такая диверсификация потребителей способна обеспечить стабильный спрос на CO₂ как на промышленное сырье.

Ввиду отсутствия единой базы данных и разрозненности информации для каждого продукта проведен точечный сбор информации, сформированы прогнозы на основе уровня технологической готовности (TRL) [11]. Для описания динамики выхода CP-CCU на рынок в рамках настоящего исследования применен метод моделирования, основанный на использовании S-образной кривой (логистической функции). Такой подход широко распространен в научной и аналитической литературе [12], поскольку логистические модели (1) позволяют достоверно отражать эволюцию сложных систем, при которых темпы роста зависят от стадии жизненного цикла технологии или продукта:

$$f(t) = \frac{M}{1 + e^{-kt}}, \quad (1)$$

где M — предельное значение функции; t — вектор параметров; k — коэффициент, характеризующий скорость изменения функции.

Исторически концепция логистической кривой возникла в биологии для описания процессов популяционного роста, отражающих постепенное насыщение экосистемы

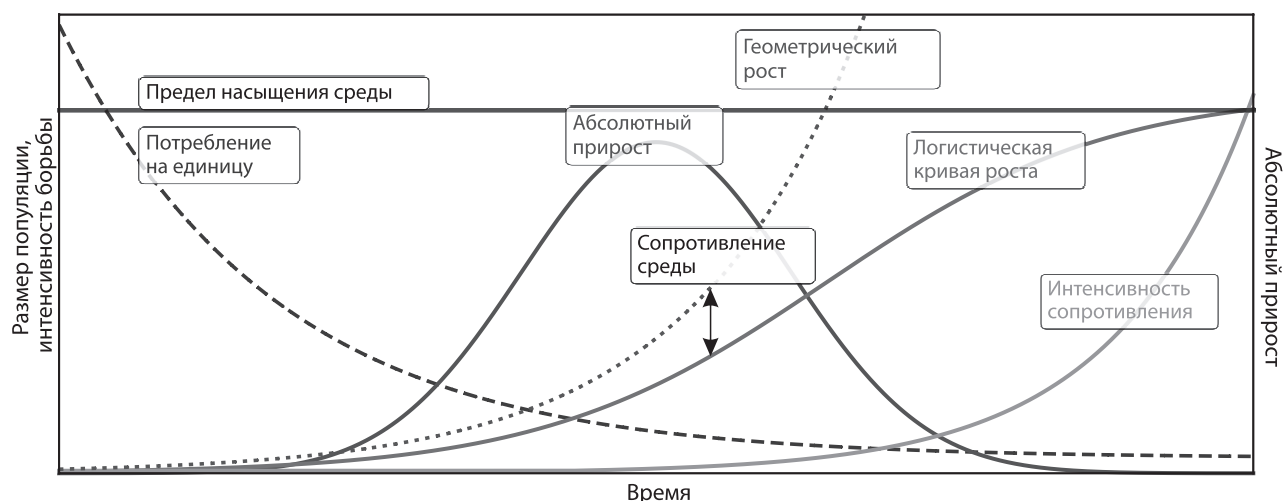


Рис. 1. Визуализация смысла логистической кривой в естественных науках
 Fig. 1. Visualization of the logistic curve meaning in natural sciences

Источник: составлено автором на основе [14].

Таблица 2

Основные допущения сценарного прогноза
 Table 2. Main assumptions of the scenario forecast

| Параметр | Сценарии | | |
|---|---|-------------|------------|
| | Негативный | Нейтральный | Позитивный |
| Точки перегиба логистической кривой, год | 2040 | 2035 | 2030 |
| Доля CP-CCU на рынке к 2050 г., % | 20 | 30 | 40 |
| Количество лет на преодоление одного уровня TRL | 3 | 2,5 | 2 |
| Дополнительный учет рисков | Технологии с текущим TRL5 и ниже не смогут достичь TRL9 | | – |

Источник: составлено автором.

по мере исчерпания доступных ресурсов. Этот принцип оказался универсальным и впоследствии получил широкое применение в экономике, инновационном менеджменте и технологическом прогнозировании [13]. По своей природе развитие технологий и выход новых продуктов на рынок подчиняются таким же закономерностям: быстрый рост сменяется замедлением по мере достижения рыночного насыщения и повышения конкуренции, как видно на рисунке 1.

В контексте настоящего исследования момент достижения технологией уровня готовности TRL9 рассматривается как точка, при которой CP-CCU становится конкурентоспособной функционально, а также по цене, в сравнении с традиционными аналогами. Именно это состояние принято за исходную фазу логистической кривой, отражающую начало активного коммерческого

распространения технологии. Кроме того, при построении прогностической модели применен сценарный подход, предусматривающий анализ различных траекторий развития рынка. Некоторые предпосылки, ограничения и параметры сценариев представлены в таблице 2.

Переломный момент (точка перегиба кривой) ожидается в 2030–2040 гг., когда планируется ввод значительного объема производственных мощностей, связанных с секвестрацией CO₂. На основе этого построено три сценария выхода CP-CCU на рынок, отраженных на рисунке 2, с предельными значениями рыночного охвата 20, 30 и 40 %.

Такая оценка представляется консервативной с учетом текущих климатических обязательств стран и планов по достижению углеродной нейтральности. Согласно ряду исследований¹, к 2050 г. выбросы CO₂

¹ Net zero roadmap: A global pathway to keep the 1.5 °C goal in reach // IEA. September 26. 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-roadmap-a-global-pathway-to-keep-the-15-c-goal-in-reach> (дата обращения: 16.06.2025).

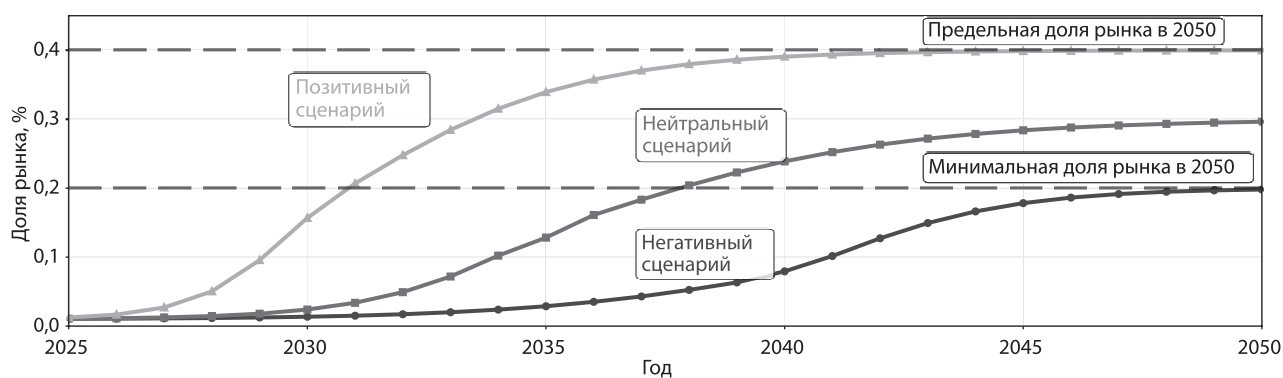


Рис. 2. Сценарии охвата доли рынка CP-CCU
Fig. 2. CP-CCU market share scenarios

Источник: построено автором.

в цементной промышленности могут сократиться до 79 млн тонн (3,27% от уровня 2022 г.), а в химической — до 45 млн тонн (3,39%). При этом объемы улавливания углекислого газа возрастут многократно:

- в химической отрасли — в 86 раз (от 4 млн тонн в 2022 г. до 344 млн тонн);
- в цементной — от 0 до 1,31 млрд тонн;
- в металлургии — от 1 до 399 млн тонн.

Результаты и обсуждение

Проведенное моделирование позволило оценить совокупный потенциал сокращения выбросов углекислого газа за счет внедрения технологий CCU в глобальном масштабе. Согласно полученным данным, при реализации сценариев, предусматривающих длительное хранение углерода в составе производимых материалов (например, минеральных наполнителей и строительных композитов), совокупное сокращение выбросов может достигать около 3,6 млрд тонн CO₂ в год, как показано на рисунке 3. Варианты с краткосрочным хранением углерода (например, в топливах или химических продуктах с коротким жизненным циклом) способны обеспечить снижение выбросов на 3,9 млрд тонн CO₂ в год.

Для Российской Федерации с учетом структуры промышленного производства и ресурсной базы аналогичные расчетные значения составляют около 61 млн тонн и 251 млн тонн CO₂ в год соответственно. При благоприятных сценариях, в условиях ускоренной технологической адаптации, расширения внутреннего спроса на CP-CCU и эффективной государственной поддерж-

ки, эти показатели могут возрасти до 136 и 501 млн тонн CO₂ в год.

Приведенные оценки носят прогнозный характер, сопровождаются высокой степенью неопределенности. Это обусловлено множеством внешних и внутренних факторов, влияющих на динамику развития низкоуглеродных технологий. Среди ключевых рисков и ограничений, способных затормозить развитие этого направления можно выделить следующие.

1. Высокая капиталоемкость и низкая рентабельность. Согласно прогнозам McKinsey, к 2046–2050 гг. среднегодовые инвестиции в сектор секвестрации CO₂ могут варьироваться от 16 до 100 млрд долл. США, в зависимости от сценария. Однако для достижения углеродной нейтральности потребуется не менее 120 млрд долл. ежегодно, что создает значительный инвестиционный разрыв.

2. Длительные сроки реализации и ввода проектов. По данным базы IEA, средняя продолжительность подготовки, строительства и выхода на проектную мощность составляет от 5 до 7,5 лет. Это делает отрасль инерционной и снижает ее способность быстро реагировать на изменения рыночной конъюнктуры и политических приоритетов.

3. Технологические барьеры. Сегодня именно процессы улавливания CO₂ остаются наиболее затратным и технологически сложным звеном в целом цепочки CCU|S. Их стоимость по-прежнему составляет значительную долю совокупных издержек, что существенно снижает экономическую привлекательность многих проектов.

4. Ограниченные знания и недостаток рыночных стимулов в области утилизации CO₂.

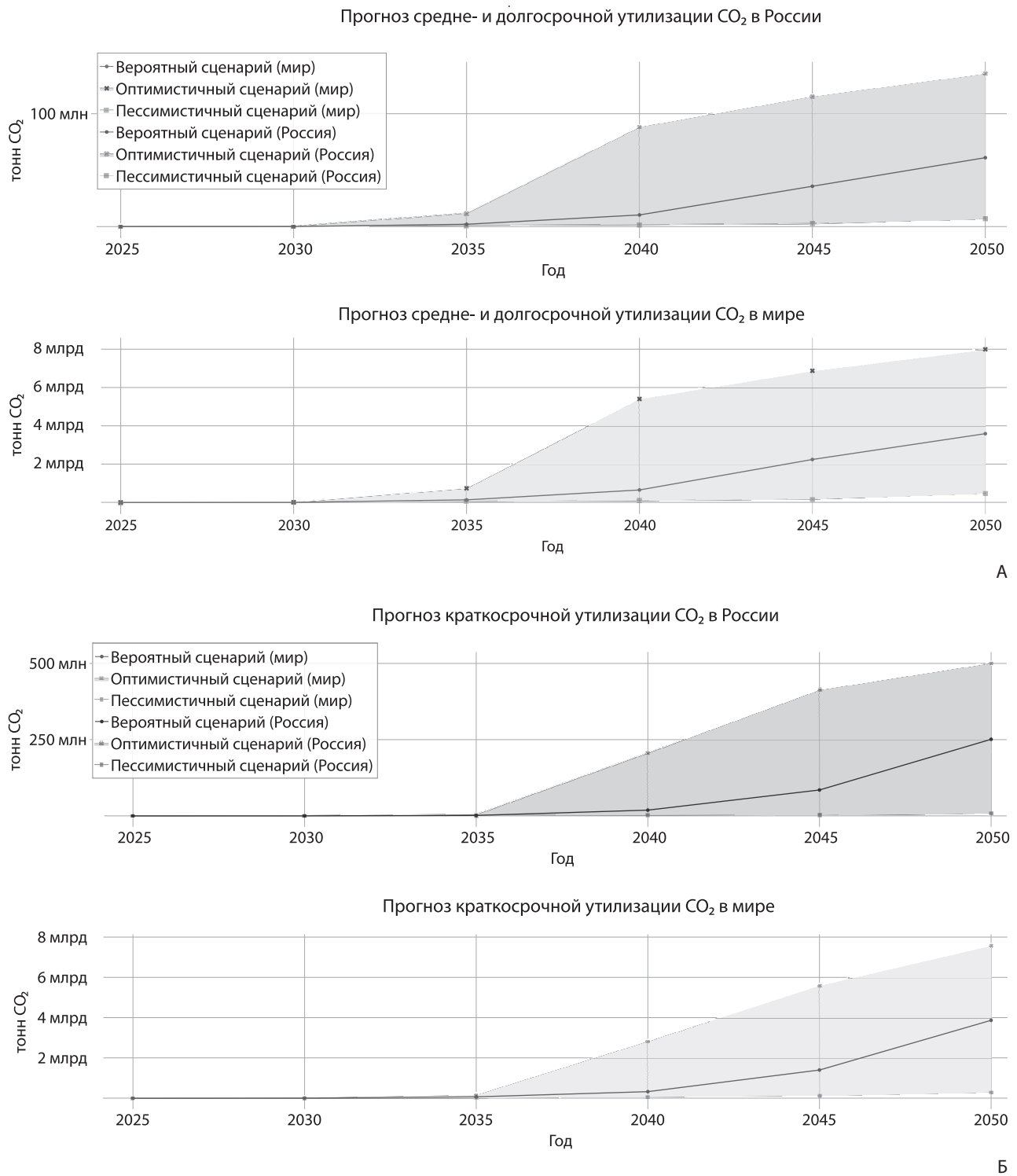


Рис. 3. Прогноз утилизации CO₂ с помощью технологий CCU
 Fig. 3. CO₂ utilization forecast using CCU technologies

Источник: построено автором.

Несмотря на наличие десятков экспериментальных и пилотных проектов по конверсии углекислого газа в различные виды продукции (топливо, пластики, минеральные материалы и др.), большинство из них пока не демонстрирует устойчивой коммерческой эффективности.

Кроме того, сохраняется институциональная неопределенность, связанная с нехваткой унифицированных стандартов верификации и учета углеродных единиц, полученных в результате реализации CCU-проектов. Это препятствует их интеграции в международные системы торговли

квотами и ограничивает приток внешнего капитала.

Выводы

Подводя итог, укажем, что кластер технологий ССУ представляет собой одно из перспективных, но по-прежнему недооцененных направлений глобальной климатической повестки. На протяжении последних десятилетий внимание мировой общественности и инвесторов сосредоточено преимущественно на развитии возобновляемой энергетики, тогда как потенциал УЭЗЦ оставался в тени. Однако по мере проявления барьеров дальнейшего масштабирования традиционных климатических мер и потребности в диверсификации решений интерес к УЭЗЦ, в частности ССУ, стремительно повышается.

В ближайшие годы можно ожидать масштабирования существующих технологи-

ческих цепочек, от пилотных проектов до промышленных комплексов, а также появления новых гибридных конфигураций, сочетающих улавливание, переработку и промышленное использование CO₂, реализуемых с использованием возобновляемой энергетики. Эти процессы будут сопровождаться интеграцией с цифровыми системами мониторинга выбросов и появлением механизмов сертификации СР-ССУ.

Для России развитие ССУ имеет стратегическое значение при формировании новых принципов и подходов к модернизации промышленности, постепенном переходе к низкоуглеродным технологиям. Кроме того, ССУ, если уделять этому направлению должное внимание и использовать ресурсы, позволит укрепить позиции России на мировом рынке климатических решений, сохраняя технологический суверенитет и поддерживая поиск рациональных, экономически оправданных путей декарбонизации.

Список источников

1. *Bigerna S., Micheli S.* Global costs of US withdrawal: Quantifying the impact on Paris Agreement cooperation // *Journal of Environmental Management*. 2025. Vol. 392. Article 126733. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126733>
2. *Широв А. А., Колпаков А. Ю.* Целевой сценарий социально-экономического развития России с низким уровнем нетто-выбросов парниковых газов до 2060 года // *Проблемы прогнозирования*. 2023. № 6. С. 53–66. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-201-53-66>
3. China certified emission reduction projects: Historical and current status, development, and future prospects — taking forestry projects as an example / *Z. Liang, S. Wu, Y. He et al.* // *Sustainability*. 2025. Vol. 17. No. 8. Article No. 3284. <https://doi.org/10.3390/su17083284>
4. *Цветков П. С., Андрейчук А.* Методологические предпосылки формирования концепции углеродной экономики замкнутого цикла // *Вестник Пермского университета. Серия: Экономика*. 2025. Т. 20. № 3. С. 377–401. <https://doi.org/10.17072/1994-9960-2025-3-377-401>
5. *Vasilev Y., Cherepovitsyn A., Tsvetkova A., Komendantova N.* Promoting public awareness of carbon capture and storage technologies in the Russian federation: A system of educational activities // *Energies*. 2021. Vol. 14. No. 5. Article No. 1408. <https://doi.org/10.3390/en14051408>
6. *Череповицына А. А.* Снижение выбросов парниковых газов: от глобального контекста к стоимостной оценке улавливания углекислого газа в Арктике // *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2025. Т. 28. № 2. С. 148–163. <https://doi.org/10.37614/2220-802X.2.2025.88.010>
7. *Цветков П. С.* Кластерный подход к улавливанию и транспортировке промышленного CO₂: экономия за счет совместной инфраструктуры // *Записки Горного института*. 2025. Т. 275. С. 110–129.
8. Electrocatalytic reactions for converting CO₂ to value-added products: Recent progress and emerging trends / *Z. Masoumi, M. Tayebi, M. Tayebi et al.* // *International Journal of Molecular Sciences*. 2023. Vol. 24. No. 12. Article No. 9952. <https://doi.org/10.3390/ijms24129952>
9. *Sick V., Stokes G., Mason F. C.* CO₂ utilization and market size projection for CO₂-treated construction materials // *Frontiers in Climate*. 2022. Vol. 4. Article No. 878756. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.878756>
10. *Schmid C., Hahn A.* Potential CO₂ utilisation in Germany: An analysis of theoretical CO₂ demand by 2030 // *Journal of CO₂ Utilization*. 2021. Vol. 50. Article No. 101580. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101580>

11. Straub J. In search of technology readiness level (TRL) 10 // *Aerospace Science and Technology*. 2015. Vol. 46. P. 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.07.007>
12. Kucharavy D., De Guio R. Application of logistic growth curve // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 131. P. 280–290. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.390>
13. Adner R., Kapoor R. Innovation ecosystems and the pace of substitution: Re-examining technology S-curves // *Strategic Management Journal*. 2016. Vol. 37. No. 4. P. 625–648. <https://doi.org/10.1002/smj.2363>
14. Иванов И. Ф. Использование логистической кривой для оценки стоимости компании на развивающемся рынке // *Корпоративные финансы*. 2008. Т. 2. № 1. С. 47–62. <https://doi.org/10.17323/j.jcfr.2073-0438.2.1.2008.47-62>

References

1. Bigerna S., Micheli S. Global costs of US withdrawal: Quantifying the impact on Paris Agreement cooperation. *Journal of Environmental Management*. 2025;392:126733. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126733>
2. Shirov A.A., Kolpakov A.Yu. Target scenario of low greenhouse gas emissions socio-economic development of Russia for the period until 2060. *Studies on Russian Economic Development*. 2023;34(6):758-768. <https://doi.org/10.1134/S1075700723060151> (In Russ.: *Problemy prognozirovaniya*. 2023;(6):53-66. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-201-53-66>).
3. Liang Z., Wu S., He Y., et al. China certified emission reduction projects: Historical and current status, development, and future prospects — taking forestry projects as an example. *Sustainability*. 2025;47(8):3284. <https://doi.org/10.3390/su17083284>
4. Tsvetkov P.S., Andreichyk A. Methodological foundations for shaping the theory of a circular carbon economy. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Ekonomika = Perm University Herald. Economy*. 2025;20(3):377-401. (In Russ.). <https://doi.org/10.17072/1994-9960-2025-3-377-401>
5. Vasilev Y., Cherepovitsyn A., Tsvetkova A., Komendantova N. Promoting public awareness of carbon capture and storage technologies in the Russian Federation: A system of educational activities. *Energies*. 2021;14(5):1408. <https://doi.org/10.3390/en14051408>
6. Cherepovitsyna A.A. Reducing greenhouse gas emissions: From a global perspective to a cost assessment of carbon capture in the Arctic. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka = The North and the Market: Forming the Economic Order*. 2025;28(2):148-163. (In Russ.). <https://doi.org/10.37614/2220-802X.2.2025.88.010>
7. Tsvetkov P.S. Cluster approach for industrial CO₂ capture and transport: Savings via shared infrastructure. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2025;275:110-129. (In Russ.).
8. Masumi Z., Tayebi M., Tayebi M., et al. Electrocatalytic reactions for converting CO₂ to value-added products: Recent progress and emerging trends. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(12):9952. <https://doi.org/10.3390/ijms24129952>
9. Sick V., Stokes G., Mason F.C. CO₂ utilization and market size projection for CO₂-treated construction materials. *Frontiers in Climate*. 2022;4:878756. <https://doi.org/10.3389/fclim.2022.878756>
10. Schmid C., Hahn A. Potential CO₂ utilisation in Germany: An analysis of theoretical CO₂ demand by 2030. *Journal of CO₂ Utilization*. 2021;50:101580. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2021.101580>
11. Straub J. In search of technology readiness level (TRL) 10. *Aerospace Science and Technology*. 2015;46:312-320. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.07.007>
12. Kucharavy D., De Guio R. Application of logistic growth curve. *Procedia Engineering*. 2015;131:280-290. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.390>
13. Adner R., Kapoor R. Innovation ecosystems and the pace of substitution: Re-examining technology S-curves. *Strategic Management Journal*. 2016;37(4):625-648. <https://doi.org/10.1002/smj.2363>
14. Ivanov I.F. Logistic curve in evaluation of companies on emerging markets. *Korporativnye finansy = Journal of Corporate Finance Research*. 2008;2(1):47-62. (In Russ.). <https://doi.org/10.17323/j.jcfr.2073-0438.2.1.2008.47-62>

Информация об авторе**Павел Сергеевич Цветков**кандидат экономических наук,
доцент кафедры организации
и управленияСанкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II199106, Санкт-Петербург, 21-я линия В. О.,
д. 2

Поступила в редакцию 06.10.2025

Прошла рецензирование 20.10.2025

Подписана в печать 28.10.2025

Information about the author**Pavel S. Tsvetkov**PhD in Economics, Associate Professor
at the Department of Organization
and ManagementEmpress Catherine II Saint Petersburg Mining
University2, 21st Line V.I., St. Petersburg 199106,
Russia

Received 06.10.2025

Revised 20.10.2025

Accepted 28.10.2025

Конфликт интересов: автор декларирует отсутствие конфликта интересов,
связанных с публикацией данной статьи.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest
related to the publication of this article.