

Научная статья
УДК 338.1
doi:10.37614/2220-802X.4.2021.74.004

УТИЛИЗАЦИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И ЦИРКУЛЯРНАЯ ЭКОНОМИКА: МИР, РОССИЯ, АРКТИКА

Екатерина Александровна Кузнецова¹, Алина Александровна Череповицына²

^{1,2}Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

¹katia11911@gmail.com, ORCID 0000-0002-1435-3021

²iljinovaaa@mail.ru, ORCID 0000-0001-5168-0518

Аннотация. В условиях глобальных экологических вызовов устойчивое развитие регионов, территорий и промышленных комплексов приобретает все большую актуальность. Практическая реализация задач, возникающих на пути к устойчивости, в большей степени зависит от внедрения конкретных технологий, в том числе направленных на уменьшение выбросов парниковых газов. Сегодня развитие и масштабирование технологий CC(U)S (carbon capture, utilization and storage) представляются одним из наиболее реалистичных способов снижения эмиссии CO₂. В контексте принципов циркулярной экономики роль углекислого газа меняется, он больше не рассматривается как промышленный отход, а представляет собой ценный ресурс. Целью данной работы является анализ и оценка перспектив утилизации углекислого газа, а также экономической эффективности инициатив CC(U)S (на примере проекта по производству метанола на основе CO₂ в Исландии) с целью исследования предпосылок и возможностей развития таких проектов в Арктике. Для оценки степени распространённости технологий в мировом масштабе представлен анализ зарубежного опыта реализации таких инициатив, а также определены основные перспективные способы утилизации углекислого газа, их ключевые особенности. Обоснована экономическая эффективность проекта по производству метанола из CO₂ (на примере коммерческого проекта в Исландии). Представлено общее видение предпосылок и возможностей реализации инициатив CC(U)S в арктических регионах.
Ключевые слова: технологии CC(U)S, циркулярная экономика, углекислый газ, экономическая эффективность, Арктика, утилизация, зарубежный опыт

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации № МК-4812.2021.2, тема проекта «Стратегическое прогнозирование развития нефтегазопромышленных комплексов в условиях циркулярной экономики».

Для цитирования: Кузнецова Е. А., Череповицына А. А. Утилизация углекислого газа и циркулярная экономика: мир, Россия, Арктика // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2021. № 4. С.42-55. doi:10.37614/2220-802X.4.2021.74.004

Original article

CARBON DIOXIDE UTILIZATION AND CIRCULAR ECONOMY: THE WORLD, RUSSIA AND THE ARCTIC

Ekaterina A. Kuznetsova¹, Alina A. Cherepovitsyna²

^{1,2}Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

¹katia11911@gmail.com, ORCID 0000-0002-1435-3021

²iljinovaaa@mail.ru, ORCID 0000-0001-5168-0518

Abstract. Sustainable development of regions, territories, and industrial complexes is becoming increasingly important in the context of global environmental challenges. The practical realization of the sustainability challenges depends more on the implementation of specific technologies, including greenhouse emission mitigation technologies. Today, the development and scaling out of CC(U)S (carbon capture, utilization and storage) technologies seems to be one of the most realistic ways to reduce CO₂ emissions. The role of CO₂ is changing in the context of circular economy principles, it is no longer considered as industrial waste, but as a valuable resource. The aim of this paper is to analyze and assess the prospects for carbon dioxide utilization, as well as the cost-effectiveness of CC(U)S initiatives (using the example of a CO₂-based methanol production project in Iceland) in order to explore the prerequisites and opportunities for the development of such projects in the Arctic. In order to assess the spread of technology worldwide, an analysis of foreign experience in implementing such initiatives is presented, as well as the main promising ways of carbon dioxide utilization and their key features are identified. The economic efficiency of the CO₂-based methanol production project (by the example of a commercial project in Iceland) is substantiated. A general vision of the prerequisites and opportunities for the implementation of CC(U)S initiatives in the Arctic regions is presented.

Keywords: CC(U)S technologies, circular economy, carbon dioxide, economic efficiency, Arctic, utilization, foreign experience

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Acknowledgments: the research is supported by the grant of the President of the Russian Federation no. MK-4812.2021.2, project “Strategic Forecasting of the Development of Oil and Gas Industrial Complexes in the Conditions of a Circular Economy”.

For citation: Kuznetsova E. A., Cherepovitsyna A. A. Carbon dioxide utilization and circular economy: The world, Russia and the Arctic. Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo porjadka [The North and the Market: Forming the Economic Order], 2021, no. 4, pp.42-55. doi:10.37614/2220-802X.4.2021.74.004

Введение

По расчетным оценкам Межправительственной группы экспертов по изменению климата, в результате антропогенных выбросов от доиндустриального периода до настоящего времени температура Земли увеличилась примерно на 1,0 °C [1]. В Арктике темп роста температуры в три раза быстрее, чем в среднем в мире. В период с 1971 по 2019 гг. среднегодовая температура воздуха в арктической зоне увеличилась на 3,1 °C [2], поэтому для Арктики это серьезная проблема.

Одной из причин повышения температуры Земли является рост концентрации парниковых газов в атмосфере. На арктических территориях РФ наблюдения за концентрацией таких газов проводят на трех локациях: на побережье Баренцева моря (метеорологическая станция «Териберка»), на полуострове Ямал (станция «Новый порт») и в море Лаптевых (станция «Тикси»). Териберка и Тикси отдалены от промышленных источников выбросов, и их показатели воспринимаются как фоновые. Станция «Новый порт» находится в районе, подверженном влиянию крупных антропогенных источников выбросов парниковых газов, преимущественно объектов нефтегазодобычи. Превышение концентрации парниковых газов на станции «Новый порт» над фоновым уровнем в 2020 г. составило $4,5 \pm 1,2$ млн⁻¹ [3]. Это подтверждает весомый вклад техногенного CO₂ в повышение концентрации парниковых газов на этих территориях.

Наблюдения на арктических территориях также указывают на оттаивание вечной мерзлоты [2]. Это означает, что опасность глобального потепления не только в таянии ледников и разрушении экосистем в долгосрочной перспективе, но и в уязвимости уже существующей инфраструктуры, построенной в районах вечной мерзлоты. Важность учета этих рисков объясняется тем, что загрязнения локального характера в условиях Арктики с большей вероятностью могут перерасти в региональные [4]. Несмотря на это, экономическое и промышленное развитие ранее неосвоенных территорий продолжается и сегодня, а Арктическая зона Российской Федерации (АЗ РФ) является одним из самых перспективных регионов для освоения природных ресурсов.

Северные территории характеризуются следующими особенностями: сложные климатические условия, большие и труднодоступные

территории, низкая плотность населения, слабо развитая инфраструктура и промышленный характер их освоения [5]. Высокий ресурсный потенциал обусловил тот факт, что драйвером наиболее серьезных инфраструктурных изменений в северных регионах являются крупные добывающие и промышленные компании [6]. Так, «Газпром» в рамках мегапроекта по разработке месторождений на полуострове Ямал в 2011 г. реализовал проект строительства железной дороги Обская — Бованенково длиной 572 километров [7]. Проект «Ямал СПГ» компании «НОВАТЭК» помимо завода предполагал также строительство морского порта, посёлка и аэропорта Сабетта [8]. Вместе с тем промышленные и добывающие предприятия являются основным источником загрязнений, выбрасываемых в окружающую среду. Следовательно, одним из способов содействия перехода АЗ РФ к модели устойчивого развития является внедрение технологий, которые могут способствовать снижению влияния производств на окружающую среду и могут быть интегрированными в технологическую цепочку промышленных предприятий, действующих на территории АЗ РФ. Критически важными, в связи с выше обозначенной проблемой, являются технологии, направленные на сокращение эмиссии парниковых газов.

Хрупкость экосистем арктических регионов определяет необходимость выбора правильной модели ее экономического развития. Текущие экологические, экономические и производственные тенденции, связанные с устойчивым развитием, обусловили начало перехода мировой экономики к циркулярной модели развития. Дальнейшее технологическое развитие промышленных систем должно рассматриваться и оцениваться не только со стороны оказываемого влияния на окружающую среду, но и в контексте жизнеспособности в рамках соответствия замкнутым производственным цепочкам.

Одной из технологий, способствующей сокращению эмиссий парниковых газов и соответствующей принципам циркулярной экономики, является технология улавливания, использования и хранения углерода — CC(U)S (carbon capture, utilization and storage).

Цель данной работы заключается в анализе и оценке перспектив утилизации углекислого газа, а также экономической эффективности инициатив

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

СС(У)S (на примере проекта по производству метанола на основе CO₂ в Исландии) с целью исследования предпосылок и возможностей развития таких проектов в Арктике.

Методика и структура исследования

На сегодняшний день опубликовано большое количество работ, посвящённых разработке и обоснованию способов достижения климатических целей [9, 10]. Научным и бизнес-сообществами предпринимаются попытки оценить перспективы распространения технологий СС(У)S в различных регионах, а также их эффективность [11, 12]. В академической литературе выявлены существующие проблемы и риски распространения проектов захоронения углекислого газа, оценены экономические и общественные эффекты от их реализации [13, 14]. Работы по использованию углекислого газа в основном посвящены экономико-техническим аспектам производства отдельных видов продукции [15, 16]. Исследования, посвященные анализу перспектив развития инициатив по использованию CO₂ как неотъемлемой части циркулярной модели экономики, существуют [17], но требуют развития, в том числе применительно к конкретным промышленным секторам и регионам, например, к арктическим территориям.

Основным методом исследования выступали кабинетные исследования. Работа базируется на актуальной статистике по исследуемой теме. Для решения частных задач использовались методы стратегического, сравнительного и системного анализов. Особое внимание было уделено экспертному подходу — сбору и анализу мнений экспертов по изучаемой теме, в том числе для приведения прогнозных оценок. Методы экономической оценки эффективности инвестиций, основанные на дисконтированном подходе, стали базой экономических расчетов.

Работа организована следующим образом: во-первых, мы исследуем теоретические основы циркулярной экономики. Во-вторых, мы проводим оценку уровня распространенности инициатив СС(У)S в мире и определяем место и роль технологии СС(У)S в циркулярных производственных цепочках. В-третьих, мы анализируем ключевые особенности основных вариантов использования углекислого газа и представляем прогнозные оценки развития технологий использования CO₂ в мире. В качестве практической части исследования мы анализируем экономическую эффективность проекта по производству метанола из CO₂ в Исландии, чтобы понять экономическую сущность и провести анализ экономических показателей проекта. Исследование выполнено с фокусом на анализ и оценку

возможностей реализации инициатив СС(У)S на арктических территориях.

Теоретические основы циркулярной экономики и перспективы ее реализации в Арктике

На протяжении многих лет рост экономики стимулировался потребностями человечества, возрастающими с увеличением численности населения. Необходимость поддержания темпов роста производства привела к возникновению зависимости экономического роста от потребления конечных природных ресурсов, являющихся сырьем для производства благ.

Привычная линейная модель экономики основывается на принципе «добывай, производи, выбрасывай» [18]. Этот механизм основан на непрерывном повторении процессов производства и потребления, его можно охарактеризовать как линейный и конечный. Производители не несут ответственность за ущерб, наносимый продуктом окружающей среде, после его продажи и не имеют стимулов для изготовления продукции, которую можно подвергнуть переработке [19]. Ограниченные природные ресурсы, превращенные в продукт, после использования не могут снова стать сырьем и рассматриваются исключительно как отходы.

При таком подходе экономика успешно строилась и росла, пока ученые не стали обращать внимание общественности на негативные экологические последствия. Конец XX в. был ознаменован становлением концепции устойчивого развития, опирающегося на идею удовлетворения текущих потребностей человека без ущерба для способности будущих поколений удовлетворять свои потребности [20]. Также было признано, что достижение устойчивости невозможно без создания «правильной» экономической модели [21]. Традиционная линейная модель использования ресурсов была признана нерациональной и не учитывающей экологические требования для сохранения природы. И тогда на стыке двух наук — экономики и экологии — возникла концепция циркулярной экономики как практическое воплощение устойчивого экономического развития и альтернатива привычной линейной модели. Современное понимание экономики замкнутого цикла и ее практического применения к экономическим системам и промышленным процессам эволюционировало и сегодня включает особенности и идеи различных концепций, разделяющих подход замкнутых цепочек, например, концепции устойчивого развития, промышленной экологии, функциональной экономики, голубой экономики и др. [18].

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Согласно определению фонда Эллен МакАртур, циркулярная экономика (или экономика замкнутого цикла) — это тип экономики, предполагающий создание непрерывных производственно-технологических циклов, минимизирующих вероятность увеличения объема промышленных отходов [22]. Такой подход направлен на разрыв зависимости экономического роста от потребления ограниченных природных ресурсов и основан на переходе на возобновляемые источники энергии и увеличении использования возобновляемых материалов, что способствует сокращению потребления первичного сырья.

Циркулярная экономическая модель по своей сути должна стремиться повторить природную систему, отличающуюся своим закрытым характером производства, потребления и переработки внутри самой системы [23]. Так в национальном стандарте РФ «Ресурсосбережение и обращение с отходами» (ГОСТ Р 57702–2017), создание замкнутых циклов определяется как попытка воспроизведения циклов, функционирующих в природе, так как «биосфера является закрытой системой, где все элементы взаимосвязаны и обуславливают друг друга, максимально приближаясь к безотходности» [24]. Соответственно, все, что производится, в конечном итоге должно подлежать переработке с целью избежать вероятных экологических последствий.

По прогнозам фонда Эллен МакАртур, при условии перехода к замкнутому циклу в производстве четырех ключевых промышленных материалов (цемент, сталь, пластик и алюминий), можно ожидать снижение уровня эмиссии CO₂ на 40 % к 2050 г. [19]. Уменьшение выбросов будет достигнуто за счет значительного увеличения срока использования производственных активов, повторного использования материалов в технологическом цикле, что уменьшит спрос на новое сырье, а также выбросы, связанные с его производством.

Различные авторы соглашаются во мнении, что циркулярная модель развития является наиболее подходящей задачам устойчивого развития России и особенностям конкретно Арктического региона [25–29]. Стратегическое государственное планирование также учитывает необходимость развития Арктики в соответствии с циркулярной моделью. Принятая в 2020 г. Указом Президента РФ Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года признает высокую чувствительность экологических систем к внешним воздействиям и выделяет в качестве одной из мер реализации задач в сфере экономического развития «внедрение в Арктической зоне специального

экономического режима, способствующего переходу к экономике замкнутого цикла» [30].

Для перехода к циркулярной модели потребуется эффективная работа во всех секторах экономики; ее реализация предполагает активное участие и сотрудничество между всеми субъектами экономических отношений. В следующем разделе будут изучены особенности применения и распространения комплекса технологий CC(U)S в мире, а также их значимость в контексте замкнутых производственных цепочек.

CC(U)S-технологии: уровень распространённости и место в условиях циркулярной экономики

CC(U)S — это целый комплекс технологий, призванных уменьшить количество CO₂, выбрасываемого в атмосферу или уже находящегося в ней. Первым этапом является улавливание CO₂ из крупных точечных источников, таких как электростанции или промышленные предприятия, использующие ископаемое топливо. Углекислый газ также может улавливаться непосредственно из атмосферы. Далее уловленный CO₂, если он не используется на месте, сжимается и транспортируется [31]. В основном транспортировка осуществляется по трубопроводам и на кораблях. С более высокими затратами небольшие объемы CO₂ транспортируют на короткие расстояния автомобильным или железнодорожным транспортом [32].

Объем сокращения выбросов от данной технологии зависит от того, сколько CO₂ улавливается и что происходит с ним дальше: закачивается ли он в глубокие геологические формации для перманентного хранения или используется для производства продукции с экономической ценностью.

Принято применять следующее разделение технологий CCUS [32].

1. Улавливание и хранение углерода (CCS — carbon capture and storage). Включает захват, транспортировку и закачку CO₂ в глубокие геологические формации для постоянного хранения. Газ хранится в пористых и проницаемых слоях горных пород на глубине нескольких тысяч метров, расположенных под непроницаемой барьерной скалой. Он закачивается через скважины, подобные тем, которые используются для добычи нефти и газа. После завершения закачки скважину удаляют и «закупоривают» цементом, который предотвращает утечку [33]. В конечном итоге газ связывается с окружающими молекулами соленой воды и остается храниться между непроницаемыми слоями породы на неопределенный срок [34].

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

2. Улавливание и использование углерода (CCU — carbon capture and utilization). Включает улавливание и использование уловленного CO₂ для производства сырья или продуктов с экономической ценностью. Потенциальные области применения включают преобразование CO₂ в полезный продукт и прямое использование, в котором CO₂ не изменяется [9].

3. Улавливание, использование и хранение углерода (CCUS — carbon capture, utilization and storage). Включает CCS, CCU, а также технологии, в которых CO₂ используется и хранится. Примерами являются закачка в нефтегазовые месторождения, находящиеся на завершающем этапе разработки, для увеличения нефтеотдачи и использование в производстве строительных материалов, в которых часть или весь CO₂ хранится постоянно [32].

Первые CC(U)S-проекты появились в 1970-х гг. в США, когда заводы по переработке природного газа начали улавливать CO₂ и поставлять его для операций по повышению нефтеотдачи (EOR—CO₂ — carbon dioxide enhanced oil recovery) [35]. Данные проекты реализовывались в рамках линейной модели: продажа CO₂ несла коммерческую выгоду, а достижение экологических эффектов не являлось целью. С усилением низкоуглеродной повестки у компаний появились стимулы реализации проектов, напрямую приносящих лишь экологический результат. В 1996 г. в Норвегии начал работу первый в мире объект перманентного хранения CO₂, не связанный с EOR—CO₂ [36].

На сентябрь 2021 г. в мире действует 27 объектов хранения углекислого газа общей мощностью 36,6 млн т в год. Еще два объекта приостановили работу, три находятся в стадии строительства; на этапе поздней разработки — тринадцать, ранней разработки — 21. Из 27 действующих объектов хранения только шесть не связаны с увеличением нефтеотдачи [12]. Больше половины всех действующих предприятий по хранению углекислого газа расположено в США, что во многом связано с наличием разветвленной сети трубопроводов, спросом на CO₂ для повышения нефтеотдачи, а также с программами государственного финансирования [35]. За последнее десятилетие объекты CC(U)S были введены в эксплуатацию в Австралии, Бразилии, Канаде, Китае, Саудовской Аравии, Объединенных Арабских Эмиратах и Катаре [12]. По оценкам Международного энергетического агентства, потенциальные хранилища с наибольшей емкостью находятся на территории Российской Федерации, в Северной Америке и Африке [37]. При этом в России на сегодняшний день не реализуется ни один проект улавливания и захоронения углерода.

В основе циркулярной экономики заложен ключевой принцип “3R”: reduce, reuse, recycle [18]. Несмотря на экологическую направленность, технологии, предполагающие перманентное захоронение газа, рассматривают CO₂ как отходы, что соответствует линейному подходу. В ответ на запрос времени появился комплекс технологий, предполагающий улавливание и использование CO₂, — CCU.

Прямое использование CO₂ включает в себя уже упомянутую выше закачку в пласт для повышения нефте- и газоотдачи, добавление CO₂ в теплицы для повышения урожайности, производство карбамида для азотных удобрений и др. [35]. Различные методы преобразования углекислого газа расширяют варианты его использования. В процессе биологической трансформации водорослей CO₂ превращается в новые органические соединения. Также CO₂ можно использовать при минерализации, например, для изготовления строительных материалов. При химическом преобразовании CO₂ может быть превращен в синтетическое топливо для транспортного сектора и др. [38].

CCU включает в себя переработку парникового газа для создания новых продуктов и сырья, способствует сокращению его эмиссии, а также появлению замкнутого углеродного цикла за счет повторного улавливания и использования. Дополнительным преимуществом CCU является не только сокращение выбросов углерода, но и гарантия устойчивых ресурсов. Даже при переходе к экономике с нулевым уровнем выбросов углерод будет требоваться в некоторых областях. CO₂ может использоваться для создания биотоплива и других энергоносителей [35]. Синтетическое топливо не является углеродно-отрицательным, захваченный CO₂ выбрасывается обратно в атмосферу при сжигании, но оно является углеродно-нейтральным, не выделяет в атмосферу дополнительного количества CO₂ [39]. Таким образом, именно технологии использования CO₂ имеют потенциал стать частью циркулярной экономики.

Сегодня разработано около пятидесяти технологий по использованию CO₂, но данные проекты только достигли ранней коммерциализации по нескольким категориям продукции [40]. Наиболее зрелые области применения — это бетон с отверждением за счет CO₂ и производство заполнителей из природных минералов или отходов. Две североамериканские компании, CarbonCure и Solidia Technologies, возглавляют разработку и коммерциализацию процесса отверждения CO₂. CarbonCure в настоящее время работает на 150 предприятиях в Соединенных Штатах [41], Solidia Technologies на 50 предприятиях в десяти странах мира [42]. Преобразование CO₂ в метан

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

и метанол достигло ранней стадии коммерциализации в регионах с дешевой возобновляемой электроэнергией. Завод по производству возобновляемого метанола имени Джорджа Олаха, расположенный в Исландии, является крупнейшим из действующих сегодня объектов по производству топлива на основе CO₂ [43].

Среди проектов, на сегодняшний день находящихся на стадии планирования, наибольшей суммарной запланированной мощностью обладают CCS-проекты [17]; в ближайшее время наибольший вклад в снижение объемов эмиссии скорее внесут технологии CCS. Однако в контексте циркулярной экономики целесообразно развитие и распространение технологий использования углекислого газа.

Перспективные направления использования углекислого газа

Несмотря на целесообразность развития технологий CCU на пути к циркулярной экономике, ожидается, что в краткосрочной перспективе рынок продуктов и услуг, основанных на использовании CO₂, останется небольшим [44]. Такие прогнозы противоречат ожиданиям, что утилизация CO₂ может стать одной из перспективных технологий, способствующих развитию циркулярной экономики.

Теоретически уловленный CO₂ можно превратить в любой вид топлива или химикат, который в настоящее время основан на нефти. Однако процессы преобразования углекислого газа в другие продукты требуют значительного количества энергии и оказываются дорогостоящими [45]. Основная задача заключается в поиске продуктов, для создания которых не потребуется большое количество энергии, или менее энергоемких способов преобразования CO₂, чтобы товар оказался конкурентоспособным по стоимости и в конечном итоге принес пользу окружающей среде.

К основным товарам из CO₂, уже реализуемым на рынке, относятся топливо, химикаты, полимеры и строительные материалы. В табл. 1 рассмотрены особенности производства наиболее распространенных категорий продукции.

Основным препятствием для роста рынка продуктов на основе CO₂ является то, что производственный процесс, включающий утилизацию CO₂, дороже обычного. Высокая стоимость производства создает барьеры для роста, поскольку у покупателей нет стимула платить больше за продукцию. Если инициативы, направленные на снижение углеродного следа продукции, будут успешно реализованы, это может ускорить рост рынка.

Последние долгосрочные прогнозы использования CO₂ варьируются от 0,5 до 7 млрд т в год (табл. 2).

Таблица 1

Особенности производства распространенных категорий продукции из CO₂

Категория	Строительные материалы	Топливо	Полимеры	Химикаты	Повышение урожайности
Пример реализуемого продукта	Бетон с отверждением за счет CO ₂	Метанол	Поликарбонат	Салициловая кислота	Микроводоросли
Способ уменьшения выбросов	Перманентное хранение; замещение цемента	Замещение ископаемого сырья углеродно-нейтральным			Поглощение CO ₂ при выращивании
Объем поглощения, т CO ₂ /т	0,3	1,37	0,17	0,32	1,8
Уровень развития технологий	Коммерциализация	Широкий спектр: от разработки до опытного производства			Опытное производство / коммерциализация
Потребление энергии	Низкое	Высокое	Высокое	Высокое	Низкое
Величина добавленной стоимости	Низкая	Низкая	Высокая	Низкая	Низкая (высокая для продукции из водорослей)
Потенциальный размер рынка	Большой	Большой	Небольшой	Небольшой	Небольшой

Примечание. Источник: составлено авторами на основе [35, 40, 44, 46].

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Таблица 2

Оценки развития технологий использования CO₂ в различных источниках, млрд т CO₂ в год

Источник	Год	Строительные материалы	Топливо	Полимеры и химикаты	Продукция из водорослей	Всего
Global CO ₂ Initiative, 2016	2030	5	2,1	< 0,5	3,2	> 7
Nature, 2019	2050	0,1 – 1,4	1 – 4,2	0,3 – 0,6	0,2 – 0,9	> 4
McKinsey, 2020	2030	0,3	0,1	0,2	–	0,5

Примечание. Источник: составлено авторами на основе [44, 47, 48].

Долгосрочные перспективы роста рынка CO₂ сложно оценить количественно, поскольку большинство технологий все еще находится на стадии разработки. Два прогноза показывают, что наиболее широкое применение получают строительные материалы, что, вероятно, связано с большей зрелостью технологии на сегодняшний день. Согласно наиболее позитивному прогнозу, утилизация CO₂ составит 7 млн т в год, что составляет 22 % сегодняшних выбросов CO₂, связанных с энергетикой [49]. Опираясь на такие общие прогнозы, можно предположить, что производство строительных материалов может быть главным направлением использования углекислого газа в России, однако такие заключения требуют существенных дополнительных исследований.

Тем не менее сейчас, в силу отсутствия подобных проектов в России, представляет интерес изучение зарубежного опыта реализации таких инициатив. Для анализа экономической эффективности проектов использования CO₂ в следующем разделе будет представлена оценка экономической эффективности проекта по производству метанола из CO₂ в Исландии.

Экономическая эффективность проекта ССУ (на примере коммерческого проекта по производству метанола из CO₂ в Исландии)

Как было отмечено ранее, коммерческие проекты по преобразованию CO₂ в ценные продукты только

начинают появляться. Очевидно, что низкие инвестиционная привлекательность и экономическая эффективность проектов являются основными препятствиями для их роста.

Завод имени Джорджа Олаха в Исландии стал первым коммерческим объектом по производству низкоуглеродного «зеленого» метанола (торговая марка “Vulcanol”). В год завод производит 4 тыс. т метанола, годовой объем поглощенного CO₂ составляет около 5,5 тыс. т. Продукт производится по технологии Emission-to-Liquids (ETL). Метанол получается при преобразовании углекислого газа и водорода. CO₂ улавливается на близлежащей геотермальной электростанции — возобновляемом источнике энергии. Благодаря электроэнергии, полученной с той же станции, из воды получают водород путем электролиза. На производство одной тонны метанола по технологии ETL требуется 0,188 т H₂ и 1,373 т CO₂. Единственным побочным продуктом данного процесса становится кислород [43].

В рамках данной работы был проведен расчет показателей экономической эффективности рассматриваемого проекта, основанный на информации, представленной в общем доступе (табл. 3).

Таблица 3

Основная информация о проекте

Показатель	Значение
Инвестиции	8 млн долл. США
Срок строительства	2 года
Объем производства годовой	4 тыс. т
Источник CO ₂	Геотермальная электростанция Svartsengi
Источник электроэнергии	Геотермальная электростанция Svartsengi
Продукт	Возобновляемый метанол
Технология	Emissions-to-Liquids (ETL)
Марка	“Vulcanol”®
Число сотрудников	25 человек
Объем поглощения CO ₂	1,373 т / т Vulcanol
Объем необходимого H ₂	0,188 т / т Vulcanol

Примечание. Составлено автором на основе [50, 51].

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Операционные расходы рассчитываются: из стоимости улавливания углекислого газа — в среднем 35 долл. США / т [16]; из стоимости производства водорода — 2500 долл. США / т (при цене электроэнергии 40 долл. США / МВт [52] стоимость производства водорода через электролиз составит 2500 долл. США / т [53]); из затрат на оплату труда (с учетом отчислений на социальные нужды) — средняя заработная плата инженера в Исландии 2160 долл. США / мес., количество требуемых работников на завод — 25 человек; из амортизации основных фондов (линейным методом); из прочих расходов.

Цена продажи метанола марки “Vulcanol” не известна. Расчетная цена установлена на основании цены на товар-аналог — биодизель (1200 долл. США / т [54]).

С использованием ставки дисконтирования 8 % были рассчитаны следующие показатели экономической эффективности: чистый дисконтированный доход (ЧДД), внутренняя норма доходности (ВНД), индекс доходности (ИД) и срок окупаемости.

По результатам расчета ЧДД составил 5,55 млн долл. США, ВНД — 14 %, ИД — 1,66 и срок окупаемости — 123 месяца.

Результаты показывают, что проект CCU жизнеспособен и может принести более 5,5 млн долл. США прибыли в течение двадцати лет при первоначальных инвестициях 8 млн долл. США.

Таким образом, проект является экономически эффективным. Вместе с тем нужно понимать, что проект сильно зависит от цен на электроэнергию, а также от объемов производства продукции. Авторами были проведены дополнительные расчёты, которые показали, что в случае увеличения производственной мощности завода на 20 %, ЧДД проекта увеличится в 1,6 раз (до 9 млн долл. США). Эффективность проекта также ограничена ценой производства водорода, которая, в свою очередь, напрямую зависит от цен на электроэнергию. Проект обеспечивается геотермальной электростанцией Svartsengi, и стоимость энергии низкая — 40 долл. США за МВт, что характерно для Исландии.

В целом можно сделать вывод, что успешная реализация подобных проектов будет серьезно зависеть от местоположения, стоимости электроэнергии в каждом регионе, степени развития инфраструктуры, стоимости улавливания CO₂ и других факторов. Чем более зрелые технологии CCU, тем выше шанс, что капитальные и эксплуатационные затраты по проекту будут ниже.

Дискуссия и заключение

В то время как технологии CC(U)S могут сыграть важную роль в достижении климатических целей по всему миру, утилизация CO₂ может способствовать

возникновению замкнутого углеродного цикла. Однако если производство некоторых продуктов на основе CO₂, таких как низкоуглеродные строительные материалы, уже широко распространено и пользуется спросом во всем мире, то другие области применения все еще находятся на ранней стадии коммерциализации. Категории продуктов отличаются друг от друга по размеру потенциальных рынков, энергоёмкости преобразования CO₂ и объёму утилизированного CO₂, что определяет экологическую ценность продукта. Сравнение существующих долгосрочных прогнозов по утилизации CO₂ выявило значительные различия в оценках. Это свидетельствует о том, что роль улавливания и утилизации CO₂ в будущей системе экономического и промышленного развития еще не до конца определена. В целом такая неопределённость характерна для всего мира. Очевидно, что для условий России она еще выше, так как такие проекты даже не начали развиваться.

Развитие арктических регионов сильно зависит от развития промышленных проектов, а также от того, насколько успешно будут реализованы в них принципы устойчивого развития. Крупнейшие инвестиционные проекты, в том числе Северный морской путь, реализуются за счет компаний горнодобывающего и нефтегазового секторов. Современные тенденции, связанные с энергетическим переходом, привели к тому, что большое внимание на международном рынке уделяется углеродному следу продукции и предпочтения по всему миру отдаются низкоуглеродным проектам. В этой связи, мы полагаем, что повышение экологической привлекательности проектов в Арктике будет в фокусе развития промышленных компаний, в частности, за счёт технологий CC(U)S.

Мы полагаем, что технологии CC(U)S заслуживают особого внимания промышленности в Арктическом регионе. Проекты по добыче нефти и газа в Арктике развиваются стремительно, и именно технологии CC(U)S могут стать комплиментирующей опцией, снижающей выбросы CO₂ для компаний, реализующих традиционные проекты по добыче углеводородов.

CO₂-EOR стал эффективным и экономически выгодным способом снижения углеродного следа для нефтегазовых компаний во многих регионах мира, а инициативы CCS экономически целесообразными в странах с регулируемым налогом на углерод. Инициативы CCU могут стать экологичным решением для производителей, не имеющих внешних стимулов для сокращения выбросов, благодаря добавленной стоимости. В условиях арктических регионов в перспективе все будет зависеть от того, какие меры будут предприняты на уровне государства. Вектор развития

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

инициатив CC(U)S будет в большей степени зависеть от государственной низкоуглеродной политики.

В рассматриваемом примере метанол на основе CO₂ при расчетной себестоимости 680 долл. США за тонну не выдерживает ценовой конкуренции с метанолом, производимым из ископаемого сырья, стоимость которого обычно варьируется в пределах 300 долл. США за тонну [55]. Как было отмечено выше, основным фактором, влияющим на прибыльность проекта, является цена электроэнергии, влияющая на цену производства водорода. В случае Исландии цена возобновляемой энергии — 40 долл. США / Мвт, что по курсу 74 руб. за один доллар США составит 2 960 руб. / Мвт. Говоря же о перспективах применимости проекта в условиях российской Арктики, препятствием на сегодняшний день может стать не только стоимость электроэнергии, но и отсутствие доступных мощностей возобновляемых источников энергии на северных территориях.

В рассматриваемом проекте для производства водорода было задействовано 11,5 Мвт электроэнергии, поступающей от возобновляемого источника [43]. По данным геоинформационной системы «Возобновляемые источники энергии», на сегодняшний день российская Арктика не обладает возобновляемыми источниками достаточной мощности для реализации подобного проекта [56]. Единственный проект на территории Мурманской области, обладающий мощностью 201 Мвт, — Кольская ветроэлектростанция, которая находится на этапе строительства. При этом

предполагаемая минимальная цена энергии с учетом платы за мощность, несмотря на снижение, составляет 5500 руб. / Мвт, что сильно превышает стоимость электроэнергии в рассматриваемом примере.

Очевидно, что экономическая эффективность утилизации CO₂ зависит от многих факторов, таких как стоимость электроэнергии, величина затрат на улавливание, транспортные расходы, уровень развития технологий утилизации, стоимость товаров, произведенных по традиционным технологиям, и т. д. В связи с этим возможные масштабы распространения CCU будут варьироваться от случая к случаю. Внешние факторы, например налоги на углерод или системы торговли квотами на выбросы, которые становятся все более популярными, могут ускорить развитие инициатив по утилизации CO₂. Здесь стоит отметить внесение на рассмотрение законопроекта об экспериментальном квотировании выбросов крупнейших эмитентов парниковых газов на территории Сахалина [57]. Совершенствование технологий также сделает их более дешевыми, что позволит быстрее расширять новые рынки, создавать рабочие места и способствовать внедрению циркулярной экономики, в том числе на арктических территориях.

Дальнейшие исследования авторов будут направлены на оценку перспектив внедрения технологий улавливания, использования и захоронения углерода в конкретных регионах АЗ РФ и на выявление основных препятствий, которые могут возникнуть на пути их развития.

Список источников

1. Global Warming of 1.5 °C // Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: <https://www.ipcc.ch/sr15/> (дата обращения: 16.10.2021).
2. AMAP. Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts. Summary for Policy-makers // Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2021. P. 16. URL: <https://www.amap.no/documents/download/6759/inline> (дата обращения: 16.10.2021).
3. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2020 год // Росгидромет. URL: <http://www.meteorf.ru/product/infomaterials/90/> (дата обращения: 16.10.2021).
4. Диагностический анализ состояния окружающей среды Арктической зоны Российской Федерации: монография / В. В. Гордеев [и др.]. М.: Глобальный экологический фонд, 2011. 1260 с.
5. Социально-экономическое развитие северо-арктических территорий России: монография / коллектив авторов; под науч. ред. Т. П. Скуфыной, Е. Е. Емельяновой. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2019. 119 с.: ил. + Прил. (5 с.).
6. Деятельность крупных нефтегазовых компаний в Арктической зоне России // Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО. URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_RU_Arctic_Vol2.pdf (дата обращения: 16.10.2021).
7. Железная дорога «Обская — Бованенково» // Газпром. URL: <https://www.gazprom.ru/projects/obskaya-bovanenково> (дата обращения: 23.10.2021).
8. Проект «Ямал СПГ» // НОВАТЭК. URL: https://www.novatek.ru/ru/business/yamal-Ing/yamal_infrastructure/ (дата обращения: 23.10.2021).
9. Energy Technology Perspectives 2020. Special Report on Carbon Capture, Utilisation and Storage // International Energy Agency, 2020. URL: <https://webstore.iea.org/download/direct/4191> (дата обращения: 10.11.2021).

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

10. Building a New Carbon Economy: An Innovation Plan // Center for Carbon Removal, 2019. URL: <https://static1.squarespace.com/static/5b9362d89d5abb8c51d474f8/t/5b98380721c67ca6485cf282/1536702476202/ccr02.innovationplan.FNL.pdf> (дата обращения: 10.11.2021).
11. Череповицын А. Е. Экономико-социальные аспекты развития технологий захвата и захоронения CO₂ в нефтегазовом комплексе России // Записки Горного института. 2015. № 211. С. 125–130.
12. Global Status of CCS 2021 // Global CCS Institute, 2021. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/> (дата обращения: 10.11.2021).
13. Vasilev Y., Vasileva P., Tsvetkova A. International review of public perception of CCS technologies // 19th International Mul-tidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM. 2019. No. 19 (5.1). P. 415–422.
14. Ilinova A., Romasheva N., Stroykov G. Prospects and social effects of carbon dioxide sequestration and utilization projects // Journal of Mining Institute 2020. No. 244. P. 493–502. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.12
15. Bellotti D., Rivarolo M., Magistri L. Economic feasibility of methanol synthesis as method for CO₂ reduction and energy storage // Energy Procedia. 2019. No. 158. P. 4721–472. DOI:10.1016/j.egypro.2019.01.730
16. Reuse: Carbon Reuse // International Energy Agency, 2020.
17. Tsvetkov P., Cherepovitsyn A., Fedoseev S. The Changing Role of CO₂ in the Transition to a Circular Economy: Review of Carbon Sequestration Projects // Sustainability. 2019. No. 11 (20). P. 5834. DOI: 10.3390/su11205834
18. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The Circular Economy — A new sustainability paradigm? // Journal of Cleaner Production. 2017. No. 143. P. 757–768. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048
19. Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change // Ellen MacArthur Foundation, 2019. URL: <https://emf.thirdlight.com/link/w750u7vysuy1-5a5i6n/@/preview/1?o> (дата обращения: 10.11.2021).
20. Our common future / World commission on environment and development. 1987. No. 17 (1). P. 1–91.
21. Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication // UNEP, 2011. URL: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/126GER_synthesis_en.pdf (дата обращения: 10.11.2021).
22. Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition // Ellen MacArthur Foundation, 2015. URL: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition> (дата обращения: 10.11.2021).
23. Александрова В. Д. Современная концепция циркулярной экономики // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. № 5–1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennaya-kontsepsiya-tsirkulyarnoy-ekonomiki> (дата обращения: 12.11.2021).
24. Национальный стандарт РФ «Ресурсосбережение и обращение с отходами». Введ. 2018–05–01. М., 2019. 20 с.
25. Ключи к устойчивому развитию Арктической зоны Российской Федерации: модель циркулярной экономики и логистическая инфраструктура / Н. И. Диденко, Д. Ф. Скрипнюк, В. И. Черенков, А. В. Таничев // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2020. № 4 (70). С. 5–20. DOI: 10.37614/2220-802X.4.2020.70.001
26. Ivanova M., Dyachenko N. Circular Economy: Opportunities for Development of Russia's Arctic Regions // International Scientific Conference “Social and Cultural Transformations in the Context of Modern Globalism”. P. 9. DOI: 10.15405/epsbs.2020.10.05.255
27. Bogoviz A. V., Sergi B. S. Will the Circular Economy Be the Future of Russia's Growth Model? Sergi, B. S. (Ed.) Exploring the Future of Russia's Economy and Markets. Bingley: Emerald Publishing Limited, 2018. P. 125–141. DOI: 10.1108/978-1-78769-397-520181007
28. Севастьянова А. Е. Инновации и формирование циркулярной экономики как элемент устойчивого развития северных ресурсных регионов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2020. 16-й Международный научный конгресс (Новосибирск, 18 июня — 8 июля 2020 г.). Новосибирск: СГУГиТ, 2020. № 1. С. 191–199. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-3-1-191-199
29. Устойчивое водопользование в Арктике. Новые подходы и решения / Н. А. Кашулин, В. А. Даувальтер, Т. П. Скуфьина, В. А. Котельников // Арктика: экология и экономика. 2018. № 4 (32). С. 15–29. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-15-29
30. Указ № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». Введ. 26.10.2020. М., 2020. 42 с.
31. About CCUS // International Energy Agency, 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/about-ccus> (дата обращения: 10.11.2021).
32. CCUS in Clean Energy Transitions // International Energy Agency, 2020. URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions> (дата обращения: 10.11.2021).
33. Ide S. T., Friedmann S. J. & Herzog H. Leakage through existing wells: current technology and regulations // Proceedings of the 8th Greenhouse Gas Technology Conference. URL: <https://www.researchgate.net/publication/>

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

- 238087781_CO2_leakage_through_existing_wells_current_technology_and_regulations (дата обращения: 12.11.2021).
34. Aydin, Gokhan; Karakurt, Izzet; Aydiner, Kerim. Evaluation of geologic storage options of CO₂: Applicability, cost, storage capacity and safety // Energy Policy. Special Section on Carbon Emissions and Carbon Management in Cities with Regular Papers. 2010. № 38 (9). P. 5072–5080. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.04.035
 35. Putting CO₂ to Use: Creating Value from Emissions // International Energy Agency, 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use> (дата обращения: 12.11.2021).
 36. Ringrose P. S. The CCS hub in Norway: some insights from 22 years of saline aquifer storage // Energy Procedia. 2018. № 146. P. 166–172. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.021
 37. The world has vast capacity to store CO₂: Net zero means we'll need it // International Energy Agency, 2021. URL: <https://www.iea.org/commentaries/the-world-has-vast-capacity-to-store-co2-net-zero-means-we-ll-need-it> (дата обращения: 12.11.2021).
 38. CO₂ utilisation in a nutshell // SCOTproject. URL: <http://www.scotproject.org/images/CO2%20utilisation%20in%20a%20nutshell.pdf> (дата обращения: 14.11.2021).
 39. Can Removing Carbon from the Atmosphere Save Us from Climate Catastrophe? URL: <https://news.climate.columbia.edu/2018/11/27/carbon-dioxide-removal-climate-change/> (дата обращения: 12.11.2021).
 40. A Review of Global and U. S. Total Available Markets for Carbontech // Center for Carbon Removal. URL: <https://static1.squarespace.com/static/5b9362d89d5abb8c51d474f8/t/5c0028d270a6ad15d0efb520/1543514323313/ccr04.executivesummary.FNL.pdf> (дата обращения: 12.11.2021).
 41. Официальный сайт CarbonCure. URL: <https://www.carboncure.com/resourcetype/reference-projects/> (дата обращения: 25.10.2021).
 42. Официальный сайт Solidia. URL: <https://www.solidiatech.com/solutions.html> (дата обращения: 25.10.2021).
 43. Stefánsson B. CRI technology and CCU project development in Norway / Carbon Recycling International, Брюссель, Бельгия, 2020. URL: <https://www.prosess21.no/contentassets/52fc2f61d22f484aa4c205ef423c6e07/crisprosess21-webinar-on-ccu-c-2020-05-20.pdf> (дата обращения: 12.11.2021).
 44. Carbon Utilization — A Vital and Effective Pathway for Decarbonization // Center for Climate and Energy Solutions, 2019. URL: <https://www.c2es.org/site/assets/uploads/2019/09/carbon-utilization-a-vital-and-effective-pathway-for-decarbonization.pdf> (дата обращения: 12.11.2021).
 45. Cho R. Capturing Carbon's Potential: These Companies Are Turning CO₂ into Profits. URL: <https://blogs.ei.columbia.edu/2019/05/29/co2-utilization-profits/> (дата обращения: 12.11.2021).
 46. Selecting emerging CO₂ utilization products for short- to mid-term deployment / R. Chauvy, N. Meunier, D. Thomas, G. De Weireld // Appl. Energy. 2019. No. 236, P. 662–680. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.11.096
 47. Hepburn C., Adlen E., Beddington J. The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal // Nature. 2019. No. 575. P. 87–97. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>
 48. Biniek K. Driving CO₂ emissions to zero (and beyond) with carbon capture, use, and storage // McKinsey & Company, 2020. URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/driving-co2-emissions-to-zero-and-beyond-with-carbon-capture-use-and-storage> (дата обращения: 25.10.2021).
 49. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2020 // International Energy Agency, 2020. URL: <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020> (дата обращения: 12.11.2021).
 50. Carbon Recycling International. Projects. URL: <https://www.carbonrecycling.is/projects#project-goplant> (дата обращения: 12.11.2021).
 51. Production of renewable methanol from captured emissions and renewable energy sources, for its utilisation for clean fuel production and green consumer goods. CORDIS Europe. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/848757> (дата обращения: 12.11.2021).
 52. Zheng L., Breitschopf B. Electricity costs of energy intensive industries in Iceland — a comparison with energy intensive industries in selected countries. Karlsruhe, Germany: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, 2020. URL: <https://www.stjornarradid.is/library/01--Frettatengt---myndir-og-skrar/ANR/ThKRG/Report%20Iceland-FINAL.pdf> (дата обращения: 12.11.2021).
 53. Innovation Outlook: Renewable Methanol // International Renewable Energy Agency, 2021. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf (дата обращения: 12.11.2021).
 54. Biodiesel prices / Neste. URL: <https://www.neste.com/investors/market-data/biodiesel-prices-sme-fame> (дата обращения: 12.11.2021).
 55. Methanol prices. ISHTAR company. URL: <https://ishtarcompany.com/knowledge-base/methanol-prices/> (дата обращения: 12.11.2021).

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

56. Проект «Геоинформационная система «Возобновляемые источники энергии России». URL: <https://gisre.ru/maps/maps-obj> (дата обращения: 12.11.2021).
57. Проект Федерального закона «О проведении эксперимента по установлению специального регулирования выбросов и поглощения парниковых газов в Сахалинской области». URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=PRJ&n=206617#dC1QLpSE0Z8IXsk3> (дата обращения: 12.11.2021).

References

1. Global Warming of 1.5 °C. Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/> (accessed 16.10.2021).
2. AMAP. Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts. Summary for Policy-makers. Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2021, p. 16. Available at: <https://www.amap.no/documents/download/6759/inline> (accessed 16.10.2021).
3. Obzor sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy v Rossijskoj Federacii za 2020 god [Overview of the state and pollution of the environment in the Russian Federation in 2020]. Rosgidromet. (In Russ.). Available at: <http://www.meteorf.ru/product/infomaterials/90/> (accessed 16.10.2021).
4. Gordeev V. V., Danilov A. A., Evseev A. V., Kochemasov Y. V., Luk'anov Y. S., Lyskov V. N., Moiseenko T. I., Murashko O. A., Nemirovskaya I. A., Patin S. A., Solomatin V. I., Sotskov Y. P., Strahov V. V., Tishkov A. A., Treger Yu. A., Shevkhovkov A. A., Shishova O. N. *Diagnosticheskij analiz sostoyaniya okruzhayushchej sredy Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii* [Diagnostic analysis of the state of the environment of the Arctic zone of the Russian Federation]: monograph. Moscow, Global Environment Foundation, 2011, pp. 1260. (In Russ.).
5. *Social'no-ekonomicheskoe razvitie severo-arkticheskikh territorij Rossii* [Socio-economic development of the North-Arctic territories of Russia]. Apatity, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 2019, pp. 119. (In Russ.).
6. Deyatel'nost' krupnyh neftegazovyh kompanij v Arkticheskoy zone Rossii [Activities of major oil and gas companies in the Arctic zone of Russia]. Skolkovo Energy Centre. (In Russ.). Available at: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_RU_Arctic_Vol2.pdf (accessed 16.10.2021).
7. Zheleznyaya doroga "Obskaya — Bovanenkovo" [Obskaya — Bovanenkovo railway]. Gazprom. (In Russ.). Available at: <https://www.gazprom.ru/projects/obskaya-bovanenkovo> (accessed 23.10.2021).
8. Proekt "Yamal SPG" [Yamal LNG Project]. Novatek. (In Russ.). Available at: https://www.novatek.ru/ru/business/yamal-Ing/yamal_infrastructure/ (accessed 23.10.2021).
9. Energy Technology Perspectives 2020. Special Report on Carbon Capture, Utilisation and Storage. International Energy Agency, 2020. Available at: <https://webstore.iea.org/download/direct/4191> (accessed 10.11.2021).
10. Building a New Carbon Economy: An Innovation Plan. Center for Carbon Removal, 2019. Available at: <https://static1.squarespace.com/static/5b9362d89d5abb8c51d474f8/t/5b98380721c67ca6485cf282/1536702476202/ccr02.innovationplan.FNL.pdf> (accessed 10.11.2021).
11. Cherepovitsyn A. E. Ekonomiko-social'nye aspekty razvitiya tekhnologij zahvata i zahoroneniya CO₂ v neftegazovom komplekse Rossii [Economic and social aspects of the development of CO₂ capture and storage technologies in the oil and gas complex of Russia]. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2015, no. 211, pp. 125–130. (In Russ.).
12. Global Status of CCS 2021. Global CCS Institute, 2021. Available at: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/> (accessed 10.11.2021).
13. Vasilev Y., Vasileva P., Tsvetkova A. International review of public perception of CCS technologies. *19th International Mul-tidisciplinary Scientific Geo Conference SGEM*, 2019, no. 19 (5.1), pp. 415–422.
14. Ilinova A., Romasheva N., Stroykov G. Prospects and social effects of carbon dioxide sequestration and utilization projects. *Journal of Mining Institute*, 2020, no. 244, pp. 493–502. DOI: 10.31897/PMI.2020.4.12
15. Bellotti D., Rivarolo M., Magistri L. Economic feasibility of methanol synthesis as method for CO₂ reduction and energy storage. *Energy Procedia*, 2019, no. 158, pp. 4721–472. DOI:10.1016/j.egypro.2019.01.730
16. Reuse: Carbon Reuse. International Energy Agency, 2020.
17. Tsvetkov P., Cherepovitsyn A., Fedoseev S. The Changing Role of CO₂ in the Transition to a Circular Economy: Review of Carbon Sequestration Projects. *Sustainability*, 2019, no. 11 (20), pp. 5834. DOI: 10.3390/su11205834
18. Geissdoerfer M., Savaget P., Bocken N. M. P., Hultink E. J. The Circular Economy — A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 2017, no. 143, pp. 757–768. DOI:10.1016/j.jclepro.2016.12.048
19. Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change. Ellen MacArthur Foundation, 2019. Available at: <https://emf.thirdlight.com/link/w750u7vysuy1-5a5i6n/@/preview/1?o> (accessed 10.11.2021).
20. Our common future. World commission on environment and development, 1987, no. 17 (1), pp. 1–91.
21. Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. UNEP, 2011. Available at: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/126GER_synthesis_en.pdf (accessed 10.11.2021).

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

22. Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition. Ellen MacArthur Foundation, 2015. Available at: <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition> (accessed 10.11.2021).
23. Aleksandrova V. D. Sovremennaya koncepciya cirkulyarnoj ekonomiki [The modern concept of circular economy]. *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyh i estestvennyh nauk* [International Journal of the Humanities and Natural Sciences], 2019, no. 5–1. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennaya-kontseptsiya-tirkulyarnoy-ekonomiki> (accessed 12.11.2021).
24. Nacional'nyj standart RF "Resursosberezhenie i obrashchenie s othodami" [National Standard of the Russian Federation "Resource Conservation and Waste Management"], 01.05.2018. Moscow, 2019, 20 p. (In Russ.).
25. Didenko N. I., Skripnyuk D. F., Cherenkov V. I., Tanichev A. V. Klyuchi k ustojchivomu razvitiyu Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii: model' cirkulyarnoj ekonomiki i logisticheskaya infrastruktura [Keys to Sustainable Development of the Arctic Zone of the Russian Federation: Circular Economy Model and Logistics Infrastructure]. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo porjadka* [The North and the Market: Shaping the Economic Order], 2020, no. 4 (70), pp. 5–20. (In Russ.). DOI: 10.37614/2220-802X.4.2020.70.001
26. Ivanova M., Dyachenko N. Circular Economy: Opportunities for Development of Russia's Arctic Regions. *International Scientific Conference "Social and Cultural Transformations in the Context of Modern Globalism"*, p. 9. DOI: 10.15405/epsbs.2020.10.05.255
27. Bogoviz A. V., Sergi B. S. Will the Circular Economy Be the Future of Russia's Growth Model? Sergi, B. S. (Ed.) Exploring the Future of Russia's Economy and Markets, Bingley, Emerald Publishing Limited, 2018, pp. 125–141. DOI:10.1108/978-1-78769-397-520181007
28. Sevastyanova A. E. Innovacii i formirovanie cirkulyarnoj ekonomiki kak element ustojchivogo razvitiya severnyh resursnyh regionov [Innovation and formation of circular economy as an element of sustainable development of northern resource regions]. *Interexpo GEO-Siberia 2020*. Novosibirsk, 2020, no. 1, pp. 191–199. (In Russ.). DOI: 10.33764/2618-981X-2020-3-1-191-199
29. Kashulin N. A., Dauval'ter V. A., Skuf'ina T. P., Kotel'nikov V. A. Ustojchivoje vodopol'zovanie v Arktike. Novye podhody i resheniya [Sustainable Water Management in the Arctic. New approaches and solutions]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [The Arctic: Ecology and Economics], 2018, no. 4 (32), pp. 15–29. (In Russ.). DOI: 10.25283/2223-4594-2018-4-15-29
30. Ukaz № 645 ot 26.10.2020. "O Strategii razvitiya Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii i obespecheniya nacional'noj bezopasnosti na period do 2035 goda" [Decree of the President of the Russian Federation No. 645 of 26th October, 2020. On the Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035]. Moscow, 2020, 42 p. (In Russ.).
31. About CCUS. International Energy Agency, 2021. Available at: <https://www.iea.org/reports/about-ccus> (accessed 10.11.2021).
32. CCUS in Clean Energy Transitions. International Energy Agency, 2020. Available at: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions> (accessed 10.11.2021).
33. Ide S. T., Friedmann S. J. & Herzog H. Leakage through existing wells: current technology and regulations. Proceedings of the 8th Greenhouse Gas Technology Conference. Available at: https://www.researchgate.net/publication/238087781_CO2_leakage_through_existing_wells_current_technology_and_regulations (accessed 12.11.2021).
34. Aydin, Gokhan; Karakurt, Izzet; Aydiner, Kerim. Evaluation of geologic storage options of CO₂: Applicability, cost, storage capacity and safety. *Energy Policy. Special Section on Carbon Emissions and Carbon Management in Cities with Regular Papers*, 2010, no. 38 (9), pp. 5072–5080. DOI:10.1016/j.enpol.2010.04.035
35. Putting CO₂ to Use: Creating Value from Emissions. International Energy Agency, 2019. Available at: <https://www.iea.org/reports/putting-co2-to-use> (accessed 12.11.2021).
36. Ringrose P. S. The CCS hub in Norway: some insights from 22 years of saline aquifer storage. *Energy Procedia*, 2018, no. 146, pp. 166–172. DOI:10.1016/j.egypro.2018.07.021
37. The world has vast capacity to store CO₂: Net zero means we'll need it. International Energy Agency, 2021. Available at: <https://www.iea.org/commentaries/the-world-has-vast-capacity-to-store-co2-net-zero-means-we-ll-need-it> (accessed 12.11.2021).
38. CO₂ utilisation in a nutshell. SCOTproject. Available at: <http://www.scotproject.org/images/CO2%20utilisation%20in%20a%20nutshell.pdf> (accessed 14.11.2021).
39. Can Removing Carbon from the Atmosphere Save Us from Climate Catastrophe? Available at: <https://news.climate.columbia.edu/2018/11/27/carbon-dioxide-removal-climate-change/> (accessed 12.11.2021).
40. A Review of Global and U. S. Total Available Markets for Carbontech. Center for Carbon Removal. Available at: <https://static1.squarespace.com/static/5b9362d89d5abb8c51d474f8/t/5c0028d270a6ad15d0efb520/1543514323313/ccr04.executivesummary.FNL.pdf> (accessed 12.11.2021).

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

41. CarbonCure. Available at: <https://www.carboncure.com/resourcetype/reference-projects/> (accessed 25.10.2021).
42. Solidia. Available at: <https://www.solidiatech.com/solutions.html> (accessed 25.10.2021).
43. Stefánsson B. CRI technology and CCU project development in Norway. Carbon Recycling International, Brussel, Belgium, 2020. Available at: <https://www.prosess21.no/contentassets/52fc2f61d22f484aa4c205ef423c6e07/crisprosess21-webinar-on-ccu-c-2020-05-20.pdf> (accessed 12.11.2021).
44. Carbon Utilization — A Vital And Effective Pathway For Decarbonization. Center for Climate and Energy Solutions, 2019. Available at: <https://www.c2es.org/site/assets/uploads/2019/09/carbon-utilization-a-vital-and-effective-pathway-for-decarbonization.pdf> (accessed 12.11.2021).
45. Cho R. Capturing Carbon's Potential: These Companies Are Turning CO₂ into Profits. Available at: <https://blogs.ei.columbia.edu/2019/05/29/co2-utilization-profits/> (accessed 12.11.2021).
46. Chauvy R., Meunier N., Thomas D., De Weireld G. Selecting emerging CO₂ utilization products for short- to mid-term deployment. *Appl. Energy*, 2019, no. 236, pp. 662–680. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.11.096
47. Hepburn C., Adlen E., Beddington J. The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal. *Nature*, 2019, no. 575, pp. 87–97. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>
48. Biniek K. Driving CO₂ emissions to zero (and beyond) with carbon capture, use, and storage. McKinsey & Company, 2020. Available at: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/driving-co2-emissions-to-zero-and-beyond-with-carbon-capture-use-and-storage> (accessed 25.10.2021).
49. Global Energy Review: CO₂ Emissions in 2020. International Energy Agency, 2020. Available at: <https://www.iea.org/articles/global-energy-review-co2-emissions-in-2020> (accessed 12.11.2021).
50. Carbon Recycling International. Projects. Available at: <https://www.carbonrecycling.is/projects#project-goplant> (accessed 12.11.2021).
51. Production of renewable methanol from captured emissions and renewable energy sources, for its utilisation for clean fuel production and green consumer goods. CORDIS Europe. Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/848757> (accessed 12.11.2021).
52. Zheng L., Breitschopf B. Electricity costs of energy intensive industries in Iceland — a comparison with energy intensive industries in selected countries. Karlsruhe, Germany: Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, 2020. Available at: <https://www.stjornarradid.is/library/01--Frettatengt---myndir-og-skrar/ANR/ThKRG/Report%20Iceland-FINAL.pdf> (accessed 12.11.2021).
53. Innovation Outlook: Renewable Methanol. International Renewable Energy Agency, 2021. Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf (accessed 12.11.2021).
54. Biodiesel prices. Neste. Available at: <https://www.neste.com/investors/market-data/biodiesel-prices-sme-fame> (accessed 12.11.2021).
55. Methanol prices. ISHTAR company. Available at: <https://ishtarcompany.com/knowledge-base/methanol-prices/> (accessed 12.11.2021).
56. Proekt "Geoinformacionnaya sistema "Vozobnovlyaemye istochniki energii Rossii" [Project "Geoinformation System "Renewable Energy Sources of Russia"]. (In Russ.). Available at: <https://gisre.ru/maps/maps-obj> (accessed 12.11.2021).
57. Proekt Federal'nogo zakona "O provedenii eksperimeta po ustanovleniyu special'nogo regulirovaniya vybrosov i pogloshcheniya parnikovyh gazov v Sahalinskoj oblasti" [Draft Federal Law "On conducting an experiment to establish special regulation of emissions and absorption of greenhouse gases in the Sakhalin Oblast"]. (In Russ.). Available at: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=PRJ&n=206617#dC1QLpSE0Z8IXsk3> (accessed 12.11.2021).

Об авторах:

Е. А. Кузнецова — магистр

А. А. Череповицына — канд. экон. наук, доцент

About the authors:

Ekaterina A. Kuznetsova — Graduate Student

Alina A. Cherepovitsyna — PhD, Associate Professor

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2021 года

Статья принята к публикации 23 ноября 2021 года

The article was submitted on November 15, 2021

Accepted for publication on November 23, 2021