

Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов

А.А. Череповицына^{1,2}  , И.П. Дорожкина¹, В.М. Костылева²

¹ Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина Кольского научного центра РАН,
184209, Мурманская обл., Апатиты, ул. Ферсмана, д. 24а, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»,
141006, Московская обл., Мытищи, Олимпийский просп., д. 42, Российская Федерация

 iljinovaAA@mail.ru

Аннотация. Увеличение массы выбросов углекислого газа в настоящее время рассматривается как основной фактор усиления парникового эффекта, приводящего, по мнению ряда ученых, к глобальному потеплению. Данная проблема стала предпосылкой для развития и внедрения разных опций декарбонизации, в том числе, технологий секвестрации (улавливание и хранение) и использования CO₂ (технологии CC(U)S – carbon capture, utilization and storage). Технологии направлены на сокращение выбросов углекислого газа путем его улавливания на промышленных объектах (реже – из атмосферы) и могут рассматриваться как комплементарные и критически необходимые для движения к углеродной нейтральности, так как позволяют избежать радикальных изменений в энергетических и промышленных процессах. Исследование направлено на изучение мирового опыта и сущности инициатив CC(U)S с целью разработки комплексной классификации проектов секвестрации и использования CO₂ для систематизации существующих знаний и практических аспектов по теме. Авторами предложен вариант комплексной классификации проектов с группировкой признаков по базовым, технологическим и организационно-экономическим характеристикам и выделением разных видов проектов по предложенным признакам. Для апробации разработанной классификации представлен классификационный профиль по действующим проектам CC(U)S, реализуемым в США, Великобритании и Китае. Результаты исследования могут быть использованы для планирования деятельности в области развития технологий секвестрации и использования CO₂ в России, принятия решений по этим инициативам, в том числе касаясь финансирования и поддержки таких проектов на государственном уровне.

Ключевые слова: экономика природопользования, углекислый газ, секвестрация, использование, мировой опыт, классификация, технологии секвестрации, технологии CC(U)S, декарбонизация

Для цитирования: Череповицына А.А., Дорожкина И.П., Костылева В.М. Секвестрация и использование углекислого газа: сущность технологий и подходы к классификации проектов. *Экономика промышленности*. 2022;15(4):473–487. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2022-4-473-487>

Sequestration and use of carbon dioxide: the essence of technology and approaches to the classification of the projects

A.A. Cherepovitsyna^{1,2}  , I.P. Dorozhkina¹, V.M. Kostyleva²

¹ Luzin Institute for Economic Studies – Subdivision of the Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”, 24a Fersmana Str, Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation

² Research Institute “Center for Environmental Industrial Policy”,
42, Olympiyskiy Ave., Mytishchi, Moscow region, 141006, Russian Federation

 iljinovaAA@mail.ru

Abstract. Currently, increasing the mass of carbon dioxide emissions is regarded as the main factor of increasing the greenhouse effect that is considered by the scientists to be the cause of the global warming. The problem has stimulated the development and implementation of

various options of decarbonization including the sequestration technology (CCS – capture and storage) and carbon dioxide utilization (CC(U)S technology – carbon capture, utilization and storage). The technologies are aimed at reducing carbon dioxide emissions by capturing the gas at the industrial premises (rarely from the atmosphere) and can be regarded as complementary and crucially essential for achieving carbon neutrality as they allow avoiding radical transformations of energy and industrial processes. The study is directed towards analyzing the world experience and the essence of CC(U)S initiatives to develop complex classification of sequestration projects and use of CO₂ to systematize the existing knowledge and practical aspects on the subject. The authors suggest a variant of complex classification of the projects that involves grouping the features by basic, technological and organizational and economic characteristics and identifying different types of projects according to the suggested features. In order to test the classification the authors introduce a classification profile on the existing CC(U)S projects implemented in the USA, the UK and China. The findings can be used for planning the activities in the area of development of sequestration and carbon dioxide utilization technologies in Russia, for making decisions on these initiatives including those regarding financing and support of such projects at the government level.

Keywords: economics of environmental management, carbon dioxide, sequestration, utilization, world experience, classification, sequestration technologies, CC(U)S technologies, decarbonization

For citation: Cherepovitsyna A.A., Dorozhkina I.P., Kostyleva V.M. Sequestration and use of carbon dioxide: the essence of technology and approaches to the classification of the projects. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2022;15(4):473–487. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2022-4-473-487>

碳封存和利用：项目的技术本质和分类方法

A.A. Cherepovitsyna^{1, 2}  , I.P. Dorozhkina¹, V.M. Kostyleva²

¹ 俄罗斯科学院科拉科学中心卢金经济问题研究所，

184209，俄罗斯联邦摩尔曼斯克州阿帕季特市费尔斯曼街24a号

² “环境产业政策中心”研究所，141006，俄罗斯联邦莫斯科州梅季希市奥林匹克大街42号

 iljinovaAA@mail.ru

摘要：二氧化碳排放量的增加目前被认为是温室效应的主要因素，根据一些科学家的说法，这导致了全球气候变暖。这个问题成为开发和实施各种去碳化方案的前提，包括二氧化碳封存（捕集和封存）和利用技术（CC（U）S技术-- CC(U)S – carbon capture, utilization and storage）。CC（U）S技术旨在通过从工业碳排放源捕集二氧化碳（一小部分从大气中捕集）来减少二氧化碳的排放，是实现碳中和的关键核心技术，因为它们避免了能源和工业过程的彻底改变。该研究旨在研究CC（U）S项目的全球经验和CC（U）S倡议的精髓，以便对二氧化碳封存和利用项目进行全面分类，使与CC（U）S相关的现有知识和实践系统化。作者提出了一个项目综合分类方案，根据基本特征、技术特征、组织特征和经济特征进行分组，并根据提出的特征区分不同类型的项目。为了测试所开发的分类方案，介绍了在美国、英国和中国实施的现有CC（U）S项目的分类情况。研究结果可用于规划俄罗斯在发展二氧化碳封存和利用技术方面的活动，对CC（U）S倡议做出决策，包括在国家层面对此类项目提供资助和支持。

关键词：环境经济学，二氧化碳，封存，利用，全球经验，分类，封存技术，CC（U）S技术，去碳化

Введение

Проблема глобального потепления становится все более актуальной для мирового сообщества и требует принятия комплекса мер по ее решению. По мнению ученых, основной причиной изменения климата является парниковый эффект, на увеличение которого влияют выбросы парниковых газов, в том числе, углекислого газа (CO₂). Парниковый эффект образу-

ется как из природных источников, например, во время дыхания существ-аэробов, извержения вулканов, горения лесов, перегнивания органики, так и из техногенных, к которым относят сжигание ископаемого топлива для производства электроэнергии, транспорта, строительства и других отраслей [1]. Согласно отчету Межправительственной группы экспертов по изменению климата (Intergovernmental Panel on Climate

Change – IPCC) [2], масса глобальных выбросов парниковых газов продолжает увеличиваться ежегодно со средним темпом роста порядка 1,3 % за последнее десятилетие.

Данная проблема стала предпосылкой для разработки и принятия ряда соглашений, являющихся правовой основой международного взаимодействия по вопросам изменения климата, таких как Рамочная конвенция ООН об изменении климата (1992 г.) [3], Киотский протокол (1997 г.) [4], Парижское соглашение по климату (2015 г.) [5]. Россия является стороной всех перечисленных соглашений и занимает активную позицию по вопросам снижения выбросов парниковых газов.

Декарбонизация – сложный, комплексный процесс, реализация которого требует совместных скоординированных усилий на уровне отдельных стран, национальных экономик, отраслей и комплексов, промышленных компаний. К основным опциям декарбонизации в настоящее время относят повышение энергоэффективности, изменения в потребительском поведении (экологичное потребление), электрификацию, переход на возобновляемые источники энергии (ВИЭ), водород и топливо на его основе, биоэнергетику, а также внедрение технологий секвестрации (улавливание и хранение) и использования CO₂ (технологии CC(U)S – carbon capture, utilization and storage) [6]. Согласно заявлениям различных мировых агентств, технологии CC(U)S одни из немногих являются коммерчески доступными и могут служить не только для снижения массы выбросов парниковых газов. Они также позволяют «продлить жизнь» ископаемым видам топлива, полный отказ от которого не может быть осуществлен в краткосрочной перспективе [7; 8]. Эксперты сходятся во мнении, что инициативы CC(U)S займут устойчивые позиции и будут активно масштабироваться в секторах, в которых применение других опций декарбонизации затруднено [9].

На сегодняшний день развитие технологий и проектов секвестрации и использования CO₂ находится на начальных этапах. Согласно базе данных Глобального института CCS (Global CCS Institute) [10], являющейся основным источником информации по объектам CC(U)S, во всем мире на стадии эксплуатации находится 61 проект, тогда как в России действующие проекты отсутствуют (по состоянию на октябрь 2022 г.). В то же время комплекс технологий улавливания, использования и захоронения углекислого газа рассматривается как одно из направлений декарбонизации промышленного и энергетического сектора, что закреплено Стратегией социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г. [11].

Существует множество причин отсутствия проектов CC(U)S в России. Вместе с тем этот комплекс технологий вызывает интерес как со стороны промышленного сектора, так и на государственном уровне. Известно об опыте реализации на территории России пилотных проектов CC(U)S на нефтегазовых месторождениях, где CO₂ использовался для увеличения нефтеотдачи пластов [12]. Кроме того, ПАО НК «Роснефть» рассматривает возможность использования подземных хранилищ и собственных выработанных месторождений для проектов улавливания и хранения CO₂ [13]. По оценкам Международного энергетического агентства (International Energy Agency – IEA), теоретическая емкость российских хранилищ углекислого газа значительно превышает потенциал остальных стран [14]. По мнению экспертов, России необходимо внедрять накопленный опыт других стран в области CC(U)S, а также сделать упор на хранении и использовании CO₂ в нефтегазовых пластах в целях увеличения нефтеотдачи на территориях, приближенных к крупным промышленным объектам, а также вблизи развитой инфраструктуры [15].

Сам комплекс CC(U)S – это укрупненное название набора технологий, которые обычно соединены в технологическую цепь и направлены на захват CO₂, его очистку и подготовку, транспортировку, использование и/или захоронение. Такие цепи могут состоять из набора определенных этапов (например, только из захвата, транспортировки и захоронения газа), реализовываться в различных отраслях промышленности со своими особенностями (например, решения CO₂-EOR (Enhanced Oil Recovery – увеличение нефтеотдачи пластов)). Улавливание газа может осуществляться как с промышленных источников, так и из атмосферы с использованием различных технологий. Технологии, решения и способы, применяемые на стадиях улавливания, транспортировки и захоронения газа, также различны в каждом конкретном случае. С научной точки зрения это является предпосылкой для разработки набора признаков, по которым такие проекты могут быть классифицированы.

Вопросы развития технологий и проектов секвестрации и использования CO₂ достаточно активно освещаются в современной научной литературе, а также в аналитических материалах различных организаций. Так, наряду с другими аспектами ученые представляют результаты ис-

следований в области применяемых технологий улавливания, транспортировки и хранения углекислого газа [16–19]. Существует ряд исследований, связанных с оценкой роли CC(U)S для социума, экологии, экономики [20; 21]. В научной литературе и аналитических материалах также предпринимаются попытки разделения проектов секвестрации и использования углекислого газа на типы, предлагаются некоторые классификационные признаки. Так, ученые используют типологию проектов с выделением CCS, CCU, CCUS [22], а различные агентства и институты предлагают подходы к классификации, основанные на отраслях-адаптерах технологий, методах транспортировки и хранения CO₂, объемах производственных мощностей и т.д. [6; 9; 14]. В ежегодном аналитическом отчете The Global Status of CCS, выпускаемом Глобальным институтом CCS, предпринимается попытка систематизации CC(U)S проектов по отраслям с указанием размеров (мощности) проектов, а также представлены результаты анализа проектов в виде таблиц по следующим критериям: мощность проекта, отрасль, способ транспортировки и хранения.

Таким образом, в существующей литературе по теме встречаются элементы классификации и типологии проектов CC(U)S, однако предложения по комплексному набору признаков, по которым могут быть классифицированы такие проекты, в научных трудах не отражены. Это определило цель настоящего исследования, которая заключается в разработке комплексной классификации проектов CC(U)S. Необходимо отметить, что в данной статье представлена первая попытка разработки такой классификации.

Результаты исследования структурированы в статье следующим образом: в первом разделе кратко представлена сущность технологий и мировой опыт реализации инициатив CC(U)S; второй раздел посвящен разработанной авторами классификации проектов CC(U)S; в третьем разделе представлены результаты апробации разработанной классификации на примере трех действующих проектов: Acorn в Великобритании, North Dakota Carbonsafe в США, Sinopec Zhongyuan в Китае.

Методы и материалы исследования

Работа выполнена посредством проведения кабинетного исследования и базируется на контент-анализе существующих материалов по теме.

Материалами исследования выступили аналитические отчеты различных организаций, таких как Глобальный институт CCS, Международное энергетическое агентство, Институт

энергетического перехода Керни (Kearney Energy Transition Institute), Межправительственная группа экспертов по изменению климата и других, а также научные статьи по исследуемой теме. В качестве информационной базы по мировому опыту реализации инициатив CC(U)S использовалась база данных Глобального института CCS.

Основные применяемые методы исследования – научный анализ и синтез, а также методы системного, сравнительного, критического, причинно-следственного анализа. В работе использованы методы классификации, систематизации, типологии, декомпозиции, группировки. Особое внимание уделено экспертной оценке – сбору и анализу мнений экспертов по исследуемым вопросам.

Результаты

Рассмотрим основные результаты проведенного исследования:

1. Технологии и проекты секвестрации и использования CO₂: сущность и мировой опыт реализации.

Как было отмечено выше, возможны различные варианты реализации инициатив CC(U)S. Укрупненная технологическая схема CC(U)S, разработанная Глобальным институтом CCS и отражающая основные источники выбросов, варианты транспортировки и хранения CO₂, представлена на **рис. 1**.

В общем виде технологическая схема CC(U)S включает три последовательных этапа: 1) улавливание углекислого газа из источника выбросов; 2) транспортировка одним из известных способов; 3) повторное полезное использование газа или его закачка в целях долгосрочного хранения под землей.

Основными источниками техногенного CO₂ являются объекты энергетики и промышленности. Основные известные и используемые в мировой практике способы транспортировки – трубопроводы и морские суда (последние – реже), способы захоронения – в отработанных нефтяных и газовых, а также соленосных пластах. Последний этап может включать не только хранение, но и использование CO₂ на разрабатываемых нефтегазовых месторождениях в целях увеличения нефтеотдачи пластов (CO₂-EOR). Комплекс таких технологических решений с разной комбинацией звеньев технологической цепи лежит в основе проектов CC(U)S.

По данным Глобального института CCS, по состоянию на сентябрь 2022 г. в мире на разных стадиях реализации находится 198 коммерческих проектов (**рис. 2**). Согласно информации,

представленной в отчете The Global Status of CCS 2021 [7], в 2021 г. насчитывалось 135 коммерческих проектов (темп роста 47 %). Почти вдвое увеличилось количество проектов на ранних этапах разработки, что указывает на активизацию развития этого направления. Число проектов в экс-

плуатации при этом выросло лишь на три единицы, что может быть обусловлено длительностью периода адаптации технологий и строительства мощностей. Стоит отметить, что по сравнению с 2019 г. количество проектов в 2022 г. увеличилось почти втрое.

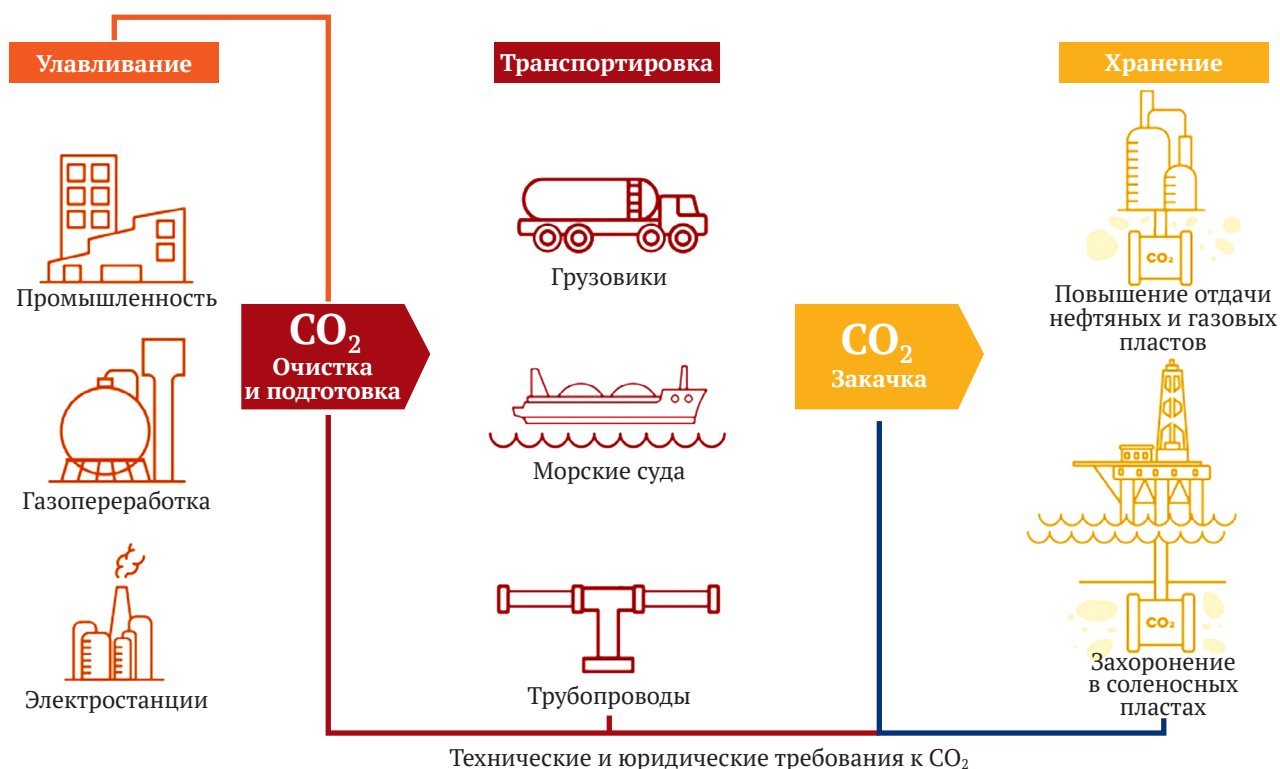


Рис. 1. Укрупненная схема технологического процесса секвестрации и использования CO₂ [23]

Fig. 1. Enlarged scheme of the technological process of sequestration and use of CO₂ [23]

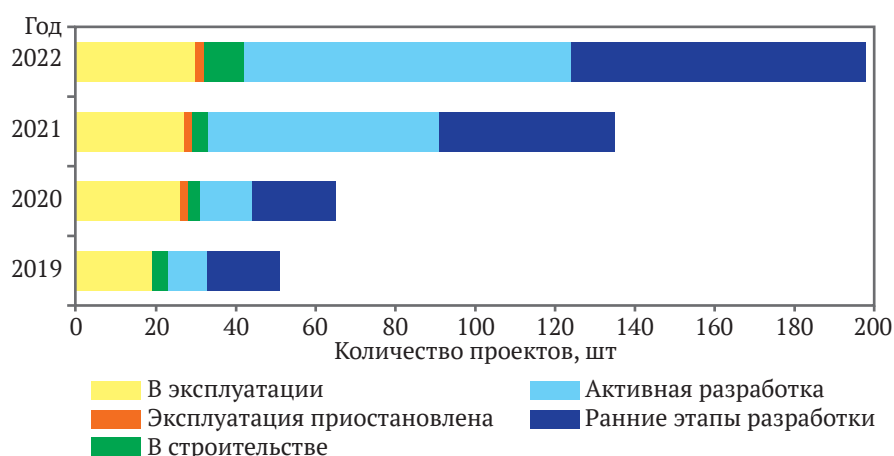


Рис. 2. Распределение мировых коммерческих проектов секвестрации и использования CO₂ по стадиям реализации в 2019–2022 гг.

Источник: составлено авторами на основании данных источника [7]

Fig. 2. Distribution of global commercial CO₂ sequestration and use projects by stage of implementation in 2019–2022

Source: compiled by the authors based on [7]

На сегодняшний день суммарная мощность коммерческих проектов на разных этапах составляет 149,3 Мт CO_2 в год. К 2050 г. для достижения целей Парижского соглашения по климату суммарная мощность проектов CC(U)S должна составлять не менее 5,6 Гт CO_2 в год, что подразумевает строительство от 70 до 100 объектов улавливания углекислого газа ежегодно [7].

База данных Глобального института CCS ранжирует проекты не только по стадиям реализации. Так, с помощью данного инструмента можно систематизировать проекты по регионам и странам. Было определено, что США лидируют по числу реализуемых коммерческих и пилотных проектов (152), другими ведущими странами являются Великобритания (34), Китай (21), Канада (20) и Австралия (15) [7]. Такое распределение объясняется тем, что именно в этих странах активно разрабатываются и реализуются меры государственной поддержки CC(U)S.

Также в базе данных можно ранжировать проекты по категории – коммерческие и пилотные (демонстрационные). В октябре 2022 г. в базе впервые появился новый подвид проектов – CCS Hubs. Объединение производственных мощностей в кластеры и хабы приводит к экономии затрат за счет эффекта масштаба [24]. Можно предположить, что курс развития мировых мощностей секвестрации и использования CO_2 в ближайшем будущем будет направлен именно на создание кластеров, а затем их объединение в хабы CC(U)S.

2. Классификация проектов CC(U)S.

Решения CC(U)S могут быть реализованы посредством различных комбинаций звеньев технологической цепи, при этом важной составляющей является то, где улавливается и на какие цели направляется уловленный CO_2 . Это определяет специфику реализации технологической цепи, необходимую инфраструктуру на всех стадиях, комплекс необходимых технологий и т.д. Стадии технологической цепи (улавливание, транспортировка, захоронение) также могут быть реализованы разными способами и с использованием отличных друг от друга технологий.

Очевидно, что проекты также будут различаться по целям реализации, объемам мощностей, стоимости адаптации технологий (прежде всего, улавливания) в каждом конкретном случае и другим факторам.

На **рис. 3** представлен разработанный авторами вариант классификации проектов секвестрации и использования CO_2 , который представляет собой набор классификационных признаков, разделенных на три группы – базовые, технологические и организационно-экономические,

а также разные виды проектов в рамках этих признаков. При разработке классификации авторы ориентировались на открытые источники данных, имеющиеся в научной литературе, работы по классификации проектов, материалы аналитических агентств по инициативам CC(U)S, накопленный мировой опыт реализации проектов, результаты анализа, проведенного в предыдущих исследованиях. В **табл. 1** представлена характеристика классификационных признаков.

Реализация разных комбинаций звеньев технологической цепи, улавливание техногенного CO_2 или из атмосферы позволяют выделить такие классификационные признаки, как тип проекта, источник выбросов, объемы мощностей. Последние могут быть определены по объемам улавливания газа на объекте и разделены на крупнейшие глобальные, крупные, средние и мелкие с ориентацией на подходы Глобального института CCS и Института энергетического перехода Керни. Так, определено, что проекты, мощность которых составляет более 5 Мт улавливаемого CO_2 в год, можно отнести к категории крупнейших глобальных, от 1 до 5 Мт – крупных, от 0,2 до 1 Мт – средних, менее 0,2 Мт – мелких проектов.

Группа технологических признаков отражает конкретные решения и технологии, применяемые на этапах улавливания, транспортировки и захоронения. Этап улавливания является самым дорогим и технологически сложным звеном. По оценкам экспертов, на него приходится до 75 % всех затрат [9], а сами технологии улавливания – самый сложный для исследования и реализации технологический процесс. Укрупненно можно выделить три группы технологий улавливания: 1) до сжигания топлива; 2) после сжигания и 3) кислородно-топливное сжигание. Уровень затрат на улавливание будет обратно пропорционален концентрации CO_2 в потоке отходящих газов – чем выше содержание CO_2 , тем ниже затраты [23]. Данный факт лежит в основе разделения отраслей-адаптеров CC(U)S на «дорогие» (с затратами на улавливание до 200–250 долл. США за 1 т углекислого газа) и «дешевые» (с затратами на улавливание порядка 15–50 долл. США за 1 т углекислого газа) [14].

Транспортировка и хранение углекислого газа (в отличие от улавливания) являются зрелыми производственными процессами, апробированными и широко используемыми на протяжении многих лет в нефтегазовой отрасли, что позволяет сделать вывод об отсутствии на этих этапах технологических проблем. Большая часть уловленного CO_2 при реализации инициатив CC(U)S транспортируется трубопроводами.

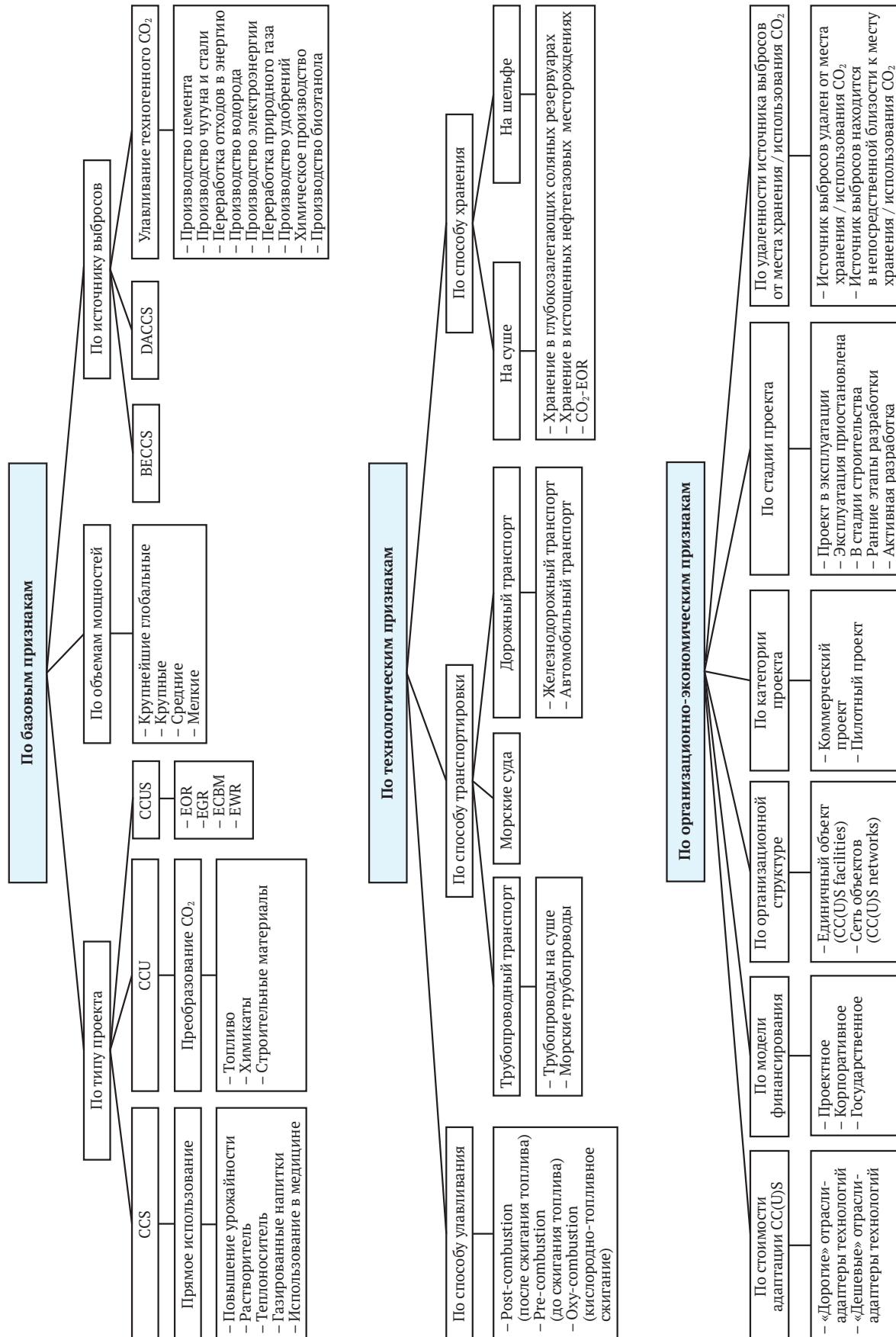


Рис. 3. Классификация проектов секвестрации и использования CO₂

Fig. 3. Classification of CO₂ sequestration and use projects

Таблица 1 / Table 1

Характеристика классификационных признаков проектов секвестрации и использования CO₂

Characteristics of classification features of CO₂ sequestration and use projects

Признак	Виды проектов	Примечание	Источник данных
<i>Базовые признаки</i>			
По типу проекта	CCS (улавливание и хранение CO ₂)	CO ₂ улавливается и транспортируется для хранения под землей	[9; 22; 25]
	CCU (улавливание и использование CO ₂): – прямое использование CO ₂ (повышение урожайности, растворитель, теплоноситель, газированные напитки, использование в медицине); – преобразование CO ₂ (топливо, химикаты, строительные материалы)	CO ₂ улавливается и используется в исходном виде или с преобразованием для производства новых продуктов	
	CCUS (улавливание, хранение и использование CO ₂): – EOR (enhanced oil recovery – повышение нефтеотдачи пластов); – EGR (enhanced gas recovery – повышение газоотдачи пластов); – ECBM (enhanced coalbed methane recovery – повышение отдачи метана угольных пластов); – EWR (enhanced water recovery – повышение водоотдачи пластов)	EOR является самым распространенным вариантом использования CO ₂ ; EGR, ECBM, EWR находятся в стадии изучения и тестирования	
По объемам мощностей	Крупнейшие глобальные проекты (улавливание более 5 Мт CO ₂ в год)	Разделение основано на подходах Глобального института CCS (3 границы по объемам мощностей – более 1 Мт; 0,2–1 Мт; менее 0,2 Мт) и Института энергетического перехода Керни (выделяется мощность более 5 Мт). Примеры крупнейших глобальных проектов: North Dakota Carbonsafe в США, Zero Carbon Humber в Великобритании	[7; 9]
	Крупные проекты (улавливание 1–5 Мт CO ₂ в год)		
	Средние проекты (улавливание 0,2–1 Мт CO ₂ в год)		
	Мелкие проекты (улавливание менее 0,2 Мт CO ₂ в год)		
По источнику выбросов	DACCS (Direct Air Capture with Carbon Capture and Storage – прямое улавливание CO ₂ из атмосферы)	Существует только один коммерческий проект DACCS в стадии эксплуатации (Орса в Исландии)	[7; 14]
	BECCS (Bioenergy with Carbon Capture and Storage – улавливание CO ₂ , произведенного в процессе получения энергии из биомассы)	Известно о нескольких коммерческих проектах BECCS на стадиях активной и ранней разработки в США и Швеции	[9; 26]
	Улавливание техногенного CO ₂ по секторам: – производство цемента; чугуна и стали; – переработка отходов в энергию; – производство водорода; электроэнергии; – переработка природного газа; – производство удобрений; – химическое производство; – производство биоэтанола	Под сектором подразумевается та отрасль промышленности, в которой задействованы проектные производственные мощности, начиная от источника выброса, заканчивая закачкой и хранением	[2; 7; 9; 14]
<i>Технологические признаки</i>			
По способу улавливания CO ₂	Post-combustion (улавливание CO ₂ после сжигания топлива)	Улавливание в конечной фазе высвобождения газов сгорания; наиболее зрелая и экономически эффективная технология; активно применяется на объектах теплоэнергетики	[2; 9; 14; 18; 19; 27–29]
	Pre-combustion (улавливание CO ₂ до сжигания топлива)	Основано на процессе газификации, через который проходит топливо, и предназначено для получения синтез-газа; требует более высоких капитальных затрат; применяется на энергетических и промышленных объектах	

Окончание табл. 1

Признак	Виды проектов	Примечание	Источник данных
	Оxy-fuel combustion (кислородно-топливное сжигание)	Сжигание топлива в обогащенной кислородом среде; обеспечивает поток дымовых газов с высокой концентрацией CO ₂ ; менее зрелая технология; применяется на новых проектах	
По способу транспортировки CO ₂	Трубопроводный транспорт: – наземные трубопроводы; – трубопроводы на шельфе	Самый распространенный способ транспортировки CO ₂	[7; 9]
	Морские суда	Транспортировка CO ₂ в сжиженном состоянии (по аналогии с СПГ)	
	Дорожный транспорт: – автомобильный транспорт; – железнодорожный транспорт	Наименее распространенный способ транспортировки CO ₂	
	Смешанный тип	Комбинация способов	
По способу хранения CO ₂	Хранение в глубокозалегающих соляных резервуарах	Способы хранения могут быть реализованы на суше и шельфе	[2; 7; 9; 14; 29]
	Хранение в истощенных нефтегазовых месторождениях		
	Закачка CO ₂ в разрабатываемые нефтяные пласты в целях увеличения нефтеотдачи (CO ₂ -EOR)		
Организационно-экономические признаки			
По стоимости адаптации CC(U)S	Проекты, реализуемые в «дешевых» отраслях-адаптерах технологий	«Дешевые» отрасли: переработка природного газа, производство удобрений и др.	[7; 9; 23]
	Проекты, реализуемые в «дорогих» отраслях-адаптерах технологий	«Дорогие» отрасли: производство электроэнергии, производство чугуна и стали, производство цемента и др.	
По модели финансирования	Проектное	Затраты на реализацию CC(U)S высоки, поэтому инициативы обычно реализуются на базе/при участии крупных компаний; практически всегда сопровождаются мерами государственной поддержки	[7]
	Корпоративное		
	Государственное		
	Смешанное		
По организационной структуре	CC(U)S facility (единичный объект)	Самая распространенная структура	[7]
	CC(U)S network (сеть объектов)	Улавливание CO ₂ из нескольких источников, совместное использование инфраструктуры (как следствие – экономия затрат за счет эффекта масштаба)	
По категории проекта	Пилотный	Предназначены для тестовых и демонстрационных целей	[7]
	Коммерческий	Предназначены для коммерческой деятельности	
По стадии проекта	Проект в эксплуатации	Определяется как для коммерческих, так и для пилотных проектов	[7; 9; 14]
	Эксплуатация приостановлена		
	Проект в строительстве		
	Ранние этапы разработки		
	Активная разработка		
По удаленности источника выброса от места хранения / использования CO ₂	Источник выброса удален от места хранения / использования CO ₂	Характерно для CC(U)S networks (несколько источников выбросов, мест хранения)	[7]
	Источник выброса находится в непосредственной близости к месту хранения / использования CO ₂	Характерно для единичных объектов	

Решения по закачке, хранению и мониторингу углекислого газа в хранилищах достаточно давно и хорошо известны. При сравнении известных способов захоронения на основе мирового опыта и теоретического исследования [29] можно сделать следующие базовые выводы:

- захоронение газа на суше (onshore) дешевле, чем в море (offshore);
- захоронение газа в уже изученных пластах дешевле, чем в малоизученных;
- захоронение газа в истощенных нефтяных и газовых месторождениях дешевле, чем в соленосных формациях;
- захоронение в резервуарах, где уже есть существующая инфраструктура, дешевле, чем при полном ее отсутствии;
- захоронение в крупных хранилищах с более высокой скоростью закачки газа дешевле, чем в мелких.

Группа организационно-экономических признаков характеризует структуру, этапность и стоимость проектов секвестрации и использования CO_2 . Она объединяет такие характеристики, как стоимость адаптации технологий, модель финансирования, организационная структура, категория и стадия проекта, а также удаленность источника выбросов от места хранения / использования CO_2 . Несмотря на то, что основная часть затрат приходится на этап улавливания, последний признак также влияет на стоимость реализации проектов. Стоит отметить, что стоимость проектов является одним из главных факторов для принятия решений об их реализации. Будучи капиталоемкими, проекты CC(U)S обычно реализуются на базе / при участии крупных корпораций, однако также нуждаются в мерах государственной поддержки, что зачастую обуславливает применение смешанной модели финансирования [7].

Следует отметить, что авторами была принята попытка учесть максимальное количество классификационных признаков, определить их в группы, внести пояснения по видам проектов. Вместе с тем авторы допускают неполноту и дискуссионный характер классификации по ряду критериев (например, по модели финансирования, удаленности источника выбросов от мест хранения / использования газа и др.) в силу ограниченного доступа к информации по исследуемому вопросу и незначительному накопленному опыту по реализации таких инициатив.

3. Профиль проектов секвестрации и использования CO_2 : апробация классификации.

Для апробации полученных результатов авторами был проведен анализ трех действующих

проектов CC(U)S; по анализируемым проектам представлен классификационный профиль проектов, включающий набор предложенных признаков классификации (табл. 2). Анализируемыми проектами выступили проект Acorn (Великобритания), относящийся к крупнейшим глобальным проектам и реализуемый в отрасли по производству водорода и химической отрасли [30], крупнейший глобальный проект North Dakota Carbonsafe (США), функционирующий в отрасли производства чугуна и стали [31], а также китайский проект Sinopec Zhongyuan, реализуемый в химической отрасли [32].

Стоит отметить, что в некоторых случаях отнесение проектов к определенным видам осложняется ввиду работы с открытыми источниками данных и ограниченности доступа к информации.

Выявлено, что два из трех анализируемых проекта относятся к типу CCS и группе крупнейших глобальных проектов. Во всех рассматриваемых проектах углекислый газ улавливается из техногенных источников, а на мощностях Acorn также используются технологии DACCS. На этапе улавливания применяются различные способы, на этапе транспортировки в двух из трех проектах используется трубопроводный транспорт. В рамках проекта North Dakota Carbonsafe реализуются различные способы хранения CO_2 и только в технологической цепочке проекта Sinopec Zhongyuan применяются технологии CO_2 -EOR. В двух из трех проектов используется смешанная модель финансирования, а по организационной форме – CC(U)S networks. Рассматриваемые проекты находятся на различных стадиях реализации и относятся к разным категориям. В силу ограниченности информации анализируемые проекты не удалось отнести к определенным видам по признаку удаленности мощностей.

Заключение

Комплекс технологий секвестрации и использования углекислого газа (CC(U)S) можно назвать одним из доступных и необходимых для снижения углеродного «следа», прежде всего в промышленном и энергетическом секторах, и достижения целей декарбонизации к 2050 г. Существенным преимуществом технологий по сравнению с другими опциями декарбонизации является то, что они позволяют снижать выбросы углекислого газа без существенного изменения существующих энергетических и промышленных процессов. Данная мера может рассматриваться как комплементарная при движении к углеродной нейтральности.

Таблица 2 / Table 2

Классификационный профиль проектов секвестрации и использования CO₂Classification profile of CO₂ sequestration and use projects

Признак	Виды проектов	Проект 1 Acorn (Велико- британия)	Проект 2 North Dakota Carbonsafe (США)	Проект 3 Sinopec Zhongyuan (Китай)
По типу проекта	CCS	✓	✓	
	CCU			
	CCUS			✓
По объемам мощностей	Крупнейшие глобальные проекты	✓	✓	
	Крупные проекты			
	Средние проекты			
	Мелкие проекты			✓
По источнику выбросов	DACCS	✓		
	BECCS			
	Улавливание техногенного CO ₂	✓	✓	✓
По способу улавливания CO ₂	Улавливание CO ₂ после сжигания топлива		Нет свед.	✓
	Улавливание CO ₂ до сжигания топлива			
	Кислородно-топливное сжигание	✓		
По способу транспортировки CO ₂	Трубопроводный транспорт	✓	✓	
	Морские суда			✓
	Дорожный транспорт			
	Смешанный тип			
По способу хранения CO ₂	Хранение в глубокозалегающих соляных резервуарах	✓	✓	
	Хранение в истощенных нефтегазовых месторождениях		✓	
	Закачка CO ₂ в разрабатываемые нефтяные пласты с целью увеличения нефтеотдачи (CO ₂ -EOR)			✓
По стоимости адаптации CC(U)S	Проекты, реализуемые в «дешевых» отраслях-адаптерах технологий	✓		✓
	Проекты, реализуемые в «дорогих» отраслях-адаптерах технологий	✓	✓	
По модели финансирования	Проектное			Нет свед.
	Корпоративное			
	Государственное			
	Смешанное	✓	✓	
По организационной структуре	CC(U)S facility			✓
	CC(U)S network	✓	✓	
По категории проекта	Пилотный		Нет свед.	✓
	Коммерческий	✓		
По стадии проекта	Проект в эксплуатации		Нет свед.	
	Эксплуатация приостановлена			✓
	Проект в строительстве			
	Ранние этапы разработки	✓		
	Активная разработка			
По удаленности источника выброса от места хранения / использования CO ₂	Источник выброса удален от места хранения / использования CO ₂	Нет свед.	Нет свед.	Нет свед.
	Источник выброса находится в непосредственной близости к месту хранения / использования CO ₂			

Анализ мирового опыта применения технологий указывает на их активное развитие: ежегодно увеличивается количество коммерческих проектов, растут суммарные производственные мощности. Однако для того, чтобы данные технологии заняли свои уверенные позиции при движении к углеродной нейтральности, необходимо их существенное масштабирование (с существующих сегодня мощностей 149 Мт до 5,6 Гт улавливаемого CO₂ в год). В этой связи важным является поддержка таких инициатив на разных уровнях, развитие технологий улавливания, создание типовых установок улавливания, реализация проектов в рамках кластеров и хабов, что, в конечном счете, будет влиять на улучшение их экономических показателей. На сегодняшний день именно экономические причины являются основными препятствиями на пути активного масштабирования технологий.

С учетом того, что CC(U)S представляет собой комплекс технологий, которые могут реализовываться в различных вариантах (разные мощности, отрасли, цели, организационно-экономические и технологические параметры), в научной и аналитической литературе встречаются подходы к классификации этих инициатив. Предложен-

ная в данной работе классификация отличается комплексностью. Авторы предприняли попытку учесть максимальное количество признаков и определить их в три группы: базовые, технологические и организационно-экономические. Разработанная классификация представляет собой методическую основу, которая позволяет систематизировать проекты CC(U)S, определить особенности и характеристики отдельных проектов, сравнить их по конкретным признакам. С помощью разработанной классификации становится возможным в полном объеме структурировать реальную информацию и статистику по существующим проектам CC(U)S для принятия управленческих решений по ним на различных уровнях.

Разработанная классификация, по мнению авторов, в дальнейшем может служить основой для планирования деятельности в области секвестрации и использования CO₂ и принятия решений о финансировании конкретных инициатив CC(U)S. Дальнейшие исследования авторов будут направлены на доработку классификационных профилей проектов и совершенствование подходов к принятию решений по их финансированию в условиях России с использованием разработанной классификации.

Список литературы

1. Доброхотова М.В., Матушанский А.В. Применение концепции наилучших доступных технологий в целях технологической трансформации промышленности в условиях энергетического перехода. *Экономика устойчивого развития*. 2022;(2(50)):63–68.
2. *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. Metz B., Davidson O., de Coninck H., Loos M., Meyer L., eds. 2005. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf (дата обращения: 05.09.2022).
3. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата. 1992. URL: <https://goo.su/hdO5kz> (дата обращения: 19.06.2022).
4. Киотский протокол к рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата. 1998. URL: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf> (дата обращения: 19.06.2022).
5. Парижское соглашение. Организация Объединенных Наций. 2015. URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf (дата обращения: 19.06.2022).
6. *IEA. Net zero by 2050. A roadmap for the global energy sector*. Paris. May, 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (дата обращения: 11.09.2022).
7. *Global CCS Institute. Global status of CCS 2021*. URL: [https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf)
8. *Report_Global_CCS_Institute.pdf* (дата обращения: 24.06.2022).
8. *IEA. About CCUS. Technology report*. Paris. April, 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/about-ccus> (дата обращения: 06.07.2022).
9. *Carbon capture utilization and storage. Towards net-zero*. The Kearney Energy Transition Institute. 2021 URL: <https://www. Kearney.com/documents/17779499/17781864/CCUS-2021+FactBook.pdf> (дата обращения: 15.07.2022).
10. *Facilities Database*. Global CCS Institute. URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 29.06.2022).
11. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-П). URL: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf> (дата обращения: 10.10.2022).
12. Сидорова К.И. Разработка технико-экономической модели улавливания CO₂ для энергетического сектора. *Экология и промышленность России*. 2014;(12):20–25. URL: https://www.ecology-kalvis.ru/jour/article/view/557?locale=ru_RU (дата обращения: 10.10.2022).
13. ПАО НК «Роснефть». Пресс-релизы. URL: <https://www.rosneft.ru/press/releases/item/204425/> (дата обращения: 18.10.2022).

14. IEA. *Levelised cost of CO₂ capture by sector and initial CO₂ concentration*, 2019. In: *CCUS in clean energy transitions*. 26 October 2022. Paris. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/levelised-cost-of-co2-capture-by-sector-and-initial-co2-concentration-2019> (дата обращения: 27.11.2022).

15. Vygon Consulting. *CCUS: монетизация выбросов CO₂*. URL: https://vygon.consulting/upload/iblock/967/jzgys72b7ome167wi4dbao9fnsqsfj13/vygon_consulting_CCUS.pdf (дата обращения: 17.09.2022).

16. Hafez A., Fateen S.-E.K. CO₂ transport and storage technologies. In: *Carbon dioxide capture: processes, technology and environmental implications*. Nova Publ.; 2016. P. 257–276. URL: https://www.researchgate.net/publication/304251602_CO2_Transport_and_Storage_Technologies (дата обращения: 14.05.2022).

17. Gür T. M. Carbon dioxide emissions, capture, storage and utilization: Review of materials, processes and technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2022;89(117074):100965. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2021.100965>

18. Mohammad M., Isaifan R., Weldu Y.W., Rahman M.A., Al-Ghamdier S.G. Progress on carbon dioxide capture, storage and utilization. *International Journal of Global Warming*. 2020;20(2):124–144. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2020.105386>

19. Vaz S., Rodrigues de Souza A.P., Lobo Baeta B.E. Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022;8:100456–100459. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456>

20. Ilinova A., Romasheva N., Cherepovitsyn A. CC(U)S initiatives: public effects and “Combined Value” Performance. *Resources*. 2021;10(6):61–81. <https://doi.org/10.3390/resources10060061>

21. Karayannis V., Charalampides G., Lakioti E. Socio-economic aspects of CCS technologies. *Procedia Economics and Finance*. 2014;14:295–302. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00716-3](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00716-3)

22. 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;11(20):5834–5853. <https://doi.org/10.3390/su11205834>

23. Kearns D., Liu H., Consoli C. *Technology readiness and costs of CCS*. March 2021. URL:

<https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/04/CCS-Tech-and-Costs.pdf> (дата обращения: 20.09.2022).

24. Global CCS Institute. *Special report. Understanding industrial CCS hubs and clusters*. 2016. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-and-clusters.pdf> (дата обращения: 08.10.2022).

25. Shi Y., Jia Y., Pan W., Huang L., Yan J., Zheng R. Potential evaluation on CO₂-EGR in tight and low-permeability reservoirs. *Natural Gas Industry B*. 2017;4(4):311–318. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2017.08.013>

26. Global CCS Institute. *Bioenergy and carbon capture and storage. 2019 Perspective*. URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/03/BECCS-Perspective_FINAL_18-March.pdf (дата обращения: 24.06.2022).

27. Koysoumpa E.I., Bergins C., Kakaras E. The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse technologies. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018;132:3–16. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.07.029>

28. Zhi-wu Liang Zh., Rongwong W., Liu H., Fu K., Gao H., Cao F., Zhang R., Sema T., Henni A., Sumon K.Z., Nath D., don Gelowitz, Srisang W., Saiwan Ch., Benamor A., Al-Marri M.J., Shi H., Supap T., Chan Ch., Zhou Q., Abu Zahra M., Wilson M., Olson W., Idem R., Tontiwachwuthikul P. Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvents. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2015;40:26–54. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.06.017>

29. ZEP: *The costs of CO₂ capture, transport and storage. Post-demonstration CCS in the EU*. URL: <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Overall-CO2-Costs-Report.pdf> (дата обращения: 11.10.2022).

30. *The Acorn project*. URL: <https://theacornproject.uk/about/> (дата обращения: 07.07.2022).

31. Peck W.D., Ayash S.C., Klapperich R., Gorecki Ch.D. The North Dakota integrated carbon storage complex feasibility study. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2019;84:47–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.03.001>

32. Zhang T., Lin Q., Xue Zh., Munson R., Magnesschi G. Sinopec Zhongyuan oil field company refinery CCS-EOR project. *Energy Procedia*. 2017;114:5869–5873. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1724>

References

1. Dobrokhotova M.V., Matushanskii A.V. Applying the best available techniques concept for the technological transformation of industry under the energy transition conditions. *Economics of Sustainable Development*. 2022;(2(50)):63–68. (In Russ.)

2. Metz B., Davidson O., de Coninck H., Loos M., Meyer L., eds. *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. 2005. URL: <https://www.ipcc.ch/>

[site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf](https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf) (accessed on 05.09.2022).

3. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. 1992. (In Russ.). URL: <https://goo.su/hdO5kz> (accessed on 19.06.2022).

4. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. 1998. (In Russ.). URL: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprus.pdf> (accessed on 19.06.2022).

5. *The Paris Agreement. The United Nations*. 2015. (In Russ.). URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_russian_.pdf (accessed on 19.06.2022).
6. IEA. *Net zero by 2050. A roadmap for the global energy sector*. Paris. May, 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050> (accessed on 11.09.2022).
7. *Global CCS Institute. Global status of CCS 2021*. URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/10/2021-Global-Status-of-CCS-Report_Global_CCS_Institute.pdf (accessed on 24.06.2022).
8. IEA. *About CCUS. Technology report*. Paris. April, 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/about-ccus> (accessed on 06.07.2022).
9. *Carbon capture utilization and storage. Towards net-zero*. The Kearney Energy Transition Institute. 2021 URL: <https://www.kearney.com/documents/17779499/17781864/CCUS-2021+FactBook.pdf> (accessed on 15.07.2022).
10. *Facilities Database. Global CCS Institute*. URL: <https://co2re.co/FacilityData> (accessed on 29.06.2022).
11. *Strategy for the socio-economic development of the Russian Federation with a low level of greenhouse gas emissions until 2050* (approved by the order of the Government of the Russian Federation of October 29, 2021 No. 3052-R). (In Russ.). URL: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf> (accessed on 10.10.2022).
12. Sidorova K.I. The development of technical and economic model of CO₂ capture for power-generating sector. *Ecology and Industry of Russia*. 2014;(12):20–25. (In Russ.). URL: https://www.ecology-kalvis.ru/jour/article/view/557?locale=ru_RU (accessed on 10.10.2022).
13. *Rosneft. Press Releases*. (In Russ.). URL: <https://www.rosneft.ru/press/releases/item/204425/> (accessed on 18.10.2022).
14. IEA. *Levelised cost of CO₂ capture by sector and initial CO₂ concentration, 2019. CCUS in clean energy transitions. Is carbon capture too expensive?* October 26, 2022. Paris. (In Russ.). URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/levelised-cost-of-co2-capture-by-sector-and-initial-co2-concentration-2019> (accessed on 27.11.2022).
15. *Vygon Consulting CCUS: Monetization of CO₂ emissions*. (In Russ.). URL: https://vygon.consulting/upload/iblock/967/jzgys72b7ome167wi4dbao9fnsgsfj13/vygon_consulting_CCUS.pdf (accessed on 17.09.2022).
16. Hafez A., Fateen S.-E.K. CO₂ transport and storage technologies. In: *Carbon dioxide capture: processes, technology and environmental implications*. Nova Publ.; 2016. P. 257–276. URL: https://www.researchgate.net/publication/304251602_CO2_Transport_and_Storage_Technologies (accessed on 14.05.2022).
17. Gür T.M. Carbon dioxide emissions, capture, storage and utilization: Review of materials, processes and technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2022;89(117074):100965. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2021.100965>
18. Mohammad M., Isaifan R., Weldu Y.W., Rahman M.A., Al-Ghamdiet S.G. Progress on carbon dioxide capture, storage and utilization. *International Journal of Global Warming*. 2020;20(2):124–144. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2020.105386>
19. Vaz S., Rodrigues de Souza A.P., Lobo Baeta B.E. Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors. *Cleaner Engineering and Technology*. 2022;8:100456–100459. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100456>
20. Ilinova A., Romasheva N., Cherepovitsyn A. CC(U)S initiatives: public effects and “Combined Value” Performance. *Resources*. 2021;10(6):61–81. <https://doi.org/10.3390/resources10060061>
21. Karayannis V., Charalampides G., Lakioti E. Socio-economic aspects of CCS technologies. *Procedia Economics and Finance*. 2014;14:295–302. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00716-3](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00716-3)
22. Tcvetkov P., Cherepovitsyn A., Fedoseev S. The changing role of CO₂ in the transition to a circular economy: Review of carbon sequestration projects. *Sustainability*. 2019;11(20):5834–5853. <https://doi.org/10.3390/su11205834>
23. Kearns D., Liu H., Consoli C. *Technology readiness and costs of CCS*. March 2021. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/04/CCS-Tech-and-Costs.pdf> (accessed on 20.09.2022).
24. *Global CCS Institute: Special report. Understanding industrial CCS hubs and clusters*. 2016. URL: <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-and-clusters.pdf> (accessed on 08.10.2022).
25. Shi Y., Jia Y., Pan W., Huang L., Yan J., Zheng R. Potential evaluation on CO₂-EGR in tight and low-permeability reservoirs. *Natural Gas Industry B*. 2017;4(4):311–318. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2017.08.013>
26. *Global CCS Institute. Bioenergy and carbon capture and storage. 2019 Perspective*. URL: https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/03/BECCS-Perspective_FINAL_18-March.pdf (accessed on 24.06.2022).
27. Koysoumpa E.I., Bergins C., Kakaras E. The CO₂ economy: Review of CO₂ capture and reuse technologies. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2018;132:3–16. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2017.07.029>
28. Zhi-wu Liang Zh., Rongwong W., Liu H., Fu K., Gao H., Cao F., Zhang R., Sema T., Henni A., Sumon K.Z., Nath D., don Gelowitz, Srisang W., Saiwan Ch., Benamor A., Al-Marri M.J., Shi H., Supap T., Chan Ch., Zhou Q., Abu Zahra M., Wilson M., Olson W., Idem R., Tontiwachwuthikul P. Recent progress and new developments in post-combustion carbon-capture technology with amine based solvents. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2015;40:26–54. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2015.06.017>

29. ZEP: *The costs of CO₂ capture, transport and storage. Post-demonstration CCS in the EU*. URL: <https://zeroemissionsplatform.eu/wp-content/uploads/Overall-CO2-Costs-Report.pdf> (accessed on 11.10.2022).

30. *The Acorn project*. URL: <https://theacornproject.uk/about/> (accessed on 07.07.2022).

31. Peck W.D., Ayash S.C., Klapperich R., Gorecki Ch.D. The North Dakota integrated carbon

storage complex feasibility study. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2019;84:47–53. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.03.001>

32. Zhang T., Lin Q., Xue Zh., Munson R., Magneschi G. Sinopec Zhongyuan oil field company refinery CCS-EOR project. *Energy Procedia*. 2017;114:5869–5873. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1724>

Информация об авторах

Череповицына Алина Александровна – канд. экон. наук, доцент, заведующий Лабораторией управления устойчивым развитием промышленных и природных систем, старший научный сотрудник, Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина Кольского научного центра РАН, 184209, Мурманская обл., Апатиты, ул. Ферсмана, д. 24а, Российская Федерация; главный научный сотрудник отдела промышленной экологии, Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики», 141006, Московская обл., Мытищи, Олимпийский просп., д. 42, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5168-0518>; e-mail: iljinovaAA@mail.ru

Дорожкина Ирина Петровна – стажер-исследователь, Лаборатория управления устойчивым развитием промышленных и природных систем, Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина Кольского научного центра РАН, 184209, Мурманская обл., Апатиты, ул. Ферсмана, д. 24а, Российская Федерация; e-mail: irinadorozhkina.99@gmail.com

Костылева Вера Михайловна – начальник отдела химической и нефтехимической промышленности, Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики», 141006, Московская обл., Мытищи, Олимпийский просп., д. 42, Российская Федерация; e-mail: v.kostyleva@eipc.center

Information about the authors

Alina A. Cherepovitsyna – PhD (Econ.), Associate Professor, Head of the Laboratory for Management of the Sustainable Development of Industrial and Natural Systems, Senior researcher, Luzin Institute for Economic Studies – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences», 24a Fersmana Str, Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; Chief Researcher of the Industrial Ecology Department, Research Institute “Center for Environmental Industrial Policy”, 42, Olympiyskiy Ave., Mytishchi, Moscow region, 141006, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5168-0518>; e-mail: iljinovaAA@mail.ru

Irina P. Dorozhkina – Trainee Researcher, Laboratory for Management of the Sustainable Development of Industrial and Natural Systems, senior researcher, Luzin Institute for Economic Studies – Subdivision of the Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences», 24a Fersmana Str, Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; e-mail: irinadorozhkina.99@gmail.com

Vera N. Kostyleva – Head of the Department of Chemical and Oil and Chemical Industry, Industrial Ecology Department, Research Institute “Center for Environmental Industrial Policy”, 42, Olympiyskiy Ave., Mytishchi, Moscow region, 141006, Russian Federation; e-mail: v.kostyleva@eipc.center

Поступила в редакцию 28.10.2022; поступила после доработки 12.12.2022; принята к публикации 16.12.2022
Received 28.10.2022; Revised 12.12.2022; Accepted 16.12.2022