

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

Научная статья

УДК 338.26/.28; 339.97

doi:10.37614/2220-802X.2.2023.80.001

### ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА В КОНТЕКСТЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ: КЛЮЧЕВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ВОЗМОЖНЫЕ СЦЕНАРИИ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

Диана Михайловна Дмитриева<sup>1</sup>, Дмитрий Олегович Скобелев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт экономических проблем имени Г. П. Лузина Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия, diana-dmitrieva@mail.ru, ORCID 0000-0002-4208-4842

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики», Мытищи, Россия, ORCID 0000-0002-8067-7016

**Аннотация.** В настоящее время общественное и экономическое развитие страны и всего мира сталкивается с большим количеством внешних вызовов. Один из ключевых вопросов — достижение устойчивого развития в условиях роста потребления природных ресурсов. Достижение баланса между энергообеспечением и увеличивающимся давлением климатической повестки находится в фокусе внимания не только топливно-энергетического комплекса, но и мировой общественности в целом. Нефтегазовый комплекс является центральным звеном энергообеспечения и будет занимать это место в ближайшее время. В этой связи представляется актуальной задачей определить его роль в обеспечении устойчивого развития и разработать механизмы трансформации и адаптации к современным вызовам. Особенно острым данный вопрос является как для функционирующих компаний, так и для находящихся в стадии разработки стратегически важных арктических проектов нефтегазовой отрасли. Цель статьи заключается в исследовании существующих методов и возможных сценариев декарбонизации для определения возможностей их применения в рамках отрасли в контексте обеспечения устойчивого развития Арктического региона Российской Федерации. Проанализированы научно-технологические направления декарбонизации в свете принятия Парижского соглашения от 2015 г. о снижении количества выбросов парниковых газов. Исследованы причины образования выбросов парниковых газов на каждом этапе операционной деятельности нефтегазовых компаний и предложен механизм выбора опций декарбонизации. Также проведен критический анализ мирового опыта и возможных общих сценариев снижения выбросов парниковых газов нефтегазовыми компаниями в рамках обеспечения устойчивого развития, выявлены основные тенденции и проблемы в данной области. Представлены возможные сценарии декарбонизации Арктического региона РФ, основными из которых являются CCS-сценарии (улавливание и хранение углерода), ВИЭ-сценарии (использование возобновляемых источников энергии) и технологические сценарии (модернизация существующих технологий). Результаты исследования могут быть использованы при разработке стратегий достижения углеродной нейтральности на различных уровнях.

*Ключевые слова:* устойчивое развитие, декарбонизация, Арктический регион, нефтегазовая отрасль

**Благодарности:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-78-10181 «Декарбонизация нефтегазового комплекса России: концепция, новые интерфейсы, вызовы, технологические и организационно-управленческие трансформации», <https://rscf.ru/project/22-78-10181/>.

**Для цитирования:** Дмитриева Д. М., Скобелев Д. О. Декарбонизация нефтегазового комплекса в контексте устойчивого развития: ключевые направления и возможные сценарии для Арктического региона // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2023. № 2. С. 7–23. doi:10.37614/2220-802X.2.2023.80.001.

## PROBLEMS OF SUSTAINABLE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT IN THE RUSSIAN NORTH AND THE ARCTIC

Original article

### DECARBONIZATION OF THE OIL AND GAS SECTOR IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT: KEY DIRECTIONS AND POSSIBLE SCENARIOS FOR THE ARCTIC REGION

Diana M. Dmitrieva<sup>1</sup>, Dmitry O. Skobelev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Luzin Institute for Economic Studies of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, Diana-dmitrieva@mail.ru, ORCID 0000-0002-4208-4842

<sup>2</sup>Environmental Industrial Policy Centre, Mytishchi, Russia, ORCID 0000-0002-8067-7016

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

**Abstract.** Nowadays, the social and economic development of both individual countries and the world as a whole is facing a large number of external challenges. One of the key issues today is the achievement of sustainable development while managing the growth in resource consumption. Balancing energy supply with the pressing climate agenda has garnered global attention, particularly within the fuel and energy sector, which is the central pillar of energy supply and will remain so in the near future. In this regard, it is vital to determine its role in ensuring sustainable development and design mechanisms for transformation and adaptation to modern challenges. This issue is particularly acute for both functioning businesses and strategic oil and gas projects to be implemented in the Arctic. The purpose of this article is to study existing methods and potential decarbonization scenarios to determine their applicability within the industry in the context of ensuring the sustainable development of Russia's Arctic. The article analyzes various scientific and technological approaches to decarbonization in light of the adoption of the Paris Agreement in 2015, which aims to reduce greenhouse gas emissions. The study investigates the causes of greenhouse gas emissions at each stage of oil and gas operations and proposes a mechanism for choosing decarbonization options. It critically examines global experiences and potential scenarios for reducing greenhouse gas emissions by oil and gas companies in the framework of sustainable development, identifying key trends and problems in this area. The study also presents possible decarbonization scenarios for the Arctic region, including carbon capture and storage (CCS) scenarios, renewable energy scenarios (utilizing renewable energy sources), and technological scenarios (upgrading existing technologies). The findings of this study can inform the development of strategies aimed at achieving carbon neutrality at various levels.

**Keywords:** sustainable development, decarbonization, Arctic region, oil and gas industry

**Acknowledgments:** this study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project No. 22-78-10181 titled "Decarbonization of the Russian Oil and Gas Sector: Concept, New Interfaces, Challenges, Technological, Organizational, and Managerial Transformations", <https://rscf.ru/project/22-78-10181/>).

**For citation:** Dmitrieva D. M., Skobelev D. O. Decarbonization of the oil and gas sector in the context of sustainable development: Key directions and possible scenarios for the Arctic region. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poriyadka* [The North and the Market: Forming the Economic Order], 2023, no. 2, pp. 7–23. doi:10.37614/2220-802X.2.2023.80.001.

## Введение

На сегодняшний день климатическая повестка — одна из самых обсуждаемых тем не только в научных, но и в общественных, политических дискуссиях. Зеленая энергетика — тренд стратегического развития компаний в рамках концепции устойчивого развития, подразумевающей использование безуглеродной энергетики, где отсутствовали бы выбросы парниковых газов, особенно CO<sub>2</sub>, которые служат антропогенной причиной глобального потепления [1, с. 1]. Сегодня зеленая энергетика рассматривается в контексте глобального энергетического перехода на альтернативные источники энергии (солнечная, ветровая, атомная, водородная энергетика) и отказа от использования традиционных источников (нефти, природного газа и угля). При этом резкий отказ от традиционных источников энергии невозможен [2, с. 11–34], поэтому особенно актуальным становится обеспечение сбалансированного энергоперехода [3].

Одним из ключевых направлений по обеспечению сбалансированного энергоперехода является декарбонизация — создание системы технико-экономических отношений, целью которых является обеспечение снижения углеродного следа без снижения темпов социального и экономического развития [4, с. 59]. Некоторые авторы определяют декарбонизацию как «основной тренд развития энергетики в XXI в.» [5].

Поскольку нефтегазовый комплекс ответственен более чем за 50 % ежегодных выбросов парниковых газов [6] от общих энергетических выбросов, снижение его влияния на процессы глобального потепления становится первостепенной задачей

мирового сообщества. С 2011 г. количество выбросов парниковых газов как в нефтегазовой отрасли, так и в мире в целом снизить практически не удалось, что свидетельствует о необходимости интенсификации сокращения выбросов (рис. 1).

В этой связи декарбонизация отрасли имеет ключевое значение в контексте реализации концепции устойчивого развития в рамках Парижского соглашения [9–11]. Усиление давления климатической повестки на нефтегазовые компании [12] обуславливает необходимость разработки стратегий адаптации к новым вызовам. Следовательно, декарбонизация производственных процессов и ведение нефтегазовыми компаниями зеленой экономики путем диверсификации своего портфеля за счет проектов альтернативной энергетики, а также участия в программах по улучшению состояния окружающей среды, не связанных с энергетикой, играют ключевую роль в дальнейшей трансформации бизнес-процессов в нефтегазовой отрасли в рамках устойчивого развития.

Арктические регионы больше всего чувствительны к глобальным процессам изменения климата из-за наличия зон вечной мерзлоты, ледяного покрова и специфических экосистем [13]. Разработка арктических месторождений применяемыми сегодня технологиями неизбежно ведет к интенсивному таянию ледников, повышению уровня Мирового океана, температуры планеты и другим глобальным необратимым последствиям. Основные показатели по Арктическому региону в контексте его роли в энергетическом переходе, а также динамика отклонения приземной температуры и изменения ледового покрова представлены на рис. 2.

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

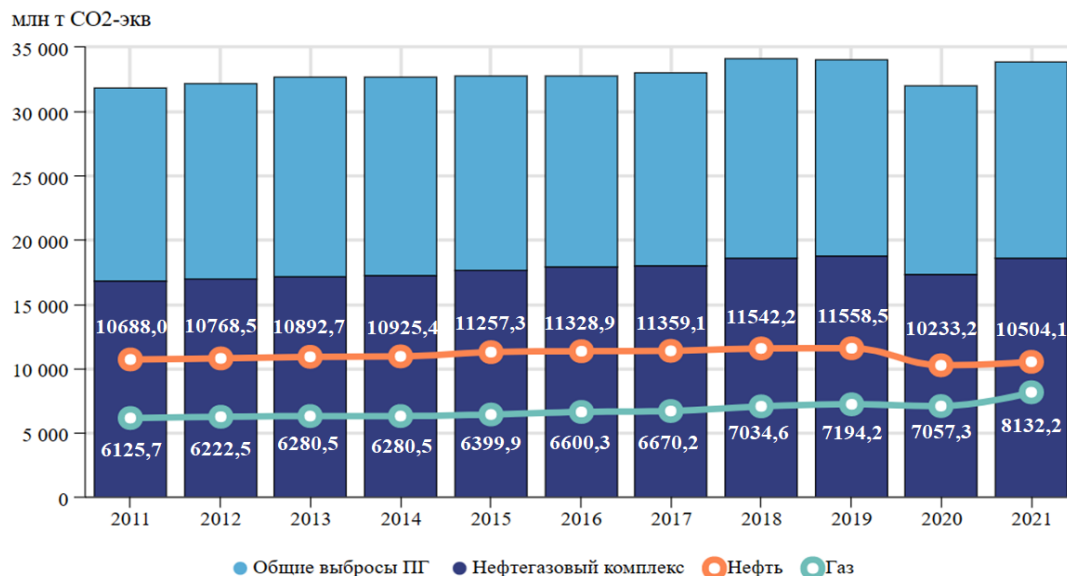


Рис. 1. Статистические данные по выбросам парниковых газов. Источник: построено авторами на основе [6–8]

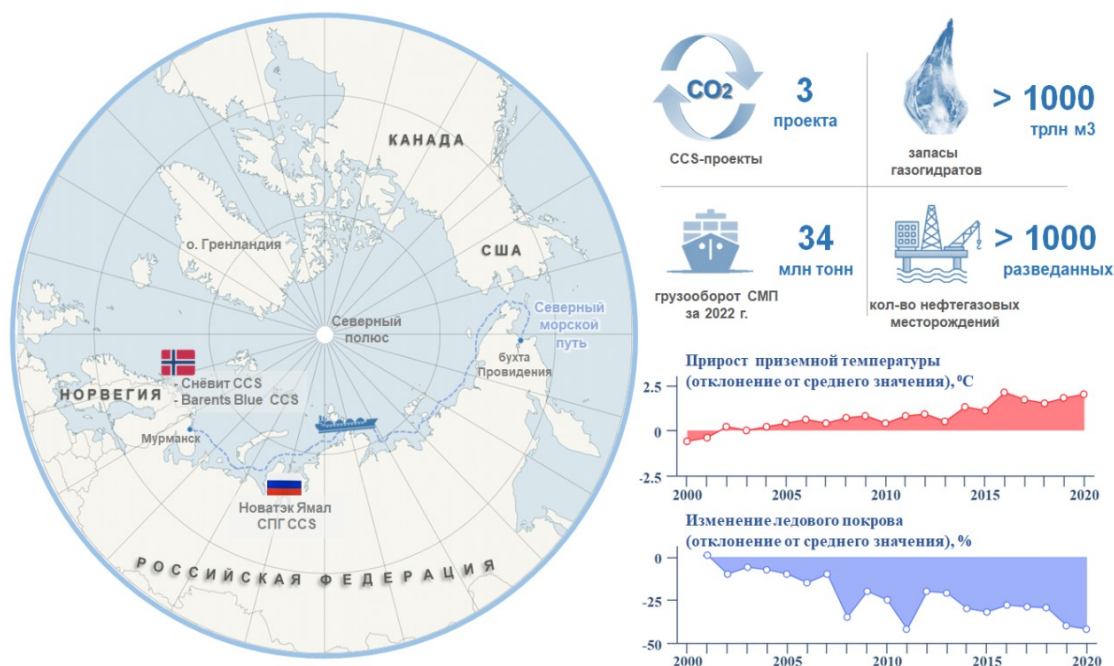


Рис. 2. Арктический регион в контексте климатических изменений. Источник: построено авторами на основе [14; 15]

При этом устойчивое развитие данного региона и эффективное освоение ресурсов является в текущих геополитических условиях стратегически важной задачей. Арктический регион выполняет роль драйвера развития ресурсной базы для удовлетворения не только региональных, но и глобальных энергетических нужд. Интенсификация процесса импортозамещения необратимо связана с увеличением эксплуатации ресурсной базы, а следовательно, с увеличением экологической нагрузки и выбросов парниковых

газов, обусловленных как процессами освоения месторождений, так и таянием льдов [16–18]. При этом сама добыча природных ресурсов также требует значительных энергозатрат [19].

Поэтому решение задач по совершенствованию инфраструктуры объектов и модернизации производственных процессов имеет важнейшее значение для обеспечения достижения целей устойчивого развития. В результате исследования проанализирован значительный объем научной

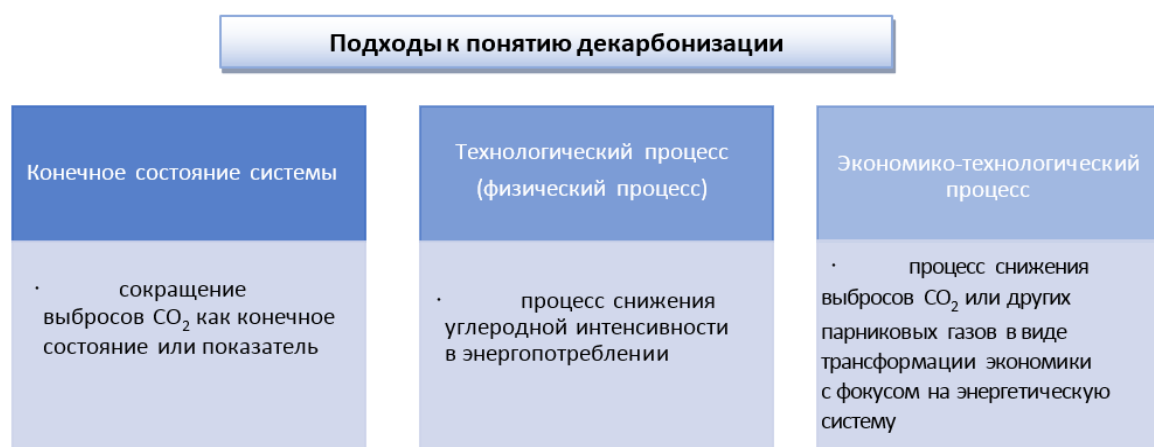
## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

литературы, посвященной вопросам декарбонизации в целом и нефтегазовой отрасли в частности. Несмотря на достаточное внимание к вопросам декарбонизации именно нефтегазовой отрасли, на настоящий момент не существует единого реестра направлений, методов и способов декарбонизации. В этой связи особенно актуальным представляется исследование существующих методов декарбонизации и возможных сценариев с целью определения возможностей их применения в рамках отрасли в контексте обеспечения устойчивого развития.

**Теоретические основы**

На настоящий момент достаточно большое внимание уделяется исследованиям в области декарбонизации, при этом наблюдаются различия в трактовке данного термина. Например, некоторые

авторы определяют декарбонизацию как «нулевой чистый выброс CO<sub>2</sub> — а также стабилизацию выбросов короткоживущих парниковых газов, таких как метан, которые рассеиваются в атмосфере в течение дней, недель или десятилетий» [20], подразумевая под декарбонизацией процесс изъятия выбросов. При этом другие авторы определяют декарбонизацию как «трансформацию мировой экономики, основанную на использовании возобновляемых источников энергии, целью которой является изменение международных производственно-экономических и финансовых отношений для создания нулевого влияния на окружающую среду» [21], акцентируя внимание на ее экономическом аспекте. Были определены три ключевых подхода к понятию декарбонизации, представленных на рис. 3.



**Рис. 3.** Основные подходы к понятию «декарбонизация». Источник: составлено авторами на основе [5; 20–22]

При этом недостаточное внимание уделяется социальному аспекту декарбонизации и ее роли в обеспечении устойчивого развития общества [22].

Как уже было отмечено, декарбонизация нефтегазовой отрасли также является фокусом научных исследований. Авторами исследования [5] декарбонизация нефтегазового комплекса (НГК) определена как «комплексный и многоступенчатый процесс, включающий нормативно-правовую, коммерческую, научно-методическую, технологическую, организационно-управленческую и инвестиционную составляющие».

Основной источник выбросов при добыче нефти и газа — факельные установки, доля которых составляет более 35 % массы всех выбросов в атмосферу от нефтегазовой отрасли [23; 24]. В рамках исследования был проведен анализ литературы, посвященной направлениям и методам декарбонизации [25–29], в результате которого отмечена несистемность и разнородность классификаций.

На сегодняшний день также существует ряд перспективных методов и технологий полезного использования CO<sub>2</sub>, в том числе при добыче нефти и газа [30]. Одним из самых перспективных является технология CO<sub>2</sub>-EOR — метод интенсификации добычи нефти путем закачки CO<sub>2</sub> в скважину под давлением, который способствует повышению нефтеотдачи пластов и предлагает вариант применения CO<sub>2</sub> в производственных процессах, стимулируя компании к улавливанию выбросов парниковых газов [9; 11; 31]. В связке с секвестрацией CO<sub>2</sub> метод способствует удержанию CO<sub>2</sub> в геологической формации, предотвращая выбросы в атмосферу [11; 32].

Предприятия по нефтепереработке также имеют стабильно высокий выброс загрязняющих веществ в атмосферу из-за неоднородности их объектов, большого количества точечных источников выбросов и сжигания попутных газов на факелах. В этой связи они могут являться перспективными источниками выбросов для дальнейшего применения технологии CCS

**ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ**

(carbon capture and storage) и CCUS (carbon capture, utilization and storage) [23; 24]. Также использование возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для оборудования, не требующего больших мощностей может рассматриваться как один из методов снижения выбросов CO<sub>2</sub>. Такой метод был успешно внедрен на Омском нефтеперерабатывающем заводе в 2019 г. компанией «Газпром нефть» путем установки солнечных электростанций, обеспечивающей 1,2 млн кВт энергии в час, что эквивалентно сжиганию 1,8 тысяч тонн угля [33–35].

При транспортировке углеводородов в трубопроводном и железнодорожном транспорте происходит меньше выбросов парниковых газов, чем при транспортировке другими способами. Основными источниками выбросов CO<sub>2</sub> являются утечки продукта, минимизировать которые возможно с помощью постоянного мониторинга состояния объектов, внедрения систем предотвращения гидроударов и разрывов труб, контроля и диагностики оборудования.

Морской транспорт нефти и газа характеризуется более высокими выбросами парниковых газов из-за длительных сроков транспортировки и стравливания попутного нефтяного газа или метана в атмосферу для понижения давления в резервуаре [36–39].

Самое большое количество испарений нефти и газа и, соответственно, выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу происходит при хранении углеводородов [40].

Переход автобусов и судов на СПГ-топливо — метод декарбонизации, активно применяемый на практике в России и Китае [41]. Другими методами декарбонизации являются: использование бензина с высоким октановым числом, снижение производства пластика из сырой нефти и др.

Однако, несмотря на наличие значительного количества исследований, посвященных вопросам декарбонизации в целом и декарбонизации нефтегазового комплекса в частности, на настоящий момент отсутствует единая классификация ее направлений и методов, а также отсутствуют сценарии и прогнозы декарбонизации нефтегазового комплекса арктических территорий. Данное исследование направлено на изучение данного вопроса и приращение научных знаний в сфере обобщения методов декарбонизации, а также на разработку возможных сценариев декарбонизации северных территорий.

**Результаты и дискуссия*****Направления и способы декарбонизации нефтегазовой отрасли***

В рамках выполнения исследования изучены ключевые области деятельности нефтегазовых компаний с точки зрения выбросов CO<sub>2</sub>. Выделены следующие сферы деятельности нефтегазовых

компаний, в рамках которых возможно применение различных опций декарбонизации:

- операционная деятельность предприятия по секторам down-, mid- и upstream, где внедрение методов декарбонизации непосредственно затрагивает технологические процессы. Данный вид деятельности разделен на конкретные технологические процессы, такие как добыча, транспортировка, хранение, нефтепереработка, эксплуатация;

- научно-исследовательская деятельность, в рамках которой исследуются конкретные перспективные разработки, требующие дальнейшего развития или производственной адаптации;

- производственно-компенсационная деятельность, где внедрение методов декарбонизации связано со стратегическим и оперативным управлением бизнес-процессами без существенной трансформации технологии производства (инвестирование в научно-инновационные проекты и ВИЭ, диверсификация производственного портфеля, диагностика объектов и т. д.).

Данное выделение позволяет компаниям НГК выбрать конкретную сферу для применения инициатив по декарбонизации.

Операции, которые можно совершать над парниковым газом, выделены на основе подхода “4R” (reduce, reuse, recycle, remove) [27]. На основании данного выделения сформирована концептуальная схема выбора опций декарбонизации нефтегазовыми компаниями (рис. 4).

Выбор опции / метода декарбонизации нефтегазовой компании будет зависеть, с одной стороны, от той области деятельности, в рамках которой компания планирует проведение мероприятий, а с другой — от предполагаемой операции над парниковым газом.

Так, например, если компания планирует осуществлять деятельность по декарбонизации в рамках операционной деятельности на этапе добычи, то в случае прямого сокращения выбросов возможна оптимизация работы технологического оборудования, модернизация и увеличение доли энергоэффективного оборудования, использование бурового шлама для повышения нефтеотдачи, электроснабжение объектов с помощью ВИЭ и пр.

Если компания выбирает для декарбонизационной активности производственно-компенсационную деятельность (корпоративные методы), то в случае применения и утилизации газа это будут инвестиции в CCS-, CCU- и CCUS-проекты. В случае прямого сокращения образования CO<sub>2</sub> — инвестирование в развитие ВИЭ и водородной энергетики, строительство биоНПЗ, дивестиции углеродоемких проектов, венчурные инвестиции и пр.

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

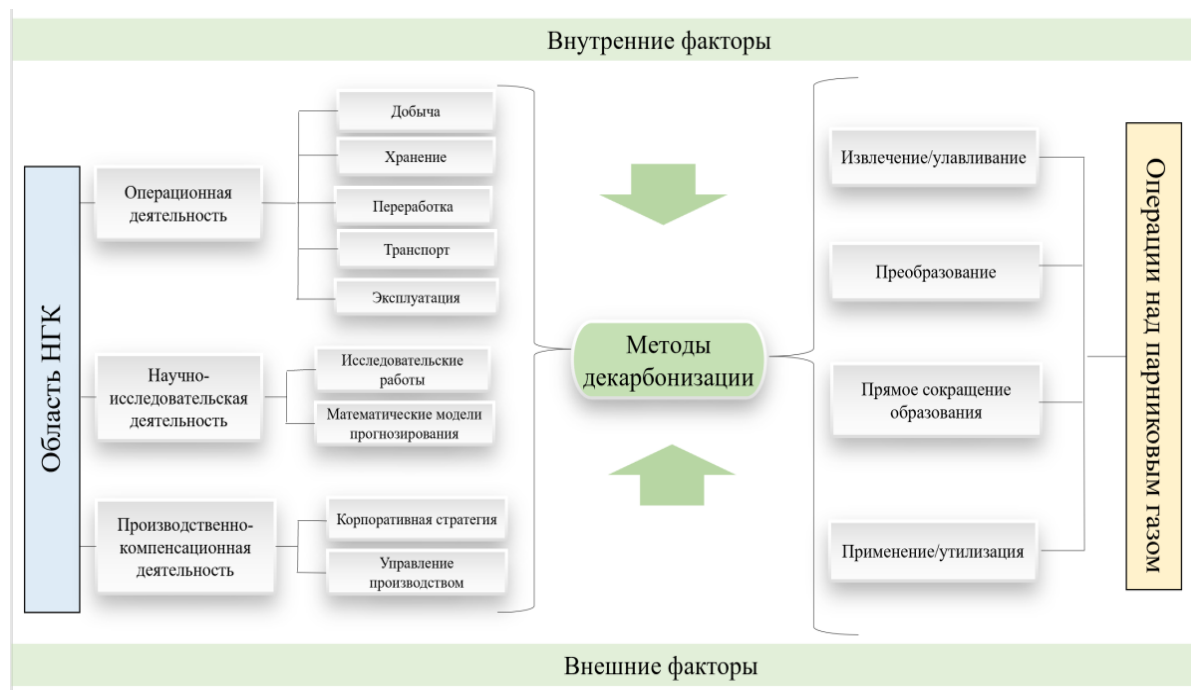


Рис. 4. Концептуальная схема определения возможных опций декарбонизации нефтегазовыми компаниями. Источник: составлено авторами

Применение предложенной схемы позволяет компаниям определить направления декарбонизации и выбрать подходящие методы или опции. При этом выбор опций декарбонизации зависит как от внутренних, так и от внешних факторов, воздействие которых определяется определенными сценариями развития. В рамках исследования были изучены существующие сценарии.

#### Сценарии снижения воздействия парниковых газов нефтегазовыми компаниями в рамках обеспечения устойчивого развития

В рамках проведения исследования был проанализирован мировой опыт и возможные общие сценарии снижения воздействия парниковых газов нефтегазовыми компаниями в рамках обеспечения устойчивого развития, которые были классифицированы как ВИЭ-, CCS- и технологические сценарии.

*ВИЭ-сценарии* основаны на концепции энергоперехода на ВИЭ и биотопливо.

“Shell Sky” (сценарий компании Shell) делает акцент на использование в энергетике биотоплива и водорода [42]. В сценарии предполагается, что развитию ВИЭ будет способствовать усиление давления на нефтегазовую отрасль со стороны правительств, за счет чего пик потребления нефти наступит к 2025 г., природного газа — к 2030 г. К 2050 г. ожидается спад влияния углеводородов на мировой рынок в связи

с внедрением ВИЭ и биотоплива совместно с технологиями CCS и привлечением значительных инвестиций в данный сектор. При таких темпах развития предполагается, что достижение нулевых выбросов от использования энергии возможно к 2070 г.

Сценарий “Shell Sky” позиционируется как амбициозный и возможный к реализации за счет взаимосвязи текущей оценки реального положения энергетической системы с существующими долгосрочными целями по снижению прироста температуры Земли. Но также Shell признает, что, несмотря на попытку адаптировать сценарий к реальным условиям, в области декарбонизации, ВИЭ и использования биотоплива, водорода и технологий CCS на сегодняшний день недостаточно научных и технических разработок [10; 43].

Также внедрение в систему энергообеспечения ВИЭ предполагается в сценариях по декарбонизации азиатского региона [44].

Сценарии Международного энергетического агентства предполагают, что в ближайшие 20 лет мощность ветровых электростанций будут расти в среднем на 13 % в год и к 2040 г. достигнут порядка 8 тыс. ГВт. Ключевыми факторами роста ветроэнергетики станут их растущая мощность, увеличение срока эксплуатации и снижение затрат на их установку на 40 % к 2040 г. Солнечная генерация по прогнозам будет увеличиваться в среднем на 15 % в год, а к 2040 г. ее общая мощность в мире составит около 12 тыс. ГВт. Таким образом, солнечная

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

и ветровая энергии в 2040-х гг. будут вырабатывать в три раза больше электроэнергии, чем все существующие электростанции в мире в настоящее время [45].

Существуют и пессимистичные прогнозы перехода на ВИЭ [46]. Низкие цены на углеводороды, отсутствие инфраструктуры для внедрения ВИЭ и собственных эффективных технологий по их использованию сдерживают развитие этих энергоносителей. По данным, представленным

компанией BP [7], в рамках исследования был произведен математический прогноз энергопотребления ВИЭ и нефтегазовых ресурсов методом скользящей средней и абсолютного прироста. Данные методы прогнозирования не учитывают влияния политической обстановки и социокультурного фактора и основаны только на статистических данных по темпам роста энергопотребления за последние 10 лет (рис. 5).

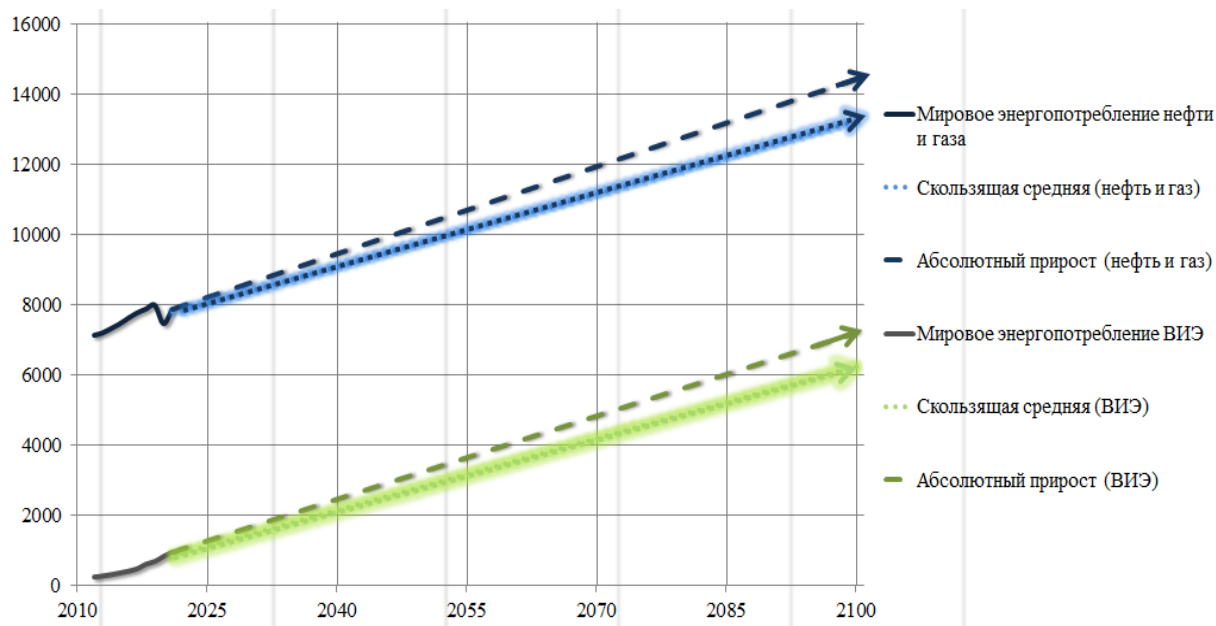


Рис. 5. Прогноз энергопотребления нефтегазовых ресурсов и ВИЭ. Источник: построено авторами на основе [7]

При сохранении сегодняшних тенденций развития ВИЭ и потребления нефтегазовых ресурсов, из представленного графического прогноза видно, что ВИЭ к 2100 г. не перекроют растущую потребность общества в энергоресурсах. Но при этом в связи с растущим интересом и трендом на ВИЭ наблюдается прирост спроса на данный вид энергоносителя.

**CCS-сценарии.** Большинство сценариев декарбонизации нефтегазового комплекса направлены на использование технологий CCS и CCUS. По данным глобального института CCS, в мире сейчас более 250 исследовательских и коммерческих проектов по разработке CCS (рис. 6).

Большой долей существующих проектов CCS занимаются компании США. В России на настоящий момент представлен только один проект («Ямал СПГ», компании «Новатэк»), находящийся на этапе согласования [47].

Распространенность и применимость сценариев CCS сталкивается с рядом барьеров:

1) высокие издержки при разработке и внедрении технологий CCS и CCUS в производственный процесс.

Это приводит к тому, что компаниям экономически целесообразнее платить штрафы за выбросы, чем инвестировать в интегрирование новых и малоизученных технологий [9; 10; 11]. Преодолеть данный барьер возможно при государственной поддержке проектов CCS как в инвестиционном плане, так и на законодательном уровне;

2) низкая осведомленность общественности о технологиях CCS и CCUS и их безопасности [46; 48];

3) действующее законодательство, не способствующее финансированию проектов CCS, ужесточению штрафов за превышение выбросов парниковых газов и разработке нормативно-правовой документации, которая привела бы процессы декарбонизации к единому и понятному для компаний стандарту [49; 50];

4) малая изученность технологий и методов CCS и CCUS, их узкая применимость и малая эффективность. Данную проблему также возможно решить повышением инвестиционной активности государства и частных компаний в научно-исследовательской сфере.

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

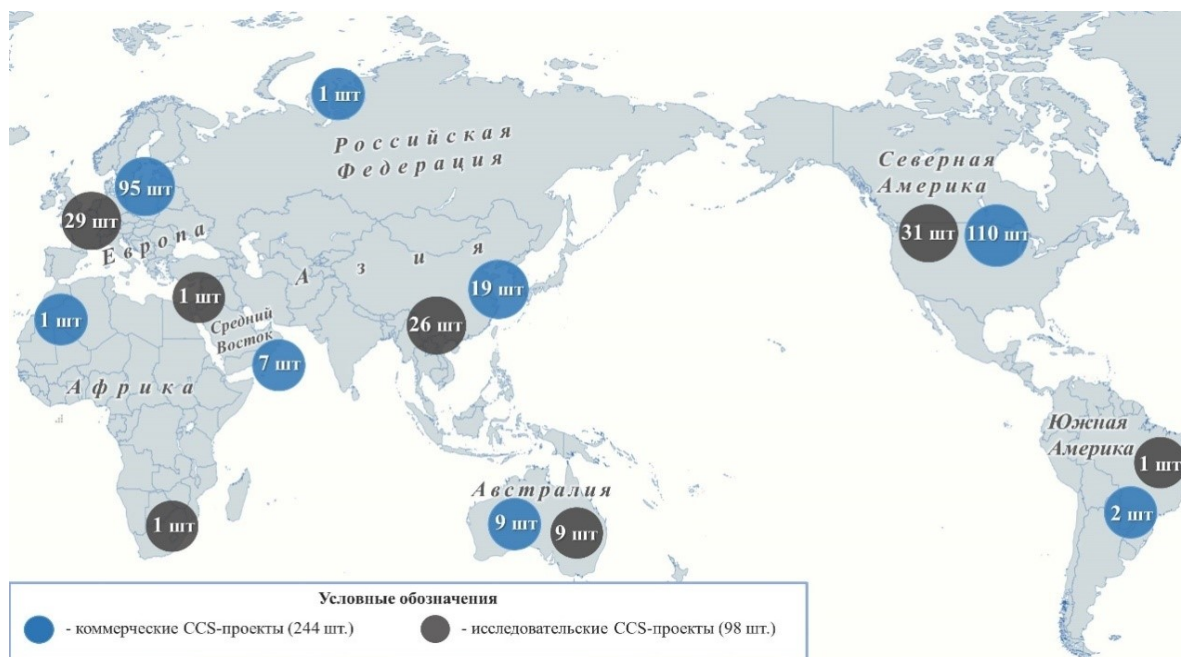


Рис. 6. Структура действующих проектов CCS. Источник: построено авторами на основе [51]

Технологические сценарии являются самыми перспективными, так как направлены на модернизацию существующих технологий. Например, базовый сценарий развития морского судоходства [50] направлен на повышение энергоэффективности судов за счет технологических мер: использования более легких материалов и конструкций, снижения трения жидкостей внутри грузовых танков, рекуперации отпарного газа, применения смазочных материалов и т. д. МАРПОЛ поддерживает данные мероприятия на нормативно-правовом уровне внедрением новых стандартов конструкций судов и их двигателей, обеспечивающих пониженный выброс парниковых

газов. Так, в рамках сценария планируется снизить выбросы CO<sub>2</sub> на 10 % к 2015–2020 гг., на 20 % к 2020–2025 гг. и на 30 % с 2025 по 2030 гг. [50].

Российские сценарии и проблемы НГК в контексте декарбонизации. В Российской Федерации в рамках Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года также разработаны сценарии сокращения выбросов парниковых газов. При этом учтено два сценария — инерционный (не предусматривающий снижения выбросов) и целевой (направленный на существенное снижение выбросов парниковых газов к 2050 г.) (рис. 7).

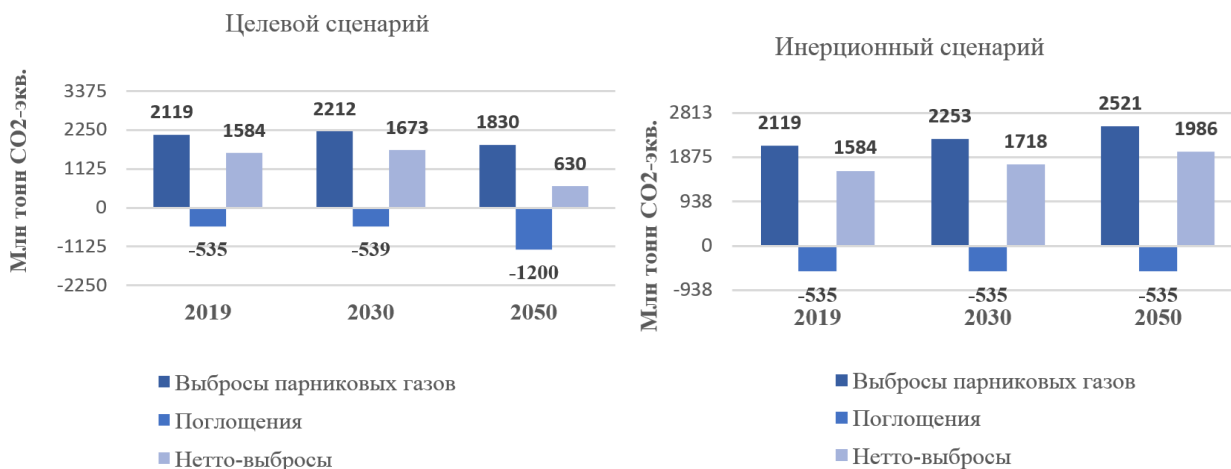


Рис. 7. Сценарии сокращения выбросов CO<sub>2</sub> согласно Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года [52]



**ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ**

На настоящий момент в России проблема изменения климата пока имеет низкую приоритетность как для населения, так и для бизнеса [7]. Данное обстоятельство приводит к отсутствию стимулов для компаний проводить активную декарбонизационную политику. Для государства представляется важным выстраивание механизмов регулирования, взаимодействия и стимулирования бизнеса.

Правовое регулирование выбросов парниковых газов в РФ сейчас находится на начальном этапе. На настоящий момент в этой сфере действует Федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов» от 2 июля 2021 г. № 296-ФЗ, который обеспечивает правовое регулирование отношений, связанных с ограничением выбросов парниковых газов. В нем отражены ключевые аспекты регулирования — принципы и меры по ограничению выбросов, целевые показатели, основы обращения с углеродными единицами и пр.

Кроме того, в рамках актуализации информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям для отраслей устанавливаются индикативные показатели выбросов парниковых газов, которые, как ожидается, будут использоваться Минэкономразвития для формирования системы стимулов и ограничений для предприятий углеродоемких отраслей экономики.

Другой проблемой является высокая капиталоемкость мероприятий по декарбонизации отрасли. Как уже было отмечено, например, проекты CC(U)S зачастую являются убыточными и не приносят экономических эффектов, что обусловлено высокими операционными и капитальными затратами, а также большими рисками [11]. Тем не менее данные технологии сейчас рассматриваются как одни из наиболее доступных для НГК России, так как позволяют получить технологический эффект в виде дополнительной продукции за счет закачки углекислого газа в пласт. Поддержка со стороны государства, в первую очередь прямая (в виде грантов, субсидий и др.), позволила бы повысить экономическую эффективность таких проектов.

Таким образом, на сегодняшний день НГК в контексте декарбонизации нуждается в решении следующих вопросов: разработка и внедрение инструментов государственной поддержки мероприятий по декарбонизации отрасли; формирование комплексной государственной программы по ценовому регулированию выбросов парниковых газов (на настоящий момент экспериментальная программа запущена на Сахалине); внедрение систем учета выбросов парниковых газов на нефтегазовых месторождениях и нефтегазохимических заводах; развитие нормативной правовой и методической базы;

разработка отраслевой климатической стратегии и комплексной стратегии снижения эмиссии парниковых газов в нефтегазовом секторе; включение декарбонизации в общую бизнес-стратегию и инвестиционные планы корпораций.

**Сценарии декарбонизации Арктического региона**

Вопрос о декарбонизации нефтегазовой отрасли является критически важным для северных территорий [53]. Это обусловлено рядом причин: хрупкостью экосистем, интенсивностью промышленного освоения, чувствительностью к изменениям температур окружающей среды, таянием газогидратов и пр. В рамках исследования были рассмотрены сценарии декарбонизации для Арктического региона.

*ССS-сценарии в Арктике.* В Арктическом регионе РФ планируется к реализации один ССС-проект по декарбонизации, признанный Глобальным институтом ССС, — «Ямал СПГ» ПАО «Новатэк» в Ямало-Ненецком автономном округе [54]. Такая же технология улавливания CO<sub>2</sub> на заводах по производству сжиженного природного газа (СПГ) и обратная его закачка в скважину применяется в Норвегии (месторождение Снэвит). С 2008 г. в формациях уже накопилось 7 млн тонн CO<sub>2</sub> [47]. Успешный практический опыт использования данной технологии и рост спроса на СПГ позволяют спрогнозировать возможность ее дальнейшего внедрения в производственный процесс на прочих арктических СПГ-проектах.

*ВИЭ-сценарии в Арктике.* Арктика — зона полярных дней (около 200 дней в году) и сильных ветров (среднегодовая скорость около 5 м/с), что обеспечивает значительный возобновляемый ресурсный потенциал. Так, компания «Газпром нефть» в 2017 г. на Новопортовском нефтегазоконденсатном месторождении включила в инфраструктуру производственных объектов ветросолнечную электростанцию «Юрта», отвечающую за работу напорного трубопровода [55; 56]. Ресурсный потенциал ВИЭ Арктики позволяет перевести часть оборудования на данный вид энергии, что позволит снизить выбросы парниковых газов и сделать процесс добычи, переработки, хранения и транспорта углеводородов более экологичным.

*Технологические сценарии в Арктике.* Вдоль всей арктической зоны проходит Северный морской путь (СМП), имеющий стратегическое значение в развитии нефтегазовой отрасли России [57; 58]. В условиях нестабильной геополитической обстановки и санкционных ограничений происходит переориентация экспортной политики РФ на азиатский рынок, который характеризуется высоким спросом на СПГ. В этой связи особо актуальными представляются сценарии низкоуглеродного судоходства в контексте СМП.

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

Согласно данным Института «Сколково» [58], использование СМП может привести к снижению выбросов на 5,1 млн тонн (с учетом существенного сокращения расстояния транспортировки), а при условии использования СПГ в качестве топлива для танкеров — еще на 3,4 млн тонн. Также в долгосрочной перспективе возможно использование атомного флота и «зеленых» водорода или аммиака в качестве топлива, что приведет к дополнительному снижению выбросов.

В этой связи можно выделить два варианта декарбонизации морского нефтегазового судоходства:

1) непосредственное воздействие на транспортирующее судно: перевод энергетических установок судов на газомоторное топливо (СПГ или компримированный газ) или атомную энергию; использование более легких материалов и конструкций судна; улучшение теплоизоляционных свойств грузовых отсеков; ввод ограничений на суда, работающие на дизельном топливе; повышение штрафов за выбросы парниковых газов от морского судоходства;

2) воздействие на транспортируемый углеводород: внедрение технологий повторного сжижения газа на судне; внедрение установок улавливания CO<sub>2</sub> и его хранение в полимерных резервуарах до места прибытия; использование уловленного парникового газа в энергетических процессах.

В силу специфики, характеризующейся высокой чувствительностью Арктического региона к положительным изменениям температур, декарбонизация региона представляется как сложный социо-экономико-технологический процесс, сочетающий в себе и CCS, и ВИЭ, и применение новых безуглеродных технологий.

*Газовые гидраты.* Анализируя сценарии углероднейтрального освоения арктических регионов, необходимо рассмотреть огромные запасы метана в виде газовых гидратов, которые могут стать источником топлива в будущем. Помимо того что газовые гидраты — это трудноизвлекаемые [59], но перспективные для освоения запасы природного газа, это еще и обширный источник выбросов метана в атмосферу. Повышение температуры ускоряет процесс таяния гидратов, способствуя выбросам CH<sub>4</sub> и разрушению озонового слоя над арктической зоной [60]. Вопросы освоения газогидратов на настоящий момент находятся в стадии разработки.

### Заключение

Вопросы устойчивого развития и обеспокоенность общества климатической повесткой формируют сложные вызовы для компаний нефтегазового комплекса. Энергопереход обуславливает

необходимость поиска новой роли для добывающих компаний, и декарбонизация нефтегазового комплекса является актуальным ответом на это усиливающееся давление.

В рамках исследования были изучены вопросы роли ВИЭ в глобальном энергопереходе, выявлены ключевые проблемы нефтегазовых компаний в контексте тренда на декарбонизацию, предложены возможные направления решения данных проблем. Также были решены следующие задачи:

1) исследованы теоретические основы декарбонизации в контексте энергетического перехода и определены ключевые вызовы для компаний нефтегазового комплекса в контексте декарбонизации;

2) определены основные причины выбросов CO<sub>2</sub> в нефтегазовом комплексе и проанализированы существующие направления и опции в области минимизации их воздействия;

3) предложена концептуальная схема выбора опций и методов декарбонизации нефтегазовыми компаниями на основе определения сферы деятельности, которую планируется декарбонизировать, и операции над парниковым газом;

4) проведен критический анализ мирового опыта и возможных общих сценариев снижения воздействия парниковых газов нефтегазовыми компаниями в рамках обеспечения устойчивого развития: ВИЭ-, CCS- и технологические сценарии;

4) выделены возможные сценарии декарбонизации Арктического региона с учетом его специфических особенностей.

Проведенное исследование позволяет сделать следующий вывод: несмотря на то что ВИЭ-сценарии предполагают в долгосрочной перспективе вытеснение нефти и газа с энергетического рынка, такой переход невозможен в среднесрочной перспективе. При этом в рамках данных сценариев нефтегазовые компании могут диверсифицировать свою деятельность за счет расширения портфеля в сторону ВИЭ-проектов. CCS-сценарии достаточно сложны в реализации, хотя для нефтегазовых компаний применение данных методов является наиболее целесообразным. Технологические сценарии наиболее реальны для применения, так как их реализация в основном сопряжена с обновлением оборудования, и они также являются актуальными для нефтегазовых компаний. Арктический регион РФ находится на активной стадии промышленной разработки, в этой связи целесообразно говорить не только о реструктуризации промышленной инфраструктуры в целях снижения выбросов парниковых газов, но и о создании системы, обеспечивающей углеродную нейтральность региона.

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

## Список источников

1. Lee Ch.-Ch., Hussain J. Carbon neutral sustainability and green development during energy consumption // *Innovation and Green Development*. 2022. Vol. 1 (1). 100002. DOI: 10.1016/j.igd.2022.100002.
2. Акаев А. А., Рудской А. И., Кораблёв В. В., Сарыгулов А. И. Технологические и экономические барьеры роста водородной энергетики // *Вестник Российской академии наук*. 2022. Т. 92 (12). С. 1133–1144.
3. Данилин К. П. Методологический подход к оценке концепции энергетического перехода для формирования региональной энергетической политики // *Фундаментальные исследования*. 2022. № 7. С. 122–127.
4. Лебедева М. А. Проблемы декарбонизации экономики России // *Проблемы развития территорий*. 2022. № 26 (2). DOI: 10.15838/ptd.2022.2.118.5.
5. Ильинский А. А., Калинина О. В., Хасанов М. М., Афанасьев М. В., Саитова А. А. Декарбонизация нефтегазового комплекса: приоритеты и организационные модели развития // *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2022. № 1. С. 33–46. DOI: 10.37614/2220-802X.1.2022.75.003.
6. Данные о мировой энергетике и климате — ежегодник 2022. URL: <https://energystats.enerdata.net/co2/emissions-co2-data-from-fuel-combustion.html> (дата обращения: 15.12.2022).
7. BP Statistical Review of World Energy 2022. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf?ysclid=levb00fba7118327712> (дата обращения: 21.01.2023).
8. Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer — Data Tools — IEA. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer> (дата обращения: 16.02.2023).
9. Bui M., Adjiman C. S., Bardow A., Anthony E. J., Boston A., Brown S., Fennell P. S., Fuss S., Galindo A., Hackett L. A., Hallett J. P., Herzog H. J., Jackson G., Kemper J., Krevor S., Maitland G. C., Matuszewski M., Metcalfe I. S., Petit C., Puxty G., Reimer J., Reiner D. M., Rubin E. S., Scott S. A., Shah N., Smit B., Trusler J. P. M., Webley P., Wilcox J., Mac Dowell N. Carbon capture and storage (CCS): the way forward // *Energy and Environmental Science*. 2018. Vol. 11 (5), pp. 1062–1176. DOI: 10.1039/C7EE02342A.
10. Rissmana J., Bataille C., Masanet E., Aden N., Morrow W. R., Zhou N., Elliott N., Dell R., Heeren N., Huckestein B., Cresko J., Miller S. A., Roy J., Fennell P., Cremmins B., Koch Blank T., Hone D., Williams E. D., de la Rue du Can S., Sisson B., Williams M., Katzenberger J., Burtraw D., Sethi G., Ping H., Danielson D., Lu H., Lorber T., Dinkel J., Helseth J. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070 // *Applied Energy*. 2020. Vol. 266. 114848. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114848.
11. Romasheva N., Ilinova A. CCS projects: How regulatory framework influences their deployment // *Resources*. 2019. Vol. 8 (4). 181. DOI: 10.3390/RESOURCES8040181.
12. Саитова А. А., Ильинский А. А., Фадеев А. М. Сценарии развития нефтегазовых компаний России в условиях международных экономических санкций и декарбонизации энергетики // *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2022. № 3. С. 134–143. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2022.77.009.
13. Ilinova, A., Dmitrieva, D. Strategic development of the Russian arctic: Socioecological approach. In *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2017*, Albena, Bulgaria, 29 June — 05 July 2017; STEF92 Technology Ltd.: Sofia, Bulgaria; Volume 17 (52); pp. 851–858. DOI:10.5593/sgem2017/52/S20.109.
14. Газогидраты: новые возможности для энергоснабжения. URL: <https://ru.arctic.ru/analitic/20151126/238271.html?ysclid=levhh09w5k368226780> (дата обращения: 15.01.2023).
15. 2020 Arctic Report Card: Climate.gov visual highlights. URL: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/2020-arctic-report-card-climategov-visual-highlights> (дата обращения: 06.02.2023).
16. Gritsenko D., Efimova E. Is there Arctic resource curse? Evidence from the Russian Arctic regions // *Resource Policy*. 2020. Vol. 65. 101547. DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.101547.
17. Shapovalova D., Galimullin E., Grushevenko E. Russian Arctic offshore petroleum governance: The effects of western sanctions and outlook for northern development // *Energy Policy*. 2020. Vol. 146. 111753. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111753.
18. Sidortsov R. Benefits over risks: a case study of government support of energy development in the Russian north // *Energy Policy*. 2019. Vol. 129. P. 132–138. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.01.067.
19. Usman M., Jahanger A., Makhdum M. S. A., Balsalobre-Lorente D., Bashir A. How do financial development, energy consumption, natural resources, and globalization affect Arctic countries' economic growth and environmental quality? An advanced panel data simulation // *Energy*. 2022. Vol. 241. 122515. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122515.

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

20. Decarbonizing Development: Three Steps to a Zero-Carbon Future. URL: <https://www.unccllearn.org/wp-content/uploads/library/wb13052015.pdf> (дата обращения: 30.01.2023).
21. Глебова А. Г., Данеева Ю. О. Декарбонизация мировой экономики: энергетический сектор // Финансовый бизнес. 2021. № 5 (215). С. 26–31.
22. Wang Y. What drives sustainable development? Evaluating the role of oil and coal resources for selected resource rich economies // Resources Policy. 2023. Vol. 80. 103078. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103078.
23. Ivanov A. V., Strizhenok A. V., Vorobey R. Y. Reduction of gas and aerosol pollution of atmospheric air at a condensate stabilization units // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 839 (4). 042036. DOI: 10.1088/1755-1315/839/4/042036.
24. Ivanov A. V., Strizhenok A. V., Suprun I. K. Ecological and economic justification of the utilization of associated petroleum gas at oil fields of Russian Federation // Geologiya i Geofizika Yuga Rossii. 2020. Vol. 10 (1). P. 114–126. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59069.
25. Глебова А. Г., Данеева Ю. О. Адаптация российской энергетики к декарбонизации мировой экономики // Экономика. Налоги. Право. 2021. № 14 (4). С. 48–55.
26. Данилин К. П. Влияние энергетического перехода на трансформацию экономических систем // Управление развитием экономических систем. Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции (Санкт-Петербург, 14–15 декабря 2022 г.). СПб.: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022. С. 58–62.
27. Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России. URL: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_Decarbonization\\_of\\_oil\\_and\\_gas\\_RU\\_22032021.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Decarbonization_of_oil_and_gas_RU_22032021.pdf) (дата обращения: 08.12.2022).
28. Шевелева Н. А. Направления и методы декарбонизации нефтегазового сектора // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2023. № 2 (311). С. 25–31. DOI: 10.33285/2411-7013-2023-2(311)-25-31.
29. Ветрова М. А., Богданова А. А., Яруллина И. Э. Декарбонизация нефтегазовой отрасли в условиях развития циркулярной экономики // Проблемы современной экономики. 2021. № 3 (79). С. 196–199.
30. Скобелев Д. О., Череповицына А. А., Гусева Т. В. Технологии секвестрации углекислого газа: роль в достижении углеродной нейтральности и подходы к оценке затрат // Записки Горного института. 2023. № 259. С. 125–140. DOI: 10.31897/PMI.2023.10.
31. Cheng C., Hekuan L., Zhengmeng H., Faisal M., Jianxing L., Wentao F. A review of CO<sub>2</sub> storage in view of safety and cost-effectiveness // Energies. 2020. Vol. 13 (3). 600. DOI: 10.3390/en13030600.
32. Vo T. H., Yuichi S., Kyuro S. Application of artificial neural network for predicting the performance of CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery and storage in residual oil zones // Scientific Reports. 2020. Vol. 10 (1). 18204. DOI: 10.1038/s41598-020-73931-2.
33. Бобарыкина А. А. «Зеленая» энергетика Омской области // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Безопасность городской среды». Омск: Омский государственный технический университет, 2020. С. 212–214.
34. Khalil A., Rajab Z., Amhammed M., Asheibi A. The benefits of the transition from fossil fuel to solar energy in Libya: A street lighting system case study // Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika). 2017. Vol. 53 (2). P. 138-151. DOI: 10.3103/S0003701X17020086.
35. Esmaeil J., Manesh M. H. K., Mostafa D., Onishi V.C. Advanced exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analyses of integrated solar-assisted gasification cycle for producing power and steam from heavy refinery fuels // Energies. 2021. Vol. 14 (24). 8409. DOI: 10.3390/en14248409.
36. Bolobov V., Martynenko Y. V., Voronov V., Latipov I., Popov G. Improvement of the Liquefied Natural Gas Vapor Utilization System Using a Gas Ejector // Inventions. 2022. Vol. 7 (1). 14. DOI: 10.3390/inventions7010014.
37. Yu G., Jia S., Geng Y. Numerical investigation into the two-phase convective heat transfer within the hold of an oil tanker subjected to a rolling motion // Journal of Marine Science and Engineering. 2019. Vol. 7 (4). DOI: 10.3390/jmse7040094.
38. Yu P., Yin Y., Yue Q., Wu S. Experimental study of ship motion effect on pressurization and holding time of tank containers during marine transportation // Sustainability. 2022. Vol. 14 (6). DOI: 10.3390/su14063595.
39. Kulitsa M., Wood D. A Soft metal blanket with optional anti-sloshing conceptual designs to improve pressure control for floating and land-based liquefied natural gas tanks // Advances in Geo-Energy Research. 2019. Vol. 3 (4). P. 424–447. DOI: 10.26804/ager.2019.04.09.

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

40. Ravikumar A. P., Roda-Stuart D., Liu R., Bradley A., Bergerson J., Nie Y., Zhang S., Bi X., Brandt A. R. Repeated leak detection and repair surveys reduce methane emissions over scale of years // *Environmental Research Letters*. 2020. Vol. 15 (3). DOI: 10.1088/1748-9326/ab6ae1.
41. Song H., Ou X., Yuan J., Yu M. Wang C. Energy consumption and greenhouse gas emissions of diesel/LNG heavy-duty vehicle fleets in china based on a bottom-up model analysis // *Energy*. 2017. Vol. 140. P. 966–978. DOI: 10.1016/j.energy.2017.09.011.
42. Shell Sky scenario. Shell Global. URL: <https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/shell-scenario-sky/could-society-reach-the-goals-of-the-paris-agreement/sustainable-aviation.html> (дата обращения: 05.10.2022).
43. Kraan O., Kramer G. J., Haigh M., Laurens C. An Energy Transition That Relies Only on Technology Leads to a Bet on Solar Fuels // *Joule*. 2019. Vol. 3 (10). P. 2286–2290. DOI: 10.1016/j.joule.2019.07.029.
44. Tanveer T., Dongdong Zh. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far // *Energy Reports*. 2020. Vol. 6. P. 1973–1991. DOI: 10.1016/j.egy.2020.07.020.
45. Akaev A. A., Davydova O. I. A mathematical description of selected energy transition scenarios in the 21st century, intended to realize the main goals of the Paris climate agreement // *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 9. 2558. DOI: 10.3390/en14092558.
46. Tsvetkov P., Cherepovitsyn A., Fedoseev S. Public perception of carbon capture and storage: A state-of-the-art overview // *Heliyon*. 2019. Vol. 5 (12). e02845. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02845.
47. Ульченко М. В., Федосеев С. В. Тенденции развития мирового рынка сжиженного природного газа и перспективы реализации российских арктических проектов // *Север и рынок: формирование экономического порядка*. 2022. № 4. С. 40–57. DOI: 10.37614/2220-802X.4.2022.78.003.
48. Vasilev Y., Cherepovitsyn A., Tsvetkova A., Komendantova N. Promoting public awareness of carbon capture and storage technologies in the Russian federation: A system of educational activities // *Energies*. 2021. Vol. 14 (5). 1408. DOI: 10.3390/en14051408.
49. Cherepovitsyna, A.; Sheveleva, N.; Riadinskaia, A.; Danilin, K. Decarbonization Measures: A Real Effect or Just a Declaration? An Assessment of Oil and Gas Companies' Progress towards Carbon Neutrality // *Energies*. 2023. Vol. 16. 3575. <https://doi.org/10.3390/en16083575>.
50. Halim R. A., Kirstein L., Merk O., Martinez L. M. Decarbonization pathways for international maritime transport: A model-based policy impact assessment // *Sustainability*. 2018. Vol. 10 (7). 2243. DOI: 10.3390/su10072243.
51. Facilities — Global CCS Institute. URL: <https://co2re.co/FacilityData> (дата обращения: 06.02.2023).
52. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. URL: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtlpyzWfHaiUa.pdf> (дата обращения: 10.02.2023).
53. Скуфьина Т. П., Самарина В. П., Самарин А. В. Процессы декарбонизации производства и перспективы Арктики как углеродно нейтральной территории // *Уголь*. 2022. №6. С. 54–58. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-54-58.
54. «НОВАТЭК» прошел международную сертификацию участков на Ямале и Гыдане для подземного хранения углекислого газа. URL: [https://www.novatek.ru/ru/press/releases/index.php?id\\_4=4861&ysclid=lehe4bmojb726223247](https://www.novatek.ru/ru/press/releases/index.php?id_4=4861&ysclid=lehe4bmojb726223247) (дата обращения: 31.01.2023).
55. Елистратов В. В. Энергоснабжение в Арктике с использованием ВИЭ // *Neftegaz.ru*. 2023. № 1 (133).
56. На Новопортовском месторождении запущена ветросолнечная электростанция. URL: <https://teknoblog.ru/2017/06/08/78927?ysclid=lehrjh3er1496289979> (дата обращения: 16.01.2023).
57. Makarova I., Gubacheva L., Makarov D., Buyvol P. Economic and environmental aspects of the development possibilities for the northern sea route // *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 57. P. 347–355. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.060.
58. Севморпуть может радикально снизить выбросы парниковых газов в Арктике. URL: <https://www.skolkovo.ru/expert-opinions/sevmorput-mozhet-radikalno-snitit-vybrosy-pannikovyh-gazov-v-arktike/> (дата обращения: 12.02.2023).
59. Логвина Е. А., Матвеева Т. В., Бочкарев А. В., Семенова А. А., Назарова О. В. Анализ технологических и технических достижений в области изучения субквальных газовых гидратов и возможность их применения в арктических морях России // *Арктика: экология и экономика*. 2020. № 4 (40). С. 66–76. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-66-76.
60. Giustiniani M., Tinivella U., Jakobsson M., Rebesco M. Arctic Ocean Gas Hydrate Stability in a Changing Climate // *Journal of Geological Research*. 2013. Vol. 2013. 783969. DOI: 10.1155/2013/783969.

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

## References

1. Lee Ch.-Ch., Hussain J. Carbon neutral sustainability and green development during energy consumption. *Innovation and Green Development*, 2022, vol. 1 (1), 100002. DOI: 10.1016/j.igd.2022.100002.
2. Akaev A. A., Rudskoy A. I., Korablev V. V., Sarygulov A. I. Tekhnologicheskie i ekonomicheskie bar'ery rosta vodorodnoi energetiki [Technological and economic barriers to the growth of hydrogen energy]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, 2022, vol. 92 (12), pp. 1133–1144.
3. Danilin K. P. Metodologicheskii podkhod k otsenke kontseptsii energeticheskogo perekhoda dlya formirovaniya regional'noi energeticheskoi politiki [Methodological approach to the energy transition concept assessment for the regional energy policy formation]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2022, no. 7, pp. 122–127. (In Russ.)
4. Lebedeva M. A. Problemy dekarbonizatsii ekonomiki Rossii [Decarbonization problems of the Russian economy]. *Problems of Territory's Development* [Economy and nature], 2022, vol. 26 (2). (In Russ.). DOI: 10.15838/ptd.2022.2.118.5.
5. Ilyinsky A. A., Kalinina O. V., Khasanov M. M., Afanasiev M. V., Saitova A. A. Dekarbonizatsiya neftegazovogo kompleksa: priority i organizatsionnye modeli razvitiya [Decarbonization of the oil and gas complex: priorities and organizational models of development]. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka* [The North and the Market: Forming the Economic Order], 2022, no. 1, pp. 33–46. DOI:10.37614/2220-802X.1.2022.75.003.
6. Global Energy and Climate Data — Yearbook 2022. (In Russ.). Available at: <https://energystats.enerdata.net/co2/emissions-co2-data-from-fuel-combustion.html> (accessed 15 December 2022).
7. BP Statistical Review of World Energy 2022. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf?ysclid=levb00fba7118327712> (accessed 21 January 2023).
8. Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer — Data Tools — IEA. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer> (accessed 16 February 2023).
9. Bui M., Adjiman C. S., Bardow A., Anthony E. J., Boston A., Brown S., Fennell P. S., Fuss S., Galindo A., Hackett L. A., Hallett J. P., Herzog H. J., Jackson G., Kemper J., Krevor S., Maitland G. C., Matuszewski M., Metcalfe I. S., Petit C., Puxty G., Reimer J., Reiner D. M., Rubin E. S., Scott S. A., Shah N., Smit B., Trusler J. P. M., Webley P., Wilcox J., Mac Dowell N. Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy and Environmental Science*, 2018, vol. 11 (5), pp. 1062–1176. DOI: 10.1039/C7EE02342A.
10. Rissmana J., Bataille C., Masanet E., Aden N., Morrow W. R., Zhou N., Elliott N., Dell R., Heeren N., Huckestein B., Cresko J., Miller S. A., Roy J., Fennell P., Cremmins B., Koch Blank T., Hone D., Williams E. D., de la Rue du Can S., Sisson B., Williams M., Katzenberger J., Burtraw D., Sethi G., Ping H., Danielson D., Lu H., Lorber T., Dinkel J., Helseth J. Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070. *Applied Energy*, 2020, vol. 266, 114848. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114848.
11. Romasheva N., Ilinova A. CCS projects: How regulatory framework influences their deployment. *Resources*, 2019, vol. 8 (4), 181. DOI: 10.3390/RESOURCES8040181.
12. Saitova A. A., Ilyinsky A. A., Fadeev A. M. Stsenarii razvitiya neftegazovykh kompanii Rossii v usloviyakh mezhdunarodnykh ekonomicheskikh sanktsii i dekarbonizatsii energetiki [Scenarios for the development of oil and gas companies in Russia in the context of international economic sanctions and the decarbonization of the energy sector]. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka* [The North and the Market: Forming the Economic Order], 2022, no. 3, pp. 134–143. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2022.77.009.
13. Ilinova A., Dmitrieva D. Strategic development of the Russian arctic: Socioecological approach. In International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 2017, Albena, Bulgaria, 29 June – 05 July 2017; STEF92 Technology Ltd.: Sofia, Bulgaria; Volume 17(52); pp. 851–858. DOI:10.5593/sgem2017/52/S20.109.
14. Gazogidraty: novye vozmozhnosti dlya energosnabzheniya [Gas hydrates: new opportunities for energy supply]. (In Russ.). Available at: <https://ru.arctic.ru/analitic/20151126/238271.html?ysclid=levhh09w5k368226780> (accessed 15 January 2023).
15. 2020 Arctic Report Card: Climate.gov visual highlights. Available at: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/2020-arctic-report-card-climategov-visual-highlights> (accessed 06 February 2023).
16. Gritsenko D., Efimova E. Is there Arctic resource curse? Evidence from the Russian Arctic regions. *Resource Policy*, 2020, vol. 65, 101547. DOI: 10.1016/j.resourpol.2019.101547.
17. Shapovalova D., Galimullin E., Grushevenko E. Russian Arctic offshore petroleum governance: The effects of western sanctions and outlook for northern development. *Energy Policy*, 2020, vol. 146, 111753. DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111753.

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

18. Sidortsov R. Benefits over risks: a case study of government support of energy development in the Russian north. *Energy Policy*, 2019, vol. 129, pp. 132–138. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.01.067.
19. Usman M., Jahanger A., Makhdum M. S. A., Balsalobre-Lorente D., Bashir A. How do financial development, energy consumption, natural resources, and globalization affect Arctic countries' economic growth and environmental quality? An advanced panel data simulation. *Energy*, 2022, vol. 241, 122515. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122515.
20. Decarbonizing Development: Three Steps to a Zero-Carbon Future. Available at: <https://www.unclearn.org/wp-content/uploads/library/wb13052015.pdf> (accessed 31 January 2023).
21. Glebova A. G., Daneeva Yu. O. Dekarbonizatsiya mirovoi ekonomiki: energeticheskii sektor [Decarbonization of the world economy: energy sector]. *Finansovyi biznes* [Financial business], 2021, vol. 5 (215), pp. 26–31. (In Russ.).
22. Wang Y. What drives sustainable development? Evaluating the role of oil and coal resources for selected resource rich economies. *Resources Policy*, 2023, vol. 80, 103078. DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103078.
23. Ivanov A. V., Strizhenok A. V., Vorobey R. Y. Reduction of gas and aerosol pollution of atmospheric air at a condensate stabilization units. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, vol. 839 (4), 042036. DOI: 10.1088/1755-1315/839/4/042036.
24. Ivanov A. V., Strizhenok A.V., Suprun I. K. Ecological and economic justification of the utilization of associated petroleum gas at oil fields of Russian Federation. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii*, 2020, vol. 10 (1), pp. 114–126. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59069.
25. Glebova A. G., Daneeva Yu. O. Adaptatsiya rossiiskoi energetiki k dekarbonizatsii mirovoi ekonomiki [Adaptation of the Russian energy sector to the decarbonization of the world economy]. *Ekonomika. Nalogi. Pravo* [Economics. Taxes. Law], 2021, vol. 14 (4), pp. 48–55. (In Russ.).
26. Danilin K. P. Vliyanie energeticheskogo perekhoda na transformatsiyu ekonomicheskikh system [The influence of the energy transition on the transformation of economic systems]. *Upravlenie razvitiem ekonomicheskikh sistem. Sbornik nauchnykh trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Sankt-Peterburg, 14–15 dekabrya 2022 g.)* [Management of the development of economic systems. Collection of scientific papers of the All-Russian Science-to-Practice Conference (St. Petersburg, December 14–15, 2022)]. Saint Petersburg, Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 2022, pp. 58–62. (In Russ.).
27. Dekarbonizatsiya neftegazovoi otrasli: mezhdunarodnyi opyt i priority Rossii [Decarbonization of the Oil and Gas Industry: International Experience and Russia's Priorities]. (In Russ.). Available at: [https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO\\_EneC\\_Decarbonization\\_of\\_oil\\_and\\_gas\\_RU\\_22032021.pdf](https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Decarbonization_of_oil_and_gas_RU_22032021.pdf) (accessed 08 December 2022).
28. Sheveleva N. A. Directions and methods of decarbonization of the oil and gas sector. *Environmental protection in oil and gas complex*, 2023, no. 2 (311), pp. 25–31. (In Russ.). DOI: 10.33285/2411-7013-2023-2(311)-25-31.
29. Vetrova M. A., Bogdanova A.A., Yarullina I. E. Dekarbonizatsiya neftegazovoi otrasli v usloviyakh razvitiya tsirkulyarnoi ekonomiki [Decarbonization of the oil and gas industry in the context of the development of a circular economy]. *Problemy sovremennoi ekonomiki* [Problems of modern economics], 2021, no. 3 (79), pp. 196–199. (In Russ.).
30. Skobelev D. O., Cherepovitsyna A. A., Guseva T. V. Tekhnologii sekvestratsii uglekislogo gaza: rol' v dostizhenii uglerodnoi neutral'nosti i podkhody k otsenke zatrat [Carbon capture and storage: net zero contribution and cost estimation approaches]. *Journal of Mining Institute*, 2023, vol. 259, pp. 125–140. DOI: 10.31897/PMI.2023.10.
31. Cheng C., Hekuan L., Zhengmeng H., Faisal M., Jianxing L., Wentao F. A review of CO<sub>2</sub> storage in view of safety and cost-effectiveness. *Energies*, 2020, vol. 13 (3), 600. DOI: 10.3390/en13030600.
32. Vo T. H., Yuichi S., Kyuro S. Application of artificial neural network for predicting the performance of CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery and storage in residual oil zones. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10 (1), 18204. DOI: 10.1038/s41598-020-73931-2.
33. Bobarykina A. A. "Zelenaya" energetika Omskoi oblasti [Green energy of the Omsk region]. *Proceedings of the VII International science-to-practice conference "Safety of the urban environment"*, Omsk, Omsk State Technical University, 2020, pp. 212–214. (In Russ.).
34. Khalil A., Rajab Z., Amhammed M., Asheibi A. The benefits of the transition from fossil fuel to solar energy in Libya: A street lighting system case study. *Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika)*, 2017, vol. 53 (2), pp. 138–151. DOI: 10.3103/S0003701X17020086.
35. Esmaeil J., Manesh M. H. K., Mostafa D., Onishi V. C. Advanced exergy, exergoeconomic, and exergoenvironmental analyses of integrated solar-assisted gasification cycle for producing power and steam from heavy refinery fuels. *Energies*, 2021, vol. 14 (24), 8409. DOI: 10.3390/en14248409.
36. Bolobov V., Martynenko Y. V., Voronov V., Latipov I., Popov G. Improvement of the Liquefied Natural Gas Vapor Utilization System Using a Gas Ejector. *Inventions*, 2022, vol. 7 (1), 14. DOI: 10.3390/inventions7010014.

## ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ

37. Yu G., Jia S., Geng Y. Numerical investigation into the two-phase convective heat transfer within the hold of an oil tanker subjected to a rolling motion. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2019, vol. 7(4). DOI: 10.3390/jmse7040094.
38. Yu P., Yin Y., Yue Q., Wu S. Experimental study of ship motion effect on pressurization and holding time of tank containers during marine transportation. *Sustainability*, 2022, vol. 14 (6). DOI: 10.3390/su14063595.
39. Kulitsa M., Wood D. A Soft metal blanket with optional anti-sloshing conceptual designs to improve pressure control for floating and land-based liquefied natural gas tanks. *Advances in Geo-Energy Research*, 2019, vol. 3 (4), pp. 424–447. DOI: 10.26804/ager.2019.04.09.
40. Ravikumar A. P., Roda-Stuart D., Liu R., Bradley A., Bergerson J., Nie Y., Zhang S., Bi X., Brandt A. R. Repeated leak detection and repair surveys reduce methane emissions over scale of years. *Environmental Research Letters*, 2020, vol. 15 (3). DOI: 10.1088/1748-9326/ab6ae1.
41. Song H., Ou X., Yuan J., Yu M. Wang C. Energy consumption and greenhouse gas emissions of diesel/LNG heavy-duty vehicle fleets in China based on a bottom-up model analysis. *Energy*, 2017, vol. 140, pp. 966–978. DOI: 10.1016/j.energy.2017.09.011.
42. Shell Sky scenario. Shell Global. Available at: <https://www.shell.com/energy-and-innovation/the-energy-future/scenarios/shell-scenario-sky/could-society-reach-the-goals-of-the-paris-agreement/sustainable-aviation.html> (accessed 05.10.2022).
43. Kraan O., Kramer G. J., Haigh M., Laurens C. An Energy Transition That Relies Only on Technology Leads to a Bet on Solar Fuels. *Joule*, 2019, vol. 3 (10), pp. 2286–2290. DOI: 10.1016/j.joule.2019.07.029.
44. Tanveer T., Dongdong Zh. A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 1973–1991. DOI: 10.1016/j.egy.2020.07.020.
45. Akaev A. A., Davydova O. I. A mathematical description of selected energy transition scenarios in the 21st century, intended to realize the main goals of the Paris climate agreement. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 9, 2558. DOI: 10.3390/en14092558.
46. Tsvetkov P., Cherepovitsyn A., Fedoseev S. Public perception of carbon capture and storage: A state-of-the-art overview. *Heliyon*, 2019, vol. 5 (12), e02845. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02845.
47. Ulchenko M. V., Fedoseev S. V. Tendentsii razvitiia mirovogo rynka szhizhennogo prirodno gaza i perspektivy realizatsii rossiiskikh arkticheskikh proektov [Trends in the development of the global liquefied natural gas market and prospects for the implementation of Russian Arctic projects]. *Sever i rynek: formirovanie ekonomicheskogo poryadka* [The North and the Market: Forming the Economic Order], 2022, no. 4, pp. 40–57. (In Russ.). doi:10.37614/2220-802X.4.2022.78.003.
48. Vasilev Y., Cherepovitsyn A., Tsvetkova A., Komendantova N. Promoting public awareness of carbon capture and storage technologies in the Russian federation: A system of educational activities. *Energies*, 2021, vol. 14 (5), 1408. DOI: 10.3390/en14051408.
49. Cherepovitsyna, A.; Sheveleva, N.; Riadinskaia, A.; Danilin, K. Decarbonization Measures: A Real Effect or Just a Declaration? An Assessment of Oil and Gas Companies' Progress towards Carbon Neutrality. *Energies*, 2023, vol. 16, 3575. <https://doi.org/10.3390/en16083575>.
50. Halim R. A., Kirstein L., Merk O., Martinez L. M. Decarbonization pathways for international maritime transport: A model-based policy impact assessment. *Sustainability*, 2018, vol. 10 (7), 2243. DOI: 10.3390/su10072243.
51. Facilities — Global CCS Institute. Available at: <https://co2re.co/FacilityData> (accessed 06 February 2023).
52. Strategiya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii s nizkim urovnem vybrosov parnikovykh gazov do 2050 goda [Strategy for socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050]. (In Russ.). Available at: <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yAQBhtlpyzWfHaiUa.pdf> (accessed 10 February 2023).
53. Skufina T. P., Samarina V. P., Samarin A. V. Processy dekarbonizatsii proizvodstva i perspektivy Arktiki kak uglerodno neitral'noj territorii [Concerning processes of decarbonization of production and prospects for the Arctic as a carbon-neutral territory]. *Ugol'* [Coal], 2022, vol. 6, pp. 54–58. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-54-58.
54. NOVATEK proshel mezhdunarodnyu sertifikatsiyu uchastkov na Yamale i Gydane dlya podzemnogo khraneniya uglekislogo gaza [NOVATEK passed the international certification of sites in Yamal and Gydan for the underground storage of carbon dioxide]. (In Russ.). Available at: [https://www.novatek.ru/ru/press/releases/index.php?id\\_4=4861&ysclid=lehe4bmojb726223247](https://www.novatek.ru/ru/press/releases/index.php?id_4=4861&ysclid=lehe4bmojb726223247) (accessed 31 January 2023).
55. Elistratov V. V. Energiosnabzhenie v Arktike s ispol'zovaniem VIE [Energy supply in the Arctic using renewable energy sources]. *Neftegaz.ru*, 2023, no. 1 (133). (In Russ.).



**ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ НА РОССИЙСКОМ СЕВЕРЕ И В АРКТИКЕ**

---

56. Na Novoportovskom mestorozhdenii zapushchena vetro-solnechnaya elektrostantsiya [Wind and solar power plant launched at the Novoportovskoye field]. (In Russ.). Available at: <https://teknoblog.ru/2017/06/08/78927?ysclid=lehrjh3er1496289979> (accessed 16 January 2023).
57. Makarova I., Gubacheva L., Makarov D., Buyvol P. Economic and environmental aspects of the development possibilities for the northern sea route. *Transportation Research Procedia*, 2021, vol. 57, pp. 347–355. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.060.
58. Sevmorput' mozhet radikal'no snizit' vybrosy parnikovyykh gazov v Arktike [The Northern Sea Route can radically reduce greenhouse gas emissions in the Arctic]. (In Russ.). Available at: <https://www.skolkovo.ru/expert-opinions/sevmorput-mozhet-radikalno-snizit-vybrosy-parnikovyykh-gazov-v-arktike/> (accessed 12 February 2023).
59. Logvina E., Matveeva, T., Bochkarev A., Semenova, A. A., Nazarova O. Analiz tekhnologicheskikh i tekhnicheskikh dostizhenii v oblasti izucheniya subakval'nykh gazovykh gidratov i vozmozhnost' ikh primeneniya v arkticheskikh moryakh Rossii [Analysis of technological and technical advances in the study of subaqueous gas hydrates and the possibility of their application in the Arctic seas of Russia]. *Arctic: Ecology and Economy*, 2020, no. 4 (40), pp. 66–76. (In Russ.). DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-66-76.
60. Giustiniani M., Tinivella U., Jakobsson M., Rebesco M. Arctic Ocean Gas Hydrate Stability in a Changing Climate. *Journal of Geological Research*, 2013, vol. 2013, 783969. DOI: 10.1155/2013/783969.

**Об авторах:**

**Д. М. Дмитриева** — канд. экон. наук, научный сотрудник;

**Д. О. Скобелев** — докт. экон. наук, директор.

**About the authors:**

**D. M. Dmitrieva** — PhD (Economics), Researcher;

**D. O. Skobelev** — DSc (Economics), Director.

Статья поступила в редакцию 14 марта 2023 года.

Статья принята к публикации 19 апреля 2023 года.

The article was submitted on March 14, 2023.

Accepted for publication on April 19, 2023.