



МЕХАНИЗМЫ И ВАРИАНТЫ УТИЛИЗАЦИИ И ЗАХОРОНЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В НЕДРАХ

А.В. ОСИПОВ^{1,*}, Р.Н. МУСТАЕВ², А.С. МОНАКОВА¹, Л.И. БОНДАРЕВА¹, К.И. ДАНЦОВА¹

¹ ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»
65, корп. 1, Ленинский просп., г. Москва 119991, Россия

² ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Для снижения долгосрочных последствий глобального потепления в качестве одной из ключевых технологий рассматривается технология улавливания, транспортировки и утилизации и (или) захоронения углекислого газа. Российская Федерация является одним из лидеров по эмиссии углекислого газа. Вместе с тем, обладая значительным потенциалом в области захоронения CO₂ в недрах, к настоящему времени промышленные проекты улавливания, транспортировки и утилизации и (или) захоронения CO₂ в Российской Федерации отсутствуют. **Цель.** Изучение механизмов удержания и особенностей захоронения углекислого газа в различных геологических формациях.

Материалы и методы. На основании анализа обширного материала подготовлен обзор существующих вариантов утилизации и хранения диоксида углерода в недрах.

Результаты. Захоронение CO₂ предполагает его закачку в пласты горных пород, которые способны к его поглощению и долгосрочному безопасному удержанию. Рассмотрены различные варианты захоронения углекислого газа в недрах. Основные из них — это пласты истощенных залежей углеводородного сырья и минерализованные водоносные горизонты. Также хранение углекислого газа может осуществляться в неразрабатываемых угольных пластах, соленосных и базальтовых формациях. Описаны основные механизмы удержания, необходимые геологические условия и характеристики потенциальных резервуаров. Проанализированы риски и неопределенности захоронения в различных геологических формациях. Приведены примеры наиболее значимых мировых проектов по утилизации и захоронению CO₂ в недрах, такие как Слейпнер в Норвегии, Ин-Салах в Алжире и др. Освещено, что потенциал России в области утилизации и (или) захоронения углекислого газа в недрах достаточно высок, однако оценен не в полной мере.

Заключение. В настоящее время наиболее изученными и апробированными вариантами утилизации и хранения углекислого газа в недрах являются: использование диоксида углерода в качестве агента в методах увеличения нефтеотдачи, хранение CO₂ в пластах выработанных залежей углеводородного сырья и в минерализованных водоносных горизонтах.

Для развития в Российской Федерации проектов по утилизации и (или) захоронению углекислого газа в недрах необходимо сосредоточение усилий на целенаправленном геологическом изучении различных условий хранения углекислого газа, а также разработка на законодательном уровне единых требований к геологическим параметрам подземных хранилищ CO₂.

Ключевые слова: CCUS, декарбонизация, недра, резервуар, увеличение нефтеотдачи, углекислый газ, утилизация, хранение CO₂

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Осипов А.В., Мустаев Р.Н., Монакова А.С., Бондарева Л.И., Данцова К.И. Механизмы и варианты утилизации и захоронения углекислого газа в недрах. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2022;64(4):40—53.
<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-4-40-53>

Статья поступила в редакцию 13.07.2022
Принята к публикации 11.08.2022
Опубликована 14.11.2022

* Автор, ответственный за переписку

MECHANISMS AND OPTIONS OF THE UTILIZATION AND BURIAL OF CARBON DIOXIDE IN THE EARTH INTERIOR

ALEXANDER V. OSIPOV^{1,*}, RUSTAM N. MUSTAEV², ALEXANDRA S. MONAKOVA¹,
LIANA I. BONDAREVA¹, KRISTINA I. DANTSOVA¹

¹ Gubkin University

65, bldg. 1, Leninsky ave., Moscow 119991, Russia

² Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

ABSTRACT

Background. One of the key approaches to reducing the long-term effects of global warming consists in capturing, transporting and disposing and/or burial of carbon dioxide.

The Russian Federation is one of the leaders in carbon dioxide emissions. At the same time, having great potential in the field of CO₂ burial in the subsoil, there are currently no industrial projects for capturing, transporting and utilizing and (or) storing CO₂.

Aim. To study of the retention mechanisms and burial features of carbon dioxide within various geological formations.

Materials and methods. Based on the analysis of extensive material, a review of existing options for the utilization and storage of carbon dioxide in the bowels has been prepared.

Results. Burial assumes CO₂ injection into rock layers, which are capable of its absorption and safe long-term retention. Various options for the burial of carbon dioxide in the Earth interior are considered. The main ones are layers of depleted hydrocarbon deposits and mineralized aquifers. Also, carbon dioxide storage can be carried out in undeveloped coal seams, saline and basalt formations. The basic mechanisms of retention, necessary geological conditions and characteristics of potential reservoirs are described. The risks and uncertainties of burial in various geological formations are analyzed. Examples of the world's most significant projects for the utilization and disposal of CO₂ in the Earth interior are given. Such as Sleipner in Norway, In-Salah in Algeria, etc. It is indicated that the potential of Russia in the field of utilization and (or) disposal of carbon dioxide in the bowels is quite high, but it has not been fully assessed.

Conclusion. At present, the most studied and tested options for the utilization and storage of carbon dioxide in the Earth interior are as follows: the use of carbon dioxide as an agent in the methods of enhanced oil recovery, the storage of CO₂ in the strata of depleted deposits of hydrocarbon raw materials and in mineralized aquifers.

It is necessary to concentrate efforts on a purposeful geological study of various conditions for storing carbon dioxide in the Russian Earth interior, as well as on the development of uniform requirements for the geological parameters of CO₂ underground storage facilities.

Keywords: CCUS, decarbonization, Earth interior, reservoir, enhanced oil recovery, carbon dioxide, utilization, CO₂ storage

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Funding: no financial support was provided for this study.

For citation: Osipov A.V., Mustaev R.N., Monakova A.S., Bondareva L.I., Dantsova K.I. Mechanisms and options of the utilization and burial of carbon dioxide in the earth interior. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2022;64(4):40—53. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-4-40-53>

Изменение климата представляет собой актуальную и потенциально необратимую угрозу для человечества [11]. В знак признания этого подавляющее большинство стран мира, включая Российскую Федерацию, приняли Парижское соглашение от 12.12.2015, главная цель которого заключается в концентрации усилий по ограничению глобального повышения температуры. Смягчение последствий глобального потепления может быть достигнуто в том числе сокращением и предотвращением выбросов парниковых газов (прежде всего углекислого газа), а также увеличением объемов их поглощения.

Текущие суммарные мировые объемы выбросов углекислого газа составляют порядка 32 млрд т [2, 3, 17]. При этом на долю стран-лидеров — Китая, США, Индии, России и Японии — приходится около 60% общемировой эмиссии CO₂ (рис. 1).

Краткий обзор технологий улавливания, транспортировки, утилизации и (или) захоронения углекислого газа

В настоящее время в качестве одной из ключевых для смягчения последствий глобального потепления рассматривается технология улавливания, транспортировки, утилизации и (или) за-

хоронения углекислого газа (CCUS — Carbon Capture, Utilization and Storage) [10, 19, 23]. Таким образом, технология CCUS может служить двум основным целям: предотвращению попадания новых объемов CO₂ в атмосферу или удалению ранее произошедших выбросов.

Технологическая цепочка проектов CCUS включает ряд процессов.

Улавливание углекислого газа — процесс поимки CO₂ из техногенного источника. Это самая капиталоемкая часть проектов CCUS. Существующие на текущий момент технологии улавливания можно разделить на три категории.

- Улавливание до сжигания. Происходит предварительная конвертация топлива в газообразную смесь водорода и диоксида углерода. После этого CO₂ отделяется от водорода на основе физической адсорбции.

- Улавливание после сжигания. Происходит с помощью разделения дымовых газов на составляющие. Углекислый газ улавливается с помощью механических сепараторов и жидких растворителей (химическая адсорбция).

- Улавливание при сжигании в чистом кислороде. Происходит образование газовой смеси из водяного пара и CO₂, который можно отделить

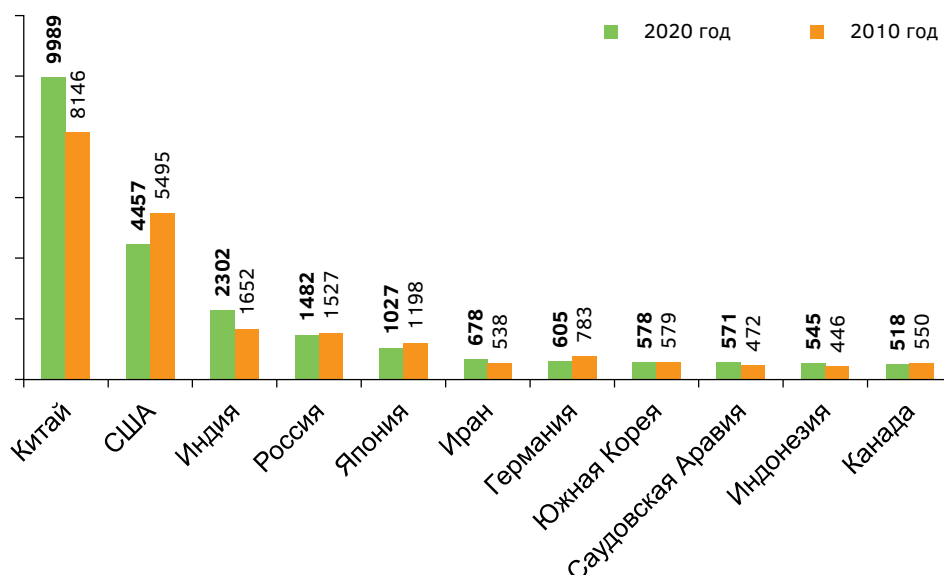


Рис. 1. Распределение глобальной эмиссии CO₂ по странам в 2010 и 2020 годах, млн т [17]

Fig. 1. Distribution of global CO₂ emissions by countries in 2010 and 2020, million tons [17]

посредством охлаждения и компрессии газового потока.

Транспортировка диоксида углерода во многом схожа с перемещением природного газа. Перед транспортировкой требуется осушка CO_2 в целях предотвращения коррозии и гидратообразования и избегания расходов, связанных со строительством трубопроводов из коррозионно-стойкого материала.

В качестве основного вида транспортировки существенных объемов углекислого газа рассматривается трубопроводный транспорт. На текущий момент протяженность трубопроводов непосредственно для CO_2 в мире составляет порядка 7 тыс. км, в то время как предполагаемая протяженность трубопроводов для выполнения плана развития технологий CCUS только в Европе должна составить около 18 тыс. км [23]. Для экономически эффективного использования пропускной способности трубопроводов CO_2 сжимается до сверхкритического состояния, что придает ему плотность жидкости одновременно с вязкостью газа и облегчает прохождение по трубопроводам.

Кроме трубопроводного транспорта, для транспортировки углекислого газа могут быть использованы суда-газовозы, что особенно актуально для прибрежных регионов, а также авто- и ЖД-цистерны для небольших объемов перевозок.

По мере увеличения количества проектов CCUS будет расти спрос на разветвленную газотранспортную сеть, представляющую собой комбинацию всех вышеуказанных видов транспорта. Для оптимизации системы сбора и захоронения (утилизации) диоксида углерода важное значение будет иметь организация так называемых кластеров и хабов CO_2 , в которых выбросы из нескольких источников будут объединяться и совместно транспортироваться к общему хранилищу. Подобное распределение транспортных расходов между несколькими источниками выбросов приведет к экономии средств за счет масштаба.

Геологическое хранение предполагает закачку CO_2 в пласты горных пород, которые способны к его поглощению и долгосрочному безопасному удержанию. Подходящие для этих целей породы находятся в осадочных бассейнах, повсеместно распространенных по земному шару. Непосредственно в качестве естественных хранилищ углекислого газа в недрах рассматриваются пласты горных пород выработанных месторождений углеводородного сырья, высокоминерализованные

водоносные горизонты, а также базальтовые и соленосные породы и неразрабатываемые угольные пласты.

Наиболее типичное и наиболее коммерчески успешное применение уловленного углекислого газа в настоящее время — это использование CO_2 в качестве агента для увеличения нефтеотдачи. В целом же сферы применения диоксида углерода достаточно обширны и их можно разделить на 3 основные области:

- химическое использование (сферы применения — производство химических веществ, удобрений, продуктов питания и др.);
- «минерализация» (производство строительных материалов и др.);
- биологическое использование (стимулирование роста растений).

Механизмы и варианты хранения углекислого газа в недрах

В основе удержания CO_2 в недрах лежат четыре основных механизма (рис. 2) [21].

1. Структурное удержание, обусловленное наличием геологической ловушки. Углекислый газ, закачанный в пласт-коллектор ловушки, остается неподвижным и физически не способен мигрировать за его пределы из-за наличия непроницаемой преграды (породы-покрышки, экранирующего разлома и др.).

2. Гидродинамическое удержание за счет капиллярных сил в поровом пространстве породы-коллектора.

3. Удержание путем растворения CO_2 в пластовых водах, в результате которого нейтрализуются агрессивные свойства закачиваемого газа.

4. Минеральное удержание за счет химического взаимодействия с вмещающими горными породами и флюидами с образованием твердого осадка или водных растворов. В результате углекислый газ полностью преобразуется и перестает существовать в своем первоначальном составе.

Относительная важность указанных механизмов удержания CO_2 зависит непосредственно от потенциального хранилища. При этом механизмы действуют не одновременно, а последовательно в течение продолжительных периодов времени. Поэтому на этапе закачки преобладает физическое удержание углекислого газа, которое в итоге переходит в минеральное удержание за счет химических реакций. Подобная совокупность создает комбинированный эффект, благодаря которому различные механизмы удержания, как правило, увеличивают долю неподвижного CO_2 .

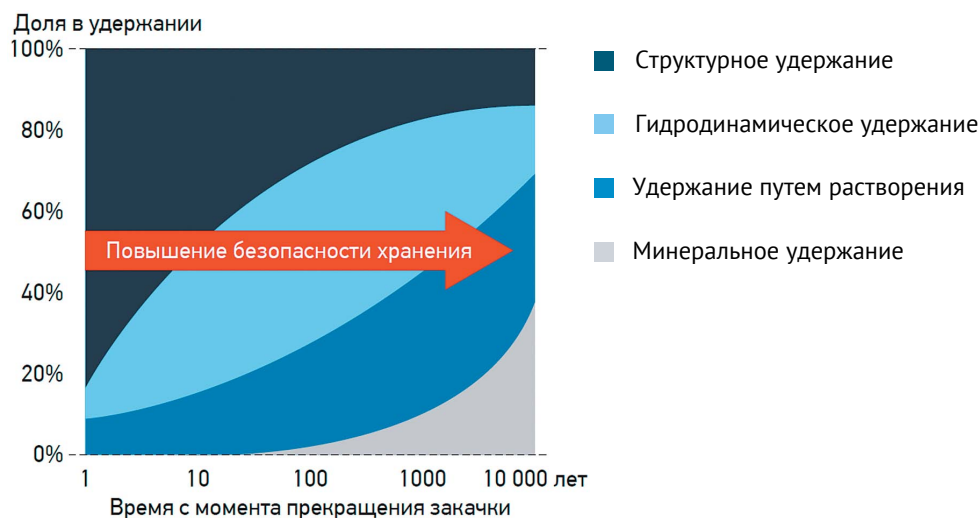


Рис. 2. Вклад механизмов удержания CO_2 в недрах в зависимости от времени [23]
Fig. 2. Contribution of the mechanisms of CO_2 retention in the subsoil as a function of time [23]

К геологическим условиям и характеристикам резервуаров для хранения углекислого газа должны предъявляться особые требования по обеспечению долгосрочного безопасного хранения CO_2 . Должны быть исключены утечки углекислого газа, в том числе в целях обеспечения безопасности подземных источников питьевого водоснабжения, а также его выходы на поверхность. В связи с этим потенциальные геологические объекты для захоронения диоксида углерода должны оцениваться по следующим основным критериям:

- соответствие рассматриваемого потенциального пласта горных пород условиям долгосрочного удержания и невысвобождения закачанного углекислого газа;
- степень воздействия кислых компонентов на рассматриваемые горные породы и насыщающие их флюиды с целью защиты минеральных ресурсов и пластовых вод.

К настоящему времени, как уже упоминалось, в качестве основных вариантов хранилищ углекислого газа рассматриваются пласты истощенных залежей углеводородного сырья и минерализованные водоносные горизонты.

Хранение в пластах выработанных залежей углеводородов. Продуктивные пласты истощенных залежей углеводородного сырья могут рассматриваться в качестве благоприятных объектов долгосрочного безопасного хранения CO_2 по ряду факторов. Во-первых, наличие ловушки и, в частности, эффективной породы-покрышки, способствовавшей сохранению залежи в течение геологических периодов. Во-вторых, высокие фильтрационно-емкостные свойства продуктивных пластов,

обеспечивавшие естественное накопление и хранение углеводородов и последующую их добычу. Они позволяют осуществлять эффективную закачку углекислого газа в пласт. Третий аспект заключается в том, что в ходе разведки и освоения месторождения углеводородного сырья накапливается значительный объем подробных сведений о геологической структуре, свойствах пород-коллекторов и герметичности пород-покрышек. Это существенно снижает неопределенность поведения закачанного CO_2 в пласте.

Вместе с тем закачка агрессивного углекислого газа в пласты выработанных месторождений нефти и газа ставит задачи ликвидации существующих скважин, оценки риска коррозии металлов и деградации цемента, оборудования с последующими возможными утечками [5].

Хранение в минерализованных водоносных пластах. Водоносные пласты могут рассматриваться как объекты для хранения CO_2 , если они отвечают следующим основным требованиям: достаточная для поглощения углекислого газа пористость и проницаемость пласта; наличие перекрывающей водоносный горизонт флюидоупорной породы, способной препятствовать рассеиванию диоксида углерода; значительные мощность и laterальное распространение вмещающего пласта для хранения больших объемов CO_2 ; достаточная для обеспечения безопасного хранения глубина залегания пласта (более 800 м — на таких глубинах, в условиях повышенных термобарических условий, углекислый газ переходит в жидкое или сверхкритическое состояние с относительно высокой плотностью).

Некоторым сдерживающим фактором развития этого варианта хранения углекислого газа является необходимость проведения дополнительного детального геологического изучения потенциальных хранилищ.

Помимо указанных основных вариантов, хранение углекислого газа также может осуществляться в неразрабатываемых угольных пластах, соленосных и базальтовых формациях.

Хранение в неразрабатываемых угольных пластах. Как правило, угольные месторождения разрабатываются до глубины порядка 1500 м, поэтому относительно глубокозалегающие угольные пласты могут рассматриваться в качестве хранилищ для CO_2 . Углекислый газ после закачки в угольный пласт в результате адсорбции прочно связывается с поверхностью угольной матрицы.

В случае захоронения CO_2 в угольные пласты присутствует еще один дополнительный стимул. По мере того как углекислый газ адсорбируется на поверхности угольной матрицы, изначально связанный с угольным пластом метан десорбируется и высвобождается и, следовательно, может быть извлечен. Такой процесс извлечения метана из угольных пластов, к примеру, используется в бассейне Сан-Хуан в США [6].

Важнейшим критерием осуществимости подобного варианта хранения является проницаемость угольных пластов, которая определяет, сможет ли закачиваемый диоксид углерода охватить большие площади угольной матрицы. Пласты, которые залегают относительно глубоко для добычи, зачастую сильно уплотнены и обладают низкой проницаемостью, чтобы обеспечить возможность эффективной закачки CO_2 . Кроме того, существует риск разбухания угольных пластов при закачке углекислого газа, что значительно снижает их проницаемость.

Хранение в соляных кавернах. Пустоты в отложениях каменной соли могут рассматриваться в качестве потенциальных объектов хранения CO_2 поскольку каменная соль характеризуется значительной устойчивостью во времени, имеет практически ничтожную проницаемость, низкое содержание влаги и склонность к пластическому течению, что приводит к быстрому устранению образующихся дефектов (трещин).

При этом для долгосрочного безопасного хранения углекислого газа каменная соль не должна содержать прослоев легкорастворимых калийных и магниевых солей. Кроме того, такие хранилища, как правило, будут относительно менее емкими и сами пласты каменных солей имеют

ограниченное распространение в осадочных бассейнах по миру.

Хранение в базальтовых формациях. Обладая различными фильтрационно-емкостными свойствами, базальт является высокоактивным в химическом отношении к углекислому газу, что в итоге приводит к образованию карбонатных пород. Базальтовые формации, встречающиеся во многих регионах мира, могут рассматриваться в качестве варианта захоронения диоксида углерода, в особенности в районах без подходящего осадочного выполнения.

Утилизация углекислого газа в рамках операций по увеличению нефтеотдачи

Помимо непосредственно захоронения углекислого газа в недрах, широко используемым процессом в нефтедобывающем секторе является закачка CO_2 в пласты горных пород, содержащих нефтяные залежи, с целью увеличения нефтеотдачи. Почти половина всех существующих проектов по использованию методов увеличения нефтеотдачи в мире — это закачка углекислого газа [23]. При этом по окончании эксплуатации объекта практически весь закачанный углекислый газ остается в пласте. Часть закачанного CO_2 , которая прорывается в добывающую скважину вместе с нефтью, отделяется от нее, компримируется и затем вновь закачивается в пласт. Такая цикличность минимизирует утечки углекислого газа при добыче нефти.

Показателем эффективности закачки является достижение смесимости диоксида углерода с нефтью. При смешивающемся вытеснении практически исчезает граница раздела фаз между углекислым газом как вытесняющим агентом и нефтью, что увеличивает текущую добычу и повышает коэффициент извлечения. Примечательно, что в реальных проектах при закачке CO_2 наблюдается снижение охвата пласта-коллектора на 20—30% по сравнению с заводнением, но данное падение компенсируется лучшими вытесняющими свойствами диоксида углерода [23].

Вместе с тем следует отметить, что не все нефтяные месторождения подходят для применения методов увеличения нефтеотдачи с использованием углекислого газа. Это зависит от свойств пород-коллекторов и насыщающих их нефтей.

Кроме того, углекислый газ как высококоррозионный агент по отношению к добычному оборудованию и оборудованию системы сбора предъявляет особые требования к материалам оборудования, требует регулярного мониторинга

состояния оборудования и применения ингибиторов коррозии.

Закачка углекислого газа в нефтесодержащий пласт для целей увеличения нефтеотдачи может осуществляться в нескольких вариантах [16].

- Закачка в пласт карбонизированной воды. При растворении диоксида углерода в воде вязкость воды увеличивается незначительно, а образующаяся при этом угольная кислота (H_2CO_3) растворяет некоторые виды цементов и породы пласта, увеличивая проницаемость. Согласно результатам лабораторных исследований проницаемость песчаников может вырасти на 5—15%, а доломитов на 6—75%.

- Закачка в пласт непосредственно CO_2 в газообразном или жидком состоянии. При растворении углекислого газа в нефти ее вязкость уменьшается, следовательно, уменьшается поверхностное натяжение нефти на границе с водой. Также углекислый газ способен увеличить объем нефти при растворении в ней, что позволяет существенно увеличить нефтеотдачу.

- Закачка в пласт углекислого газа в сверхкритическом состоянии. В данном состоянии CO_2 является растворителем. Растворяющая способность углекислого газа в сверхкритическом состоянии возрастает при увеличении давления. По сравнению с другими газами CO_2 легко переходит в сверхкритическое состояние (при $P = 73,8$ МПа и $t = 31,1$ °C).

Краткий глобальный обзор проектов улавливания, транспортировки и утилизации и (или) захоронения углекислого газа

Количество проектов CCUS в мире в последние годы быстро растет. К настоящему моменту в эксплуатации находятся 29 таких проектов (табл., рис. 3), 20 из которых были запущены в последние два года. Тем не менее существующие в мире мощности проектов CCUS (суммарно порядка 40 млн т CO_2 в год) позволяют осуществлять улавливание

всего лишь немногим более 0,12% от глобальных выбросов диоксида углерода.

Более половины действующих проектов CCUS приурочено к Северной Америке, большинство из них находятся в США. Это связано в том числе с благоприятной государственной политикой развития проектов улавливания, утилизации и (или) захоронения CO_2 , включая налоговое стимулирование. В целом следует отметить, что большинство действующих в мире проектов — это проекты с прямым государственным участием или стимулированием.

Притом что основной объем (~70%) глобальных выбросов диоксида углерода приходится на электро- и теплогенерацию и транспорт [20], мощности действующих проектов улавливания, утилизации и (или) захоронения углекислого газа в значительной степени приурочены к газовой отрасли, и в частности сконцентрированы на заводах по переработке природного газа, а также к производству удобрений. Это связано с тем, что эти отрасли имеют самые низкие затраты на улавливание, поскольку они обычно генерируют чистый поток CO_2 , который удаляется как часть производственного процесса. Вместе с тем CCUS начинает применяться в более широком спектре отраслей, где стоимость улавливания диоксида углерода выше из-за более низкой его концентрации в дымовых газах, к примеру в таких, как производство цемента и стали, а также производство электроэнергии.

Крупнейшим по подземному хранению CO_2 является проект Слейпнер (Sleipner) в Норвегии (Северное море) (рис. 4) [13, 18, 22]. Это первый коммерческий проект (действует с 1996 года), связанный с захоронением углекислого газа. В качестве хранилища углекислого газа используется водоносный песчаный пласт формации Утсира (Utsira), залегающий на глубине 800—1000 м от поверхности морского дна. Толщина коллектора в среднем составляет 200 м. Покрышкой

Таблица. Распределение производств по улавливанию, утилизации и хранению CO_2 по регионам, 2022 г. [20]
Table. Distribution of carbon capture, utilization and storage by regions, 2022 [20]

Регион	Действующие	В разработке	Приостановленные	Всего по региону
Северная Америка	16	80	2	98
Китай	4	3		7
Европа	4	46		50
Персидский залив	3	1		4
Остальной мир	2	11		13
ИТОГО	29	141	2	172

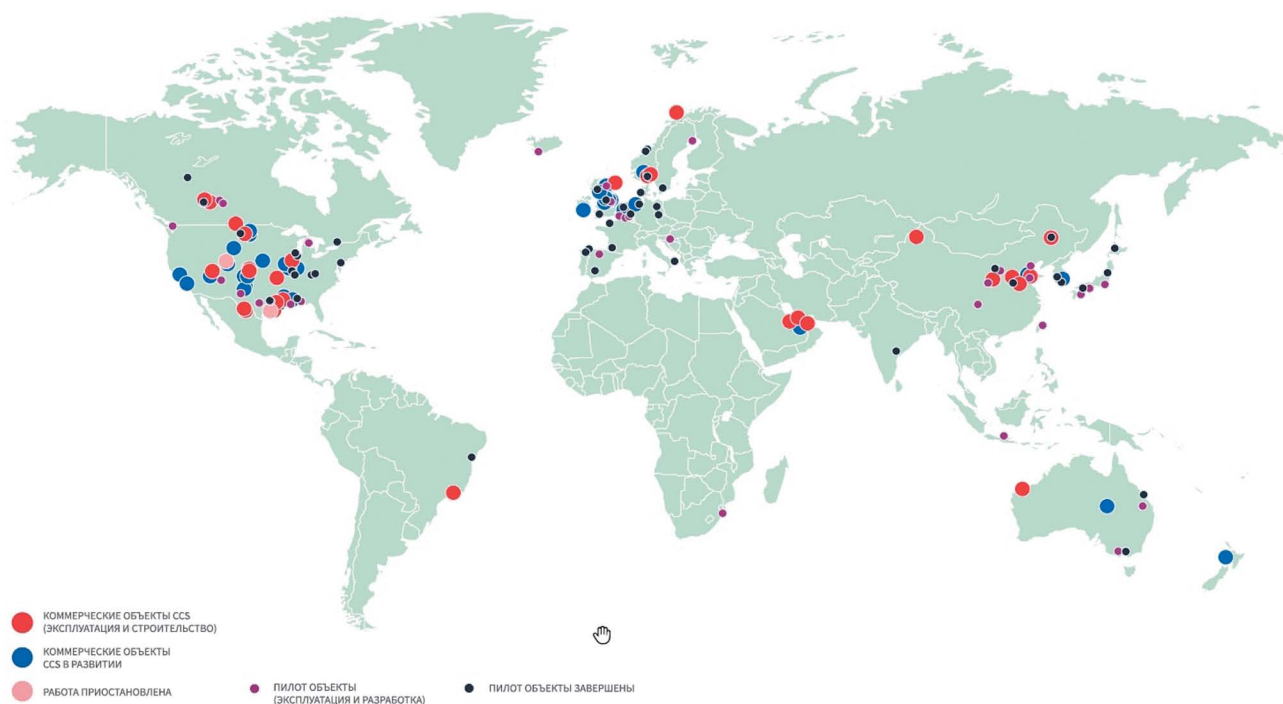


Рис. 3. Распределение проектов CCUS на различных стадиях развития по странам, 2021 г. [6]
Fig. 3. Distribution of CCUS projects at various stages of development by country, 2021 [6]

служит мощный слой аргиллитов. С 1996 года здесь ежегодно закачивается до 1 млн т диоксида углерода. Общая площадь этого хранилища составляет примерно 26 тыс км². Расчетный объем пласта предполагает возможность закачки более 42 млн т CO₂. Мониторинг распределения и хранения углекислого газа отслеживается с помощью регулярно повторяющейся трехмерной сейсморазведки.

Проект Ин-Салах (In Salah), расположенный в Алжире в центральной части Сахары, является первым в мире крупномасштабным проектом по захоронению CO₂ в газоносном пласте [22]. На месторождении Кречба (Krechba) осуществляется добыча углеводородного газа с содержанием CO₂ до 10%. Выделенный углекислый газ с помощью трех нагнетательных скважин, в том числе горизонтальных, повторно закачивается в пласт песчаника на глубине 1800 м (рис. 5). Покрышкой является мощная, до 950 м, толща аргиллитов. Проект, стартовавший в 2004 году, предусматривает закачку до 1,2 млн т диоксида углерода ежегодно. Всего в течение срока реализации проекта предполагается закачать 17 млн т CO₂.

Одним из значимых проектов CCUS, включающих в том числе захоронение CO₂ в недрах, является Баундари Дам (Boundary Dam) в Канаде [14, 22]. Он сочетает улавливание углекислого газа после

сжигания с выработкой электроэнергии на угольной электростанции Boundary Dam Power Station, захоронение CO₂ в недрах в рамках проекта Aquistore, а также закачку CO₂ с целью увеличения нефтеотдачи на нефтяном месторождении Вейбурн (Weyburn). Объем улавливаемого CO₂ проекта составляет 1 млн т ежегодно. Часть углекислого газа (10%) направляется на экспериментальный проект Aquistore в 2 км от электростанции. Указанный проект нацелен на мониторинг хранения CO₂ для проверки гипотезы о том, что хранение углекислого газа в водонасыщенном песчанике на глубине 3,4 км является безопасным и эффективным решением по сокращению и поглощению выбросов парниковых газов. Другая часть (90%) диоксида углерода подвергается сжатию и транспортировке по трубопроводу длиной 66 км на месторождение Вейбурн. Продуктивный пласт, в который осуществляется закачка, сложен трещиноватыми известняками мощностью 20—25 м. Покрышкой являются ангидриты. Предполагаемый объем хранения на месторождении составляет 20 млн т CO₂.

Инновационным проектом является Орка (Orca) в Исландии [20]. Это крупнейшая в мире установка, работающая на геотермальной электростанции Хеллишейди (Hellisheiði Geothermal Plant) и удаляющая углекислый газ из атмосферы. При работе на полную мощность завод будет ежегодно удалять

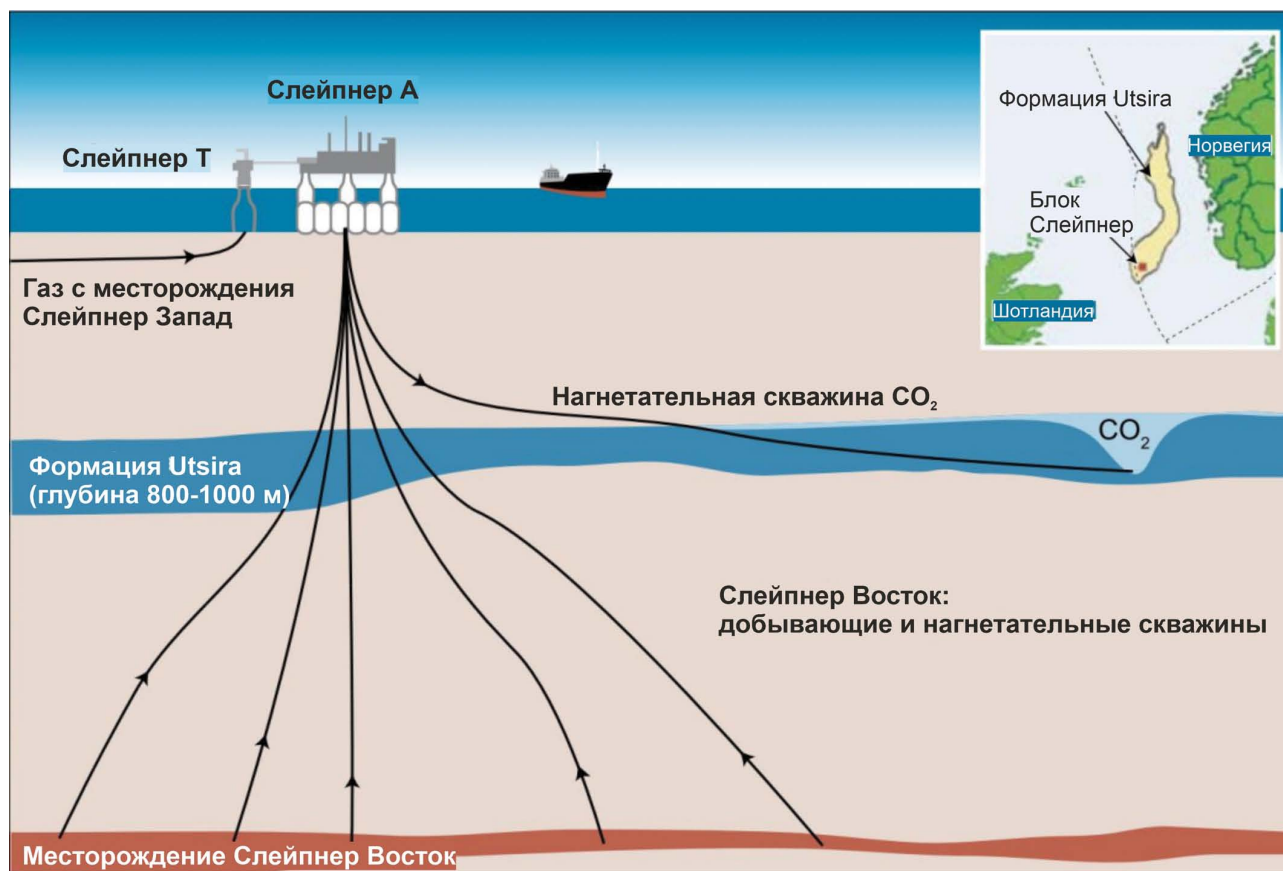


Рис. 4. Схема проекта хранения углекислого газа Слейпнер (Sleipner) в Норвегии [22]

Fig. 4. Scheme of the Sleipner carbon dioxide storage project in Norway [22]

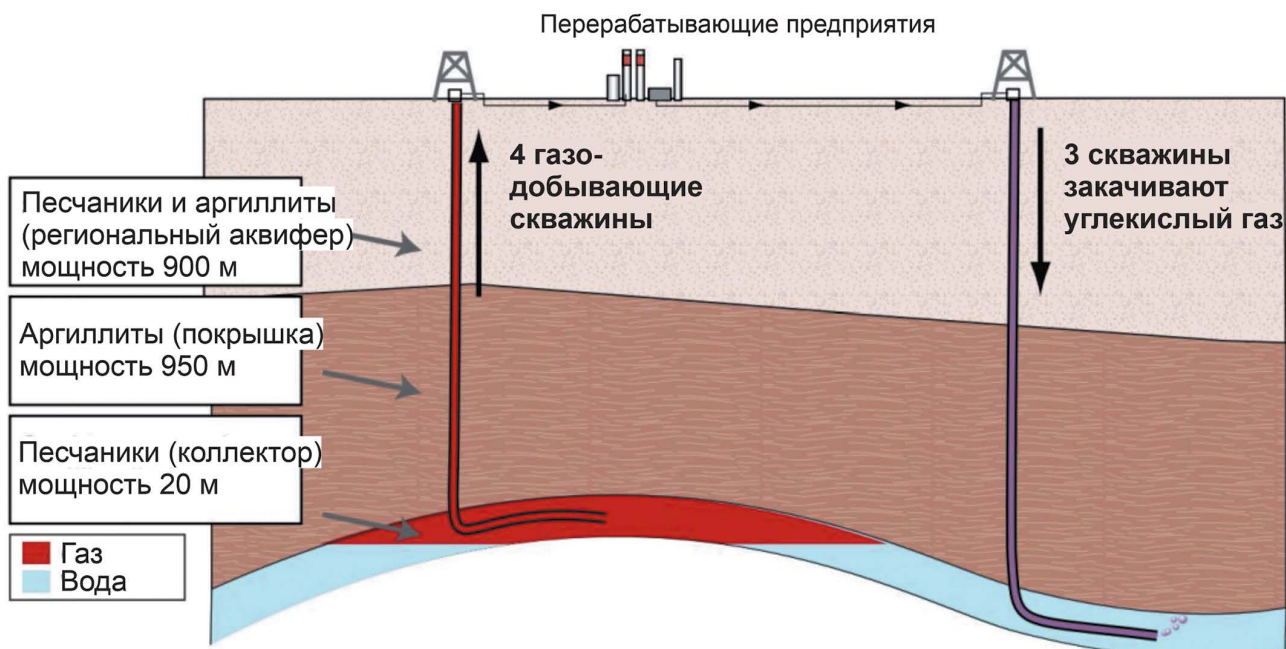


Рис. 5. Схема проекта хранения углекислого газа Ин-Салах (In Salah) в Алжире [22]

Fig. 5. Scheme of the In Salah carbon dioxide storage project in Algeria [22]

из воздуха 4 тыс. т углекислого газа. Орка втягивает большое количество воздуха с помощью вентиляторов, приводя воздух в контакт с химическими веществами, которые могут выборочно удалять CO_2 , одновременно выделяя азот, кислород и другие газы обратно в атмосферу. Затем обогащенные углеродом химикаты нагревают примерно до 100°C , чтобы выделить CO_2 в виде чистого газа. Установка смешивает газ с водой и закачивает его глубоко в недра в базальтовые породы. Растворенный CO_2 кристаллизуется в твердый минерал примерно за два года, навсегда удаляясь из атмосферы.

Перспективы развития проектов захоронения углекислого газа в России

Россия является одним из лидеров по объемам эмиссии диоксида углерода. По оценкам [2, 23] суммарные выбросы углекислого газа составляют порядка 1,5—1,7 млрд т ежегодно. Формирование эмиссии CO_2 происходит в основном за счет выбросов в сферах электроэнергетики и теплоснабжения, транспорта и металлургии (суммарно порядка 87%) [1].

Доля нефтегазового сектора от общего количества выбросов составляет порядка 5%. При этом накопленный опыт работы с газами (транспортировка, подземное хранение и др.), в том числе с кислыми, доступ к обширной геологической информации создают нефтегазовой отрасли глобальное преимущество для раскрытия потенциала Российской Федерации в вопросах захоронения CO_2 в недрах.

Учитывая богатство недр и разнообразие геологических условий, потенциал России в части

утилизации и захоронения диоксида углерода в недрах очень высок (рис. 6 и 7) [5, 7, 15, 23], но оценен не в полной мере. Недостаточно информации о местонахождении, пригодности и фактических объемах потенциальных хранилищ для углекислого газа. Проработка указанных вопросов позволит оценить суммарный потенциал Российской Федерации в области захоронения CO_2 , выработать стратегию развития и в итоге вывести страну в лидеры в этой отрасли.

По предварительным оценкам [5, 9, 15, 23], наиболее подходящие локации для создания проектов утилизации и хранения CO_2 в недрах Российской Федерации расположены в традиционных нефтегазодобывающих регионах, таких как Урало-Поволжье, Западная Сибирь и др. Одним из приоритетных регионов для реализации первого проекта CCUS в России может рассматриваться Оренбургская область. С одной стороны, на территории области сконцентрированы промышленные предприятия с крупнотоннажной эмиссией CO_2 энергетических, металлургических и нефтегазохимических отраслей. С другой стороны, регион обладает значительным потенциалом для утилизации и хранения значительных объемов углекислого газа в недрах. Таким образом, создание первого российского кластера CCUS возможно на базе нефтегазодобывающих компаний и предприятий-эмитентов, что обеспечит взаимодействие нефтегазодобывающей, металлургической, нефтеперерабатывающей и химической отраслей, которое позволит достичь синергетического эффекта в рамках климатической повестки в масштабах региона и снизить инвестиционные издержки.

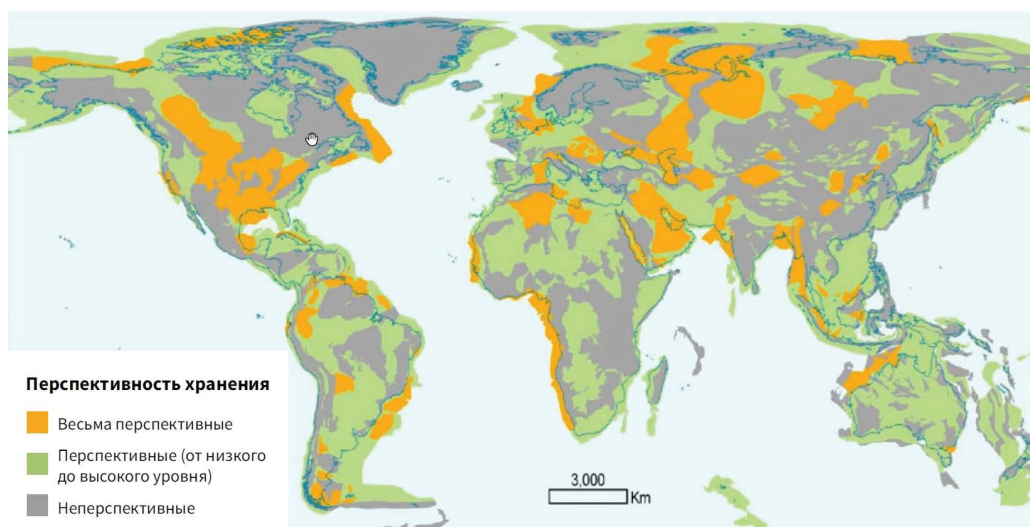


Рис. 6. Потенциал хранения углекислого газа [7]

Fig. 6. Carbon dioxide storage potential [7]

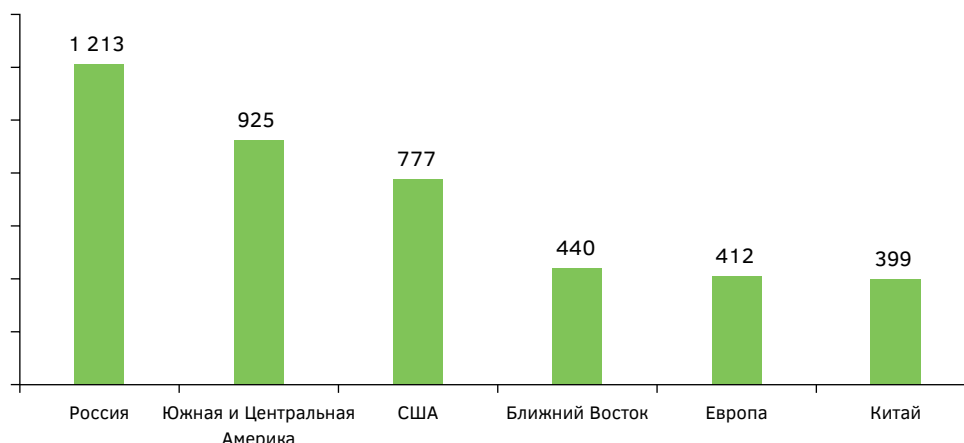


Рис. 7. Теоретический потенциал захоронения углекислого газа по регионам в осадочных бассейнах (залежи нефти и газа, водоносные горизонты и др.), млрд т [23]

Fig. 7. Theoretical potential of carbon dioxide storage by regions in sedimentary basins (oil and gas deposits, aquifers, etc.), billion tons [23]

В связи с вышеизложенным актуальными вопросами развития новой для нашей страны отрасли являются целенаправленное геологическое изучение различных условий хранения углекислого газа в недрах и выработка единых нормативных требований к геологическим параметрам подземных хранилищ диоксида углерода. Кроме этого, важной является проработка вопросов долгосрочной ответственности, связанной с осуществлением непрерывного геологического мониторинга возможных утечек CO_2 , в том числе с использованием методов дистанционного зондирования [4, 8].

Выводы

1. Достижение глобальных целей декарбонизации экономики невозможно без реализации проектов улавливания, транспортировки и утилизации и (или) захоронения углекислого газа. Одним из наиболее важных факторов успешной реализации подобных проектов является наличие геологических объектов для безопасного длительного хранения CO_2 .

2. Основные механизмы удержания CO_2 в пластах горных пород действуют последовательно в течение длительного времени. При этом структурное и гидродинамическое удержание являются наиболее важными факторами, способствующими сохранению углекислого газа в пласте с начала процесса его закачки. Поэтому наличие указанных факторов в потенциальном объекте закачки определяет преимущество рассматриваемого хранилища.

3. В настоящее время наиболее изученными и апробированными вариантами утилизации

и хранения углекислого газа в недрах являются использование диоксида углерода в качестве агента в методах увеличения нефтеотдачи, хранение CO_2 в пластах выработанных залежей углеводородного сырья и в минерализованных водоносных горизонтах. Кроме этого, хранение углекислого газа возможно в неразрабатываемых угольных пластах, соленосных и базальтовых формациях.

4. К геологическим условиям и характеристикам вмещающих CO_2 резервуаров должны предъявляться особые требования по обеспечению долгосрочного безопасного хранения, которое должно контролироваться посредством непрерывного геологического мониторинга возможных утечек из хранилищ с последствиями для окружающей среды.

5. Несмотря на то что в России к настоящему времени промышленные проекты CCUS отсутствуют, потенциал страны в части утилизации и захоронения диоксида углерода в недрах достаточно высок, но оценен не в полной мере.

6. Российская Федерация обладает конкурентными преимуществами в области транспорта и хранения углекислого газа, поскольку имеет развитую нефтегазовую отрасль, которая готова реализовывать подобные проекты, обеспечивая надежность и безопасность для окружающей среды и человека.

7. Перспективы развития российских проектов CCUS на текущем этапе — зарождения и становления новой отрасли — в первую очередь будут зависеть от мер государственной поддержки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ВТБ Капитал*. Аналитические материалы «ESG и декарбонизация». Москва, 2021. 28 с.
2. *Высоцкий В.И.* Нефть, газ, возобновляемые источники энергии и выбросы двуокиси углерода (информационный обзор). Москва, 2021. 44 с.
3. *Высоцкий В.И.* Энергетический переход и его влияние на мировое потребление нефти и газа // Материалы Всероссийского совещания «Проблемы геологии нефти и газа». Москва: ФГБУ «ВНИГНИ», 2021. 8 с.
4. *Данцова К.И., Милосердова Л.В., Осипов А.В., Монакова А.С., Бондарева Л.И.* Мониторинг дегазации недр по материалам дистанционного зондирования // Нефтяное хозяйство. 2022. № 5. С. 48—51. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-5-48-51
5. *Дымочкина М.Г., Самодуров М.С., Павлов В.А., Пенигин А.В., Урмаев О.С.* Геологический потенциал улавливания и хранения диоксида углерода в Российской Федерации // Нефтяное хозяйство. 2021. № 12. С. 20—23.
6. *Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций*. Отчет «Геологическое хранение CO₂ в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии: первичный анализ потенциала и политики». Женева, 2021. 45 с.
7. *Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций*. Технологический обзор «Улавливание, использование и хранение углерода». Женева, 2021. 36 с.
8. *Керимов В.Ю., Мустаев Р.Н.* Дегазация Земли, антропогенные выбросы парниковых газов и условия захоронения углекислого газа // Научный форум «Углеродная дегазация и условия захоронения углекислого газа в недрах Земли». Москва: МГРИ, 2022. 42 с.
9. *Кнелъц А.* Отрасль CCUS в России: от государства ждут правила игры, сокращение рисков и финансирование. 2022. 14 с. URL: www.fuelsdigest.com
10. *Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК)*. Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов. Т. 2 «Энергетика», раздел 5. Транспортировка, впрыскивание и геологическое хранение CO₂. ИГЕС: Хаяма, 2006. 35 с.
11. *Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК)*. Специальный доклад «Глобальное потепление на 1,5 °C». Инчхон, 2019. 110 с.
12. *Молодцов К.В.* Парад углеводородов // Нефтегазовая вертикаль. 2022. № 1. С. 4—9.
13. *Соломон С.* Хранение углекислого газа: геологическая и экологическая безопасность — исследование на примере газового месторождения Слейпнер (Sleipner) в Норвегии. Осло: Фонд Беллона, 2007. 128 с.
14. *Центр энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО*. Декарбонизация нефтегазовой отрасли: международный опыт и приоритеты России. Москва, 2021. 158 с.
15. *Черепанов В.В., Трусков А.И., Балух С.А., Золотухин В.С., Рублев М.Е.* Выявление и предварительная оценка потенциальных геологических резервуаров на ЛУ ПАО «Газпром» Надым-Пур-Тазовского региона, пригодных для осуществления проектов хранения CO₂ // Недропользование XXI век. 2022. № 2(94), С. 58—71.
16. *Шпуров И.В.* Задачи ГКЗ в условиях энергоперевода и низкоуглеродной экономики // Материалы Всероссийского совещания «Проблемы геологии нефти и газа». Москва: ФГБУ «ВНИГНИ», 2021. 11 с.
17. *BP*. Statistical Review of World Energy. London, 2021. 72 p.
18. *Chadwick A., Arts R., Bernstone C. et al.* Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers. UK: British Geological Survey, 2008. 267 p.
19. *Global CCS Institute*. Report «Global Status of CCS 2020». Melbourne, 2020. 44 p.
20. *Gordon O.* Carbon capture: Where is it working? 2022. URL: www.power-technology.com/analysis/carbon-capture-where-is-it-working/
21. *Gunter W.D., Benson S., Bachu S.* The role of hydrogeological and geochemical trapping in sedimentary basins for secure geological storage for carbon dioxide // Geological Society, London, Special Publications. 2004. № 233, P. 129—145. DOI: 10.1144/GSL.SP.2004.233.01.09
22. *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. 442 p.
23. *YVGON Consulting*. CCUS: Монетизация выбросов CO₂. Москва, 2021. 48 с.

REFERENCES

1. VTB Capital. Analytical materials “ESG and decarbonization”. Moscow, 2021. 28 p. (In Russian).
2. Vysotskiy V.I. Oil, gas, energy sources and dioxide emissions (Informative review). Moscow, 2021. 44 p. (In Russian).
3. Vysotskiy V.I. Energy transition and its impact on world oil and gas consumption // Proceedings of the All-Russian agreement “Problems of oil and gas geology”. Moscow: FGBU “VNIIGNI”, 2021. 8 p. (In Russian).
4. Dantsova K.I., Miloserdova L.V., Osipov A.V., Monakova A.S., Bondareva L.I. Monitoring of degassing of subsurface resources based on remote sensing data // Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry. 2022. No. 5. P. 48—51 (In Russian). DOI: 10.24887/0028-2448-2022-5-48-51
5. Dymochkina M.G., Samodurov M.S., Pavlov V.A., Penigin A.V., Ushmaev O.S. Geological potential of carbon dioxide capture and storage in the Russian Federation // Neftyanoe khozyaistvo — Oil Industry. 2021. No. 12. P. 20—23 (In Russian).
6. United Nations Economic Commission For Europe. Report “Geologic CO₂ storage in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia”. Geneva, 2021. 45 p. (In Russian).

7. United Nations Economic Commission For Europe. Technology Brief "Carbon Capture, Use and Storage (CCUS)". Geneva, 2021. 36 p. (In Russian).
8. Kerimov V.Yu., Mustaev R.N. Earth degassing, anthropogenic carbon dioxide emissions and conditions of carbon dioxide burial // Scientific forum "Hydrocarbon degassing and conditions of carbon dioxide burial in the bowels of the Earth". Moscow: MGRI, 2022. 42 p. (In Russian).
9. Knel'ts A. Otrastl' CCUS industry in Russia: games, risks, risks and financing are expected from the future. 2022. 14 p. URL: www.fuelsdigest.com (In Russian).
10. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Guidelines for individual gas vapor inventories. Vol. 2 "Energy", section 5. Transportation, injection and removal of CO₂. IGES: Hayama, 2006. 35 p. (In Russian).
11. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Special report "Global Warming of 1.5°C". Incheon, 2019. 110 p. (In Russian).
12. Molodtsov K.V. Parade of hydrocarbons // Oil and gas vertical. 2022. No. 1. P. 4—9 (In Russian).
13. Solomon S. Exploration of hydrocarbon gas: geological and environmental safety — based on natural gas Sleipner (Sleipner) in Norway. Oslo: Bellona Foundation, 2007. 128 p. (In Russian).
14. Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO. Decarbonization of the oil and gas industry: international experience and Russian priorities. Moscow, 2021. 158 p. (In Russian).
15. Cherepanov V.V., Trusov A.I., Baluev S.A., Zolotukhin V.S., Rublev M.E. Identification and preliminary assessment of the results of studies of reservoirs in the license area of "Gazprom" in the Nadym-Pur-Taz region suitable for the implementation of CO₂ storage projects // Subsoil use XXI century. 2022. № 2(94). P. 58—71 (In Russian).
16. Shpurov I.V. GKZ tasks in the conditions of energy transition and low-carbon economy // Proceedings of the All-Russian agreement "Problems of oil and gas geology". Moscow: FGBU "VNIGNI", 2021. 11 p. (In Russian).
17. BP. Statistical Review of World Energy. London, 2021. 72 p.
18. Chadwick A., Arts R., Bernstone C. et al. Best practice for the storage of CO₂ in saline aquifers. UK: British Geological Survey, 2008. 267 p.
19. Global CCS Institute. Report «Global Status of CCS 2020». Melbourne, 2020. 44 p.
20. Gordon O. Carbon capture: Where is it working? 2022. URL: www.power-technology.com/analysis/carbon-capture-where-is-it-working/
21. Gunter W.D., Benson S., Bachu S. The role of hydrogeological and geochemical trapping in sedimentary basins for secure geological storage for carbon dioxide // Geological Society, London, Special Publications. 2004. № 233, P. 129—145. DOI: 10.1144/GSL.SP.2004.233.01.09
22. Intergovernmental Panel on Climate Change. Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. New York: Cambridge University Press, 2005. 442 p.
23. VYGON Consulting. CCUS: Монетизация выбросов CO₂. Москва, 2021. 48 с.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Осипов А.В. — разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Мустаев Р.Н. — присоединился к подготовке текста статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Монакова А.С. — присоединилась к подготовке текста статьи, внесла дополнения в раздел, связанный с перспективами развития проектов захоронения углекислого газа в России, и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Бондарева Л.И. — присоединилась к подготовке текста статьи, внесла дополнения в раздел, связанный с утилизацией углекислого газа в рамках операций по увеличению нефтеотдачи, и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Данцова К.И. — присоединилась к подготовке текста статьи, внесла дополнения в раздел, связанный с кратким обзором технологий улавливания, транспортировки и утилизации и (или) захоронения углекислого газа, и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Alexander V. Osipov — developed the concept of the article, prepared the text of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Rustam N. Mustaev — joined the preparation of the text of the article, finally approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Alexandra S. Monakova — joined the preparation of the text of the article, made adjustments to the section related to the prospects for the development of carbon dioxide storage projects in Russia, and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Liana I. Bondareva — joined the preparation of the text of the article, made adjustments to the section related to the utilization of carbon dioxide as part of enhanced oil recovery operations, and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Kristina I. Dantsova — joined the preparation of the text of the article, made adjustments to the section related to a brief overview of technologies for capturing, transporting and utilizing and (or) storing carbon dioxide, and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Осипов Александр Викторович* — кандидат геолого-минералогических наук, доцент, член-корреспондент РАЕН, доцент кафедры поисков и разведки нефти и газа ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина».

65, корп. 1, Ленинский просп., г. Москва 119991, Россия

e-mail: osipov.a@gubkin.ru

SPIN-код: 7992-0199

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6298-4274>

Мустаев Рустам Наильевич — кандидат геолого-минералогических наук, доцент, проректор по научной работе ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

e-mail: mustaevrn@mgri.ru

SPIN-код: 1174-1790

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8808-1359>

Монакова Александра Сергеевна — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры поисков и разведки нефти и газа ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина».

65, корп. 1, Ленинский просп., г. Москва 119991, Россия

e-mail: a.monakova@mail.ru

SPIN-код: 5619-7973

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3854-4436>

Бондарева Лиана Ильясовна — старший преподаватель кафедры поисков и разведки нефти и газа ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина».

65, корп. 1, Ленинский просп., г. Москва 119991, Россия

e-mail: liana_abril@mail.ru

SPIN-код: 1584-1518

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3986-858X>

Данцова Кристина Игоревна — старший преподаватель кафедры поисков и разведки нефти и газа ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина».

65, корп. 1, Ленинский просп., г. Москва 119991, Россия

e-mail: kristinadantsova@yandex.ru

SPIN-код: 6655-4404

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2283-8747>

Alexander V. Osipov* — Cand. of Sci. (Geol.-Min.), Associate Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Associate Professor of the Department of Search and Exploration of Oil and Gas of the Gubkin University.

65, bldg. 1, Leninsky ave., Moscow 119991, Russia

e-mail: osipov.a@gubkin.ru

SPIN-code: 7992-0199

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6298-4274>

Rustam N. Mustaev — Cand. of Sci. (Geol.-Min.), Associate Professor, Vice-Rector for Research at the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: mustaevrn@mgri.ru

SPIN-code: 1174-1790

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8808-1359>

Alexandra S. Monakova — Cand. of Sci. (Geol.-Min.), Associate Professor of the Department of Search and Exploration of Oil and Gas of the Gubkin University.

65, bldg. 1, Leninsky ave., Moscow 119991, Russia

e-mail: a.monakova@mail.ru

SPIN-code: 5619-7973

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3854-4436>

Liana I. Bondareva — Senior Lecturer, Department of Oil and Gas Prospecting and Exploration of the Gubkin University.

65, bldg. 1, Leninsky ave., Moscow 119991, Russia

e-mail: liana_abril@mail.ru

SPIN-code: 1584-1518

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3986-858X>

Kristina I. Dantsova — Senior Lecturer, Department of Oil and Gas Prospecting and Exploration of the Gubkin University.

65, bldg. 1, Leninsky ave., Moscow 119991, Russia

e-mail: kristinadantsova@yandex.ru

SPIN-code: 6655-4404

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2283-8747>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author