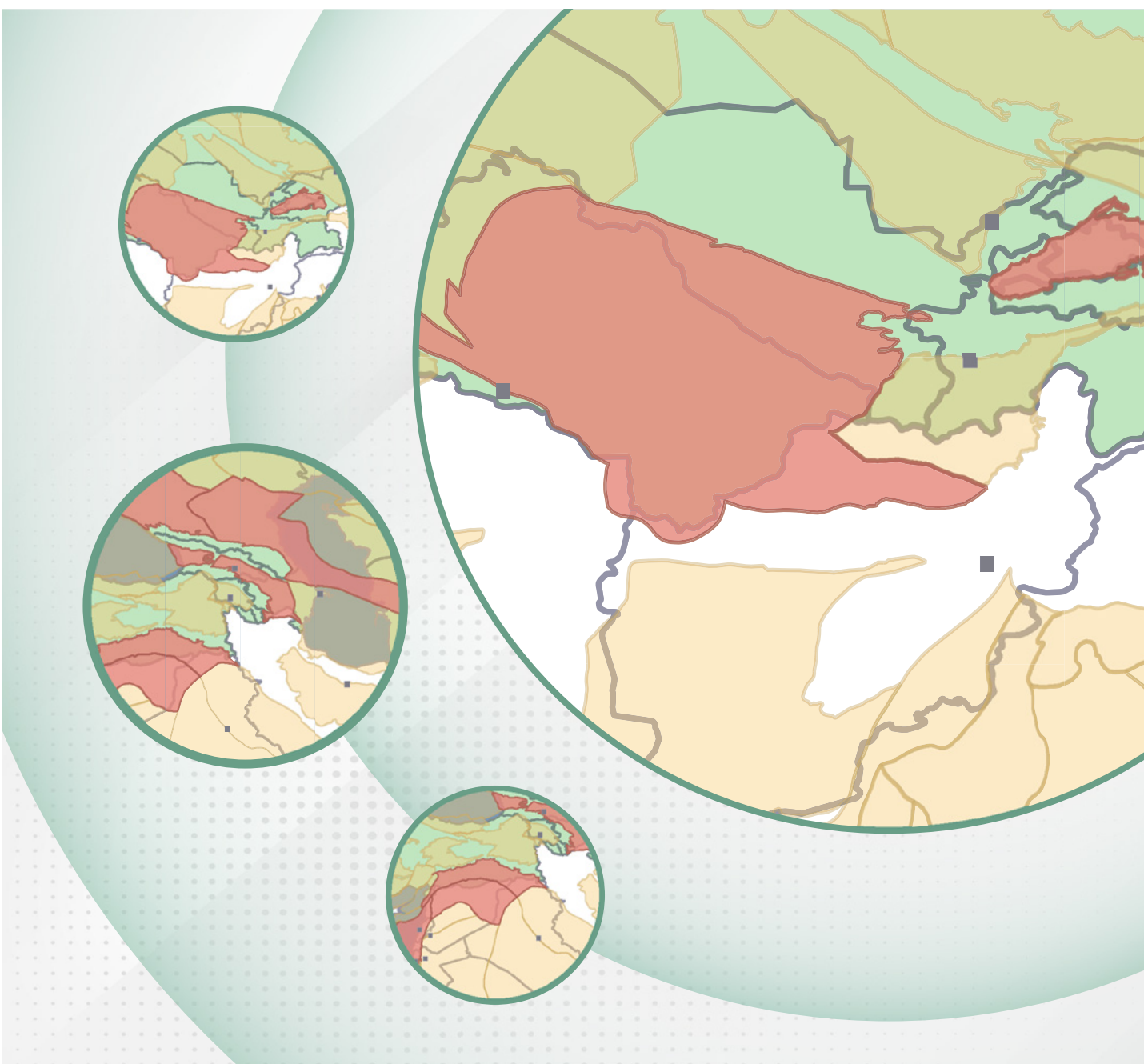


Геологическое хранение CO₂ в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии: первичный анализ потенциала и политики



UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE

**Геологическое хранение CO₂ в странах Восточной
Европы, Кавказа и Центральной Азии:
первичный анализ потенциала и политики**



UNITED NATIONS
GENEVA, 2021

Все права защищены во всех странах мира.

Заявки на воспроизведение фрагментов или фотокопирование настоящей публикации следует направлять в Центр по проверке авторских прав по адресу copyright.com. Все другие запросы в отношении прав и лицензий, включая производные права, следует направлять по адресу: United Nations Publications, 405 East 42nd Street, S-09FW001, New York, NY 10017, United States of America.

Эл.почта: permissions@un.org

вебсайт: <https://shop.un.org>

Выводы, толкования и заключения, изложенные в настоящей публикации, принадлежат ее авторам и не обязательно отражают мнения Организации Объединенных Наций, ее должностных лиц или государств-членов.

Употребляемые обозначения и материалы, изображенные на какой-либо карте в настоящем издании, не означают выражения со стороны Организации Объединенных Наций какого бы то ни было мнения относительно правового статуса страны, территории, города или района, или их властей, или относительно делимитации их границ.

Упоминание названий фирм, лицензированных процессов или коммерческих продуктов и не означает их одобрения со стороны Организации Объединенных Наций. Настоящая публикация издана на английском и русском языках.

Публикация Организации Объединенных Наций, выпущенная Европейской экономической комиссией Организации Объединенных Наций.

Выражение признательности

Вольфганг Хайдуг является ведущим автором данного исследования. Филип Нэле и Лидия Райкрофт из Нидерландской организации прикладных научных исследований (TNO), Лука Таскини из Лондонской школы экономики и Школы бизнеса Эдинбургского университета и Колин Уорд из Центра нефтяных исследований короля Абдуллы (KAPSARC) внесли существенный вклад в подготовку данного отчета. Нильс-Хенрик Бьюрстрем и Мариус Фосс из Rystad Energy предоставили данные, которые были использованы при подготовке этого исследования.

Карин Аск из Equinor предоставила текст о применении рамочной схемы РКООН для проектов по закачке CO₂ в Приложении к данному отчету. Вит Хладик из Чешской геологической службы также внес вклад в исследование, предоставляя советы. Мэрилин Смит из ORENDA Communications оказала услуги по редактированию.

Отчет подготовлен в ответ на запросы, полученные от правительств Албании, Азербайджана и Украины в рамках Регулярной программы технического сотрудничества ЕЭК ООН. Ива Бркич, Уокер Дарк, Олег Дзюбинский, Скотт Фостер и Стефани Хельд из Отдела устойчивой энергетики внесли свой вклад в этот отчет, предоставляя указания, комментарии и общее руководство. Шую Ли предоставила услуги визуальной коммуникации и дизайна для этого отчета. Екатерина Заяш перевела этот отчет на русский язык.

Это исследование посвящается руководящей роли и памяти покойного Барри Уортингтона, Председателя Группы экспертов по экологически более чистым электроэнергетическим системам.

СОДЕРЖАНИЕ

Выражение признательности	i
Принятые сокращения	iii
Резюме	iv
1. Введение	1
2. Соображения, касающиеся улавливания, использования и хранения углерода	3
2.1 Что представляет собой геологическое хранение CO ₂ ?	3
2.2 Варианты геологического хранения	3
2.3 Предложение CO ₂	6
2.4 Географическое распределение хранения и поставок	7
2.5 Транспорт и инфраструктура для CCUS	7
3. Оценка потенциала хранения CO₂	9
3.1 Качественная оценка потенциала хранения	9
3.2 Количественная оценка потенциала хранения	9
3.3 Потенциал хранения в водоносных пластах	9
3.4 Потенциал хранения в нефтяных коллекторах	10
4. Оценка потенциала CCUS в целевом регионе	11
4.1 Качественная оценка	11
4.2 Количественная оценка	13
4.3 Минерализованные водоносные пласты	13
4.4 Оценка нефтяных коллекторов в исследуемых странах	16
4.5 Объемы предложения CO ₂ определяют практически возможные объемы хранения	17
4.6 Кластеры поставки и хранения CO ₂ в целевых странах и регионах	18
4.7 Экономические аспекты хранения CO ₂ на нефтяных месторождениях в рассматриваемых странах	20
5. Политика в области CCUS	22
5.1 Инструменты политики для ускорения внедрения CCUS	23
5.2 Схема сертификации для CCUS	22
6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	28
Приложение: классификация ресурсов для проектов хранения CO₂	29
Список использованной	33

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АРО	авансовые рыночные обязательства
CO₂	диоксид углерода
CCUS	Улавливание, использование и хранение (геологическое) диоксида углерода
МЧР	Механизм чистого развития
CER	Сертифицируемое сокращение выбросов
ЕХУ	Единица хранения (или секвестрации) углерода
ЕОР	Увеличение нефтеотдачи пластов (с использованием CO ₂)
СТВ	Система торговли выбросами
ЕС	Европейский Союз
ИРУХУГ	Институт по разработке технологий улавливания и хранения углерода на глобальном уровне
Гт	Гигатонна
МЭА	Международное энергетическое агентство
МЭАПГ	Программа Международного энергетического агентства по НИОКР в области парниковых газов
МГЭИК	Межправительственная группа экспертов по изменению климата
ПМУРПИК	Передаваемые на международном уровне результаты предотвращения изменения климата
СНГ	Сжиженный нефтяной газ
ИООП	Измерение, отражение в отчетности и проверка
Мт	Миллион тонн
ОНУВ	Определяемый на национальном уровне вклад
RBCF	Финансирование деятельности, связанной с климатом, на основе результативности
МУР	Механизм устойчивого развития (в соответствии со Статьей 6.4 Парижского соглашения)
УГХ	уровень готовности хранения
т	Тонна
TASR	Технически доступный потенциал хранения
РКИК ООН	Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата
МЭ США	Министерство энергетики Соединенных Штатов Америки

РЕЗЮМЕ

Чтобы избежать опасных последствий изменения климата, Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН) изучает возможности достижения углеродной нейтральности в регионе, который включает страны Юго-Восточной Европы, Восточной Европы, Кавказа, Центральной Азии, Российскую Федерацию и Турцию. Для достижения «нулевых чистых выбросов» требуется удалить 90 гигатонн (Гт) CO₂ в течение ближайших 30 лет. Улавливание, использование и хранение углерода (CCUS) является важной технологией в решении этой задачи.

Как следует из названия, CCUS в действительности представляет собой технологическую цепочку. Возможность улавливать новые выбросы CO₂ у источника или извлекать из воздуха скрытые выбросы и отправлять их в подземное хранилище на неопределенный срок обеспечивает возможность достижения нулевых или отрицательных чистых выбросов. Реализация этого потенциала зависит, в первую очередь, от наличия подходящих хранилищ, обладающих геологическими характеристиками, обнаруживаемыми только в некоторых местах. Второй критерий – это способность транспортировать «запас» уловленного CO₂ в такие формации. Технические аспекты этого процесса находятся на разных стадиях разработки, причем механизмы транспортировки и хранения уже отработаны и освоены, особенно в нефтегазовой отрасли. Разрабатывается ряд технологий улавливания для различных отраслей с высоким уровнем выбросов. Интеграция в рамках всей цепочки развита в меньшей степени.

Однако внедрению CCUS в исследуемом регионе препятствует многоаспектная проблема. В настоящее время относительно мало известно о местонахождении, пригодности и фактическом размере потенциальных хранилищ – и, следовательно, об их полезности применительно к источникам CO₂. Кроме того, хотя сокращение выбросов CO₂ обеспечивает очевидные социальные и экологические преимущества, эта деятельность сопряжена с высокими затратами. Открывающиеся возможности по превращению истощенных нефтяных пластов в хранилища при правильных условиях может принести экономическую прибыль нефтедобывающим компаниям. Фактически, процесс использования CO₂ для увеличения добычи (известный как увеличение нефтеотдачи пластов или EOR) является единственным хорошо развитым процессом «использования», который в конечном итоге может декарбонизировать ископаемые виды топлива. Однако на сегодняшний день не имеется экономического обоснования для разработки второго основного варианта хранения – минерализованных водоносных пластов.

Эти проблемы выдвигают на первый план экономические и политические факторы, которые страны и регионы должны учитывать при оценке потенциала CCUS в своих стратегиях смягчения воздействия на климат. В исследуемом регионе проведению такой оценки в настоящее время препятствуют пробелы в информации и политической приверженности.

Основываясь на доступных ограниченных данных и информации, этот анализ позволяет сделать вывод о том, что потенциал хранения составляет около 62 000 млн. тонн (Мт) CO₂, из которых 56 410 МтCO₂ находятся в России. Общий потенциал хранения, который «сопоставлен» с источниками CO₂, намного ниже: всего 13 000 МтCO₂ за счет применения технологии EOR и 1100 МтCO₂ в водоносных пластах.

С учетом масштаба целевых показателей по сокращению выбросов, срочно необходимо провести дополнительную работу, чтобы понять, какой вклад CCUS – наряду с другими технологиями с низким, нулевым или отрицательным уровнем выбросов углерода – может внести в дискуссии на тему изменения климата в этом регионе и в политический паритет с другими углеродно-нейтральными технологиями производства электроэнергии (например, ядерной энергетикой или возобновляемыми источниками энергии). Долгосрочная цель проекта «Углубление понимания последствий и возможностей перехода к углеродной нейтральности в энергетике и энергоемких отраслях промышленности в регионе ЕЭК ООН к 2050 году» заключается в развитии коллективной способности вносить вклад в смягчение воздействия на климат и устойчивое развитие путем трансформации экономики и общества в направлении достижения чистых нулевых выбросов CO₂. Обеспечение четкого видения того, каким образом государства-члены ЕЭК ООН могут достичь углеродной нейтральности и какие меры они должны предпринять, будет представлять собой краткосрочное воздействие. Проект предоставляет странам возможность оценить альтернативные варианты достижения установленных целевых показателей.

Это исследование призвано предоставить странам инструменты и методологии для проведения оценки потенциала технологии CCUS и содержит описание инструментов политики, которые могут поддержать ее разработку и внедрение, в том числе путем стимулирования инвестиций частного сектора.

Важным элементом стратегических рекомендаций является предложение сместить акцент механизмов стимулирования со стадии улавливания на стадию хранения путем внедрения схемы сертификатов для CCUS, которая позволит эффективно торговать «еди-

ницами» хранимого CO₂. Правительства могли бы использовать подобный механизм для поддержки разработки и внедрения технологий, одновременно создавая рынок, на котором «прорыв на политическом уровне» в конечном итоге будет стимулировать рыночный спрос. Спланированный в соответствии с архитектурой, механизмами и целями Парижского соглашения, достигнутого на КС-21, такой механизм также мог бы помочь правительствам в достижении своих определяемых на национальном уровне вкладов в смягчение воздействия на климат.

1. ВВЕДЕНИЕ

Чтобы избежать опасных последствий изменения климата, Европейская экономическая комиссия Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН) изучает возможности достижения углеродной нейтральности в регионе, который включает страны Юго-Восточной Европы, Восточной Европы, Кавказа, Центральной Азии, Российскую Федерацию и Турцию¹.

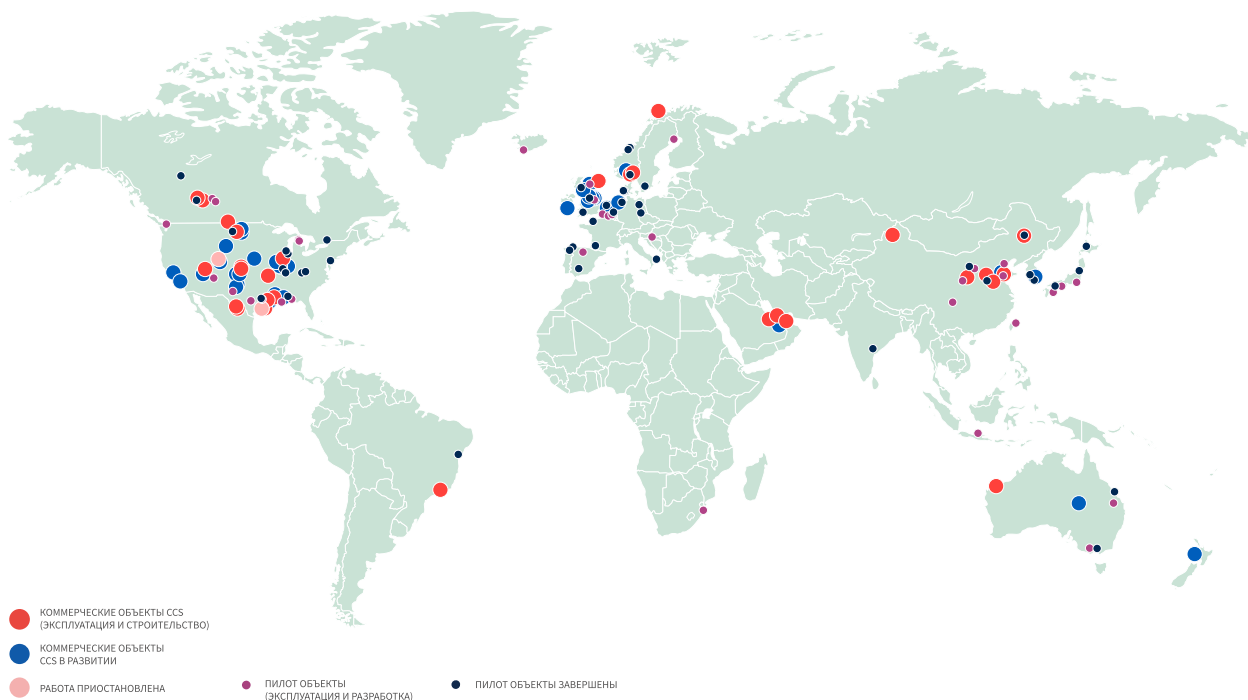
В этом регионе образуется 39% мировых выбросов диоксида углерода (CO₂) и расположены страны с одними из самых высоких уровней экономического развития в мире. Для достижения нулевых чистых выбросов потребуется удалить 90 гигатонн (Гт) CO₂ в течение следующих 30 лет. Это подразумевает работу по двум направлениям: i) устранение всех источников выбросов CO₂, что является чрезвычайно труднодостижимой и дорогостоящей целью; и ii) активное удаление CO₂ из атмосферы в целях уравнивания выбросов, которые трудно сократить. Улавливание, использование и хранение углерода (CCUS) представляет собой технологию, которая важна для обоих направлений: за счет сокращения выбросов CO₂ от источника или извлечения их из воздуха она обеспечивает достижение нулевых или

отрицательных чистых выбросов.

Результаты большинства мероприятий по моделированию, которые соответствуют целевым показателям сокращения выбросов Парижского соглашения, принятого на КС-21, демонстрируют траектории со значительными валовыми выбросами даже после точки достижения нулевого значения в глобальном масштабе (МГЭИК, 2018). Это отражает реальность, которая состоит в том, что ископаемые виды топлива, по сей вероятности, останутся важным энергоносителем в некоторых отраслях промышленности. Для сдерживания дополнительного повышения средних глобальных температур во второй половине этого столетия необходимо будет постоянно компенсировать выбросы из этих источников за счет соответствующего увеличения «стоков углерода» (G20, 2020).

Два основных варианта позволяют увеличить объем доступных стоков углерода. Стратегии лесовозобновления или лесоразведения нацелены на повышение поглощающей способности лесов. Внедрение технологий CCUS демонстрирует большой потенциал в плане быстрого удаления больших объемов CO₂

Рисунок 1 Обзор действующих проектов CCUS



Источник: Глобальный институт CCS, 2020

[1] В число целевых стран, рассмотренных в рамках настоящего доклада, входят Албания, Армения, Азербайджан, Беларусь, Босния и Герцеговина, Грузия, Казахстан, Кыргызстан, Молдова, Черногория, Российская Федерация, Сербия, Таджикистан, Северная Македония, Турция, Туркменистан, Украина и Узбекистан.

и обеспечения его надежного хранения в течение длительных периодов времени, чего трудно достичь с помощью биологических поглотителей.

В настоящее время технологии CCUS не готовы к выполнению своей предполагаемой роли в смягчении воздействия на климат. Во всем мире насчитывается 19 действующих установок CCUS, которые ежегодно закачивают на постоянное хранение около 40 млн. тонн (Мт) CO₂ (Рисунок 1) (ИРУХУГ, 2019). Для достижения уровня, описанного в сценарии устойчивого развития МЭА, согласно которому закачка и хранение должно осуществляться на тысячах объектов CCUS в объеме 1,5 гигатонны (Гт) в год, необходимо значительное расширение масштабов деятельности.

Большинство действующих проектов CCUS служат определенной цели в нефтедобывающей промышленности: увеличение нефтеотдачи пластов (EOR) – это процесс, при котором CO₂ закачивается в истощающиеся нефтяные пласты с целью обеспечения дополнительной добычи нефти за счет вытеснения нефти на месте первоначального залегания. Возможность извлечения дополнительной нефти может компенсировать затраты, связанные с закупкой и закачкой CO₂. Когда месторождение истощается, практически весь закачанный CO₂ удерживается (хранится) в нем.

Помимо увеличения нефтеотдачи, CCUS в настоящее время не имеет другой цели, кроме сокращения выбросов CO₂: фактически, элемент «использования» еще не очень хорошо развит. При отсутствии экономического обоснования для стимулирования внедрения CCUS практически все другие существующие проекты в настоящее время в значительной степени зависят от прямой или косвенной государственной поддержки в виде грантов или финансовой поддержки операционной деятельности, или предоставления заемного или акционерного капитала.

Несмотря на свою важность для смягчения воздействия на климат, текущая климатическая политика не обеспечивает значимой поддержки CCUS. В Европе технология CCUS включена в число вариантов смягчения воздействия на климат, охватываемых Системой торговли выбросами ЕС (СТВ ЕС) с 2012 года. Тем не менее, по линии этой системы не удалось реализовать ни один проект CCUS. В действительности цены на углерод в рамках СТВ ЕС были значительно ниже уровня, необходимого для обоснования инвестиций в CCUS. Вместо того, чтобы поощрять долгосрочные стратегические инвестиции, необходимые для развития CCUS, СТВ ЕС, по-видимому, придала импульс инвестициям в малозатратные меры по снижению выбросов (Marcantonini et al. 2017, Taschini 2020).

2. СООБРАЖЕНИЯ, КАСАЮЩИЕСЯ УЛАВЛИВАНИЯ, ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И ХРАНЕНИЯ УГЛЕРОДА

Технология CCUS может служить двум целям: предотвращение попадания новых выбросов CO₂ в атмосферу или удаление прошлых выбросов. Важно понимать, что CCUS - это не отдельная технология, а технологическая цепочка, состоящая из трех частей:

- **Улавливание** означает технологии, в которых используются различные химические и физические методы для фиксации CO₂ в точке его выброса, например, на электростанциях, работающих на ископаемом топливе, и промышленных объектах. Оно также может включать прямое удаление CO₂ из воздуха. Затем захваченный CO₂ можно транспортировать в место, где он может использоваться или храниться в течение длительного времени.
- **Использование** подразумевает, что захваченный CO₂ может быть использован для другой конечной цели; в этой области в настоящее время ведутся активные исследования, одним из примеров которых является создание новых материалов. Как отмечалось выше, в настоящее время преобладающим вариантом использования уловленного CO₂ является EOR. Другие варианты предусматривают только временное хранение CO₂ или имеют небольшую потенциальную долю рынка объемом менее нескольких миллионов тонн в год (МЭА, 2019)
- **Хранение** относится к механизмам, обеспечивающим долгосрочное удержание (например, в течение тысяч лет) CO₂ в подземных породных формациях. Это точка, в которой CO₂ удаляется из атмосферы на неопределенно долгий срок.

Отсюда следует, что внедрение CCUS зависит от трех элементов: объема предложения CO₂ для улавливания; системы инфраструктуры для обеспечения транспортировки CO₂; и наличие геологических площадок, пригодных для длительного хранения.

Поскольку преимущества CCUS (если не принимать во внимание его использование как элемент EOR) связаны исключительно с ограничением выбросов CO₂, для внедрения CCUS необходима рамочная концепция, которая позволила бы оценить стоимость ее выгод с точки зрения климата, в целях привлечения инвестиций в развитие технологии.

2.1 Что представляет собой геологическое хранение CO₂?

Геологическое хранение предполагает закачку CO₂ в горные породы, которые могут поглощать и удерживать его в течение тысяч лет. Хорошо подходящие для этого породы находятся в осадочных бассейнах, то есть в зонах проседания земной коры, в которых осадки накапливались в течение геологических временных периодов. Обычно эти бассейны простираются на тысячи километров. Расположенные в таких бассейнах глубокие минерализованные водоносные пласты, истощенные нефтяные и газовые месторождения и непригодные для разработки угольные пласты были признаны подходящими для хранения CO₂. Совсем недавно была предложена возможность хранения CO₂ в базальтовых породах. Первые два варианта (водоносные пласты и нефтяные коллекторы) предусматривают хранение CO₂ в поровом пространстве подземных пород. В угольных пластах под воздействием процесса адсорбции закачиваемый CO₂ прочно связывается с угольной матрицей. Механизм хранения в базальте обусловлен минерализацией углерода (то есть, химической реакцией). Вследствие вариативности геологии Земли потенциалом для геологического хранения (или CCUS) будут обладать не все страны мира (Cook, 2012).

Существуют четыре варианта хранения CO₂ в геологических формациях: минерализованные водоносные пласты, нефтяные коллекторы, угольные пласты и базальтовые формации. В настоящем докладе основное внимание уделяется двум из четырех вариантов, а именно тем, которые предполагают хранение в поровом пространстве под землей: минерализованные водоносные пласты и нефтяные коллекторы.

2.2 Варианты геологического хранения

Глубокие минерализованные водоносные пласты

Минерализованный водоносный пласт – это подземная структура, образованная проницаемой породой, содержащей соленую воду (рассол). Чтобы водоносный пласт считался пригодным для хранения CO₂, он должен отвечать трем основным требованиям:

- **Достаточная пористость, проницаемость и мощность.** Пористость и проницаемость гарантируют, что порода будет поглощать CO₂; значительная мощность, наряду с латеральным распространением водоносного пласта, имеют критически важное значение для удержания значительного объема. Эти особенности позволяют закачивать CO₂ с высокой скоростью без нарастания давления.
- **Достаточная глубина.** В идеале водоносный пласт должен иметь минимальную глубину ~ 800 м. В то время как на поверхности земли CO₂ представляет собой газ, на глубине он переходит в жидкое состояние с высокой массовой плотностью, что удобно для хранения.
- **Непроницаемая барьерная порода (перекрывающая порода или покрышка).** Барьерная порода должна перекрывать водоносный пласт, чтобы предотвратить вертикальную миграцию CO₂, обладающего плавучестью на глубине, к поверхности, где он может высвободиться в воздух. Worldwide, saline aquifers may provide the largest CO₂ storage capacity. Thibeau and Mucha (2018) provide an extensive review of national and global capacity estimates for saline aquifer storage and review current estimation methods.

Во всем мире минерализованные водоносные пласты могут обеспечить возможность хранения наибольших объемов CO₂. В публикации Thibeau and Mucha (2018) представлен широкий обзор национальных и глобальных предварительных оценок потенциала хранения CO₂ в минерализованных водоносных пластах и рассмотрены существующие методы оценки.

На сегодняшний день не найдено экономических доводов в пользу систематического изучения потенциала водоносных пластов для хранения CO₂.

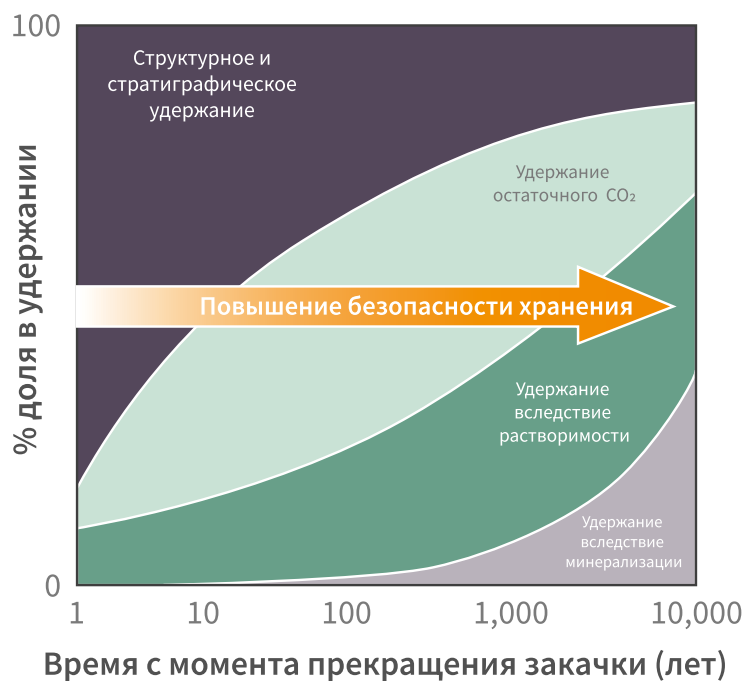
Вставка 1 Процедуры улавливания CO₂ в минерализованных водоносных пластах CO₂

В целом, для улавливания (иммобилизации) CO₂ в горной породе и предотвращения его утечки можно использовать четыре метода.

- **Стратиграфическое и структурное улавливание** представляет собой это физический процесс, зависящий от соответствующих геологических условий. Однако природа породных формаций и процесс закачки CO₂ могут привести к ограничениям, связанным с давлением, которые обуславливают необходимость управления водными ресурсами. Закачка CO₂ в породу-коллектор требует применения давления, превышающего давление присутствующей в породе воды. После закачки CO₂ поднимается вверх через пласт-коллектор до тех пор, пока не будет остановлен покрывающей породой. Таким образом, во время закачки необходимо следить за тем, чтобы давление закачки не превышало предел прочности породы, образующей покрывающую породу. Наличие трещин в покрывающей породе может привести к утечке CO₂ на поверхность, нарушив тем самым целостность хранилища.
- **Остаточное удерживание** происходит, когда поровые пространства в породе настолько узкие, что капиллярные эффекты могут противостоять восходящей миграции CO₂, обусловленной его плавучестью.
- **Удерживание вследствие растворимости** происходит, когда CO₂ растворяется в воде в пласте-коллекторе. Вода, насыщенная CO₂, становится более плотной (по сравнению с чистой водой), что заставляет ее перемещаться вниз на дно коллектора.
- **Минеральное удерживание** вызывается химической реакцией между минералами, образующими горные породы, и закачиваемым CO₂. К примеру, силикаты кальция или магния вступают в реакцию с CO₂ с образованием стабильных карбонатов кальция или магния. Эти реакции происходят медленно, в течение тысяч лет.

Относительная важность этих механизмов удержания зависит от конкретного хранилища; более того, они действуют не одновременно, а последовательно в течение длительных периодов времени. Таким образом, на этапе закачки преобладает физическое удержание, которое в конечном итоге переходит в минеральное удержание посредством химических механизмов. Это создает комбинированный эффект, благодаря которому различные механизмы удержания, как правило, увеличивают долю иммобилизованного CO₂ (Рисунок 2).

Рисунок 2 Относительный вклад механизмов удержания



Источник: МГЭИК (2005)

Истощенные нефтегазовые месторождения

Как уже отмечалось, EOR представляет собой широко используемый процесс, при котором CO₂ закачивается в истощенные нефтяные месторождения в рамках операционной деятельности для добычи нефти, которая в противном случае была бы невозможна. По окончании эксплуатации месторождения практически весь закачанный CO₂ остается в пласте.

Несколько факторов делают истощенные залежи нефти и газа хорошими кандидатами на роль хранилищ CO₂. Во-первых, наличие эффективной покрывающей породы – это то, что позволило нефти и газу накапливаться в течение геологических периодов. Во-вторых, поскольку пористость и проницаемость их пластов были достаточными для добычи флюидов, они обеспечивают возможность закачки CO₂. Третий аспект заключается в том, что подробные сведения о геологической структуре и физических свойствах этих коллекторов накапливаются в ходе разведки и добычи; следовательно, существует меньший риск того, что закачанный CO₂ поведет себя неожиданным образом.

Возможно, наиболее важным является то, что закачка CO₂ в истощенные нефтяные месторождения предполагает коммерческую выгоду: фактически, в некоторых регионах (например, в США) уже является обычной практикой закачка CO₂ исключительно в целях извлечения нефти, которую иначе невозможно добыть – так называемое повышение нефтеотдачи пластов (EOR).

Однако не все нефтяные месторождения подходят для применения EOR. Для этого свойства нефти и коллектора должны удовлетворять определенным условиям («скрининговым критериям»).

Хранение в базальтовых породах

Обладая высокой пористостью и проницаемостью, базальт является высокоактивным по отношению к CO₂, что в конечном итоге приводит к образованию твердых карбонатных минералов (кальцита, доломита и т. д.). Эти особенности делают базальт привлекательным для хранения CO₂ в пластах, которое в настоящее время находится на стадии исследования. В частности, проводятся исследования для оценки потока реактивного CO₂ в базальте, способов поддержания проницаемости по мере усиления минерализации и кинетики реакций минерализации (Kelemen et al., 2019). Базальтовые формации встречаются во многих регионах мира и особенно широко распространены на северо-западе США и в Индии. Они заслуживают рассмотрения в качестве варианта хранения, особенно в районах без подходящей осадочной основы (Cook, 2012).

Хранение в угольных пластах

Угольные месторождения встречаются во многих осадочных бассейнах. Как правило, угольные пласты разрабатываются только до глубины ~ 1500 м. В принципе, более глубокие угольные пласты могут быть пригодными в качестве подземных коллекторов CO₂. Механизм хранения CO₂ в угольных пластах отличается от такового в водоносных пластах или базальтовых формациях. После закачки CO₂ он прочно связывается с поверхностями угольной матрицы в результате адсорбции.

По аналогии с увеличением нефтеотдачи пластов на нефтяных месторождениях в этом случае может присутствовать экономический стимул. Очень часто угольные пласты содержат метан угольных пластов, который адсорбируется на угольной матрице. По мере того, как CO₂ адсорбируется на поверхности угольной матрицы, изначально связанный метан десорбируется и высвобождается и может быть извлечен из эксплуатационных скважин. Этот процесс известен как «Усовершенствованное извлечение метана из угольных пластов с помощью CO₂» и используется в бассейне Сан-Хуан в США.

Важнейшим критерием осуществимости этого варианта хранения является проницаемость угольных пластов, которая определяет, может ли закачиваемый CO₂ достичь больших участков угольной матрицы. Уголь, который залегает слишком глубоко для добычи, зачастую сильно уплотнен и имеет слишком низкую проницаемость, чтобы обеспечить возможность эффективной закачки CO₂. Кроме того, многие угольные пласты разбухают при закачке CO₂, что значительно снижает их проницаемость. В целом хранение CO₂ в глубоких угольных пластах с низкой проницаемостью по-прежнему связано с нерешенными геотехническими проблемами (Cook, 2012; Ranatunga, 2017).

Из четырех вариантов хранения, описанных выше, в настоящем докладе рассматриваются только глубокие водоносные пласты и нефтяные коллекторы, что свидетельствует об их широкой распространенности и значительном потенциале хранения.

2.3 Предложение CO₂

Потенциал хранения CO₂ в качестве механизма сокращения выбросов зависит от доступности предложения, то есть элементов улавливания и транспортировки CO₂ в исследуемой цепочке. При условии установки соответствующей технологии улавливания углерода для производства концентрированного потока CO₂ под высоким давлением, подходящие источники выбросов включают производство электроэнергии из угля или газа, а также производство чугуна и стали, цемента, удобрений и этанола, а также переработку природного газа.

2.4 Географическое распределение хранения и поставок

Общей проблемой CCUS является то, что существующие источники CO₂ очень часто не располагаются в непосредственной близости от мест хранения. Для решения этой проблемы были предприняты значительные усилия по отображению географического распределения различных объектов и формаций в «атласах хранения».

В Европейском союзе проекты по количественной оценке регионального или национального потенциала хранения CO₂ осуществляются с начала 1990-х годов. Проект GeoCapacity, финансируемый Европейской Комиссией, провел общеевропейскую оценку, направленную на разработку Европейской геоинформационной системы (ГИС) для определения местоположения как источников выбросов, так и мест хранения. В рамках завершеного в 2008 году проекта была проведена оценка потенциала хранения, в частности, в Албании, Боснии и Герцеговине, Болгарии, Хорватии, Чешской Республике, Эстонии, Венгрии, Латвии, Литве, Северной Македонии, Польше, Румынии, Словакии и Словении. Важным аспектом было включение мест хранения в Восточной Европе, которые на тот момент недавно вступили в ЕС.

Результаты проекта GeoCapacity были учтены во втором проекте ЕС, CO₂StoP. Основная цель проекта CO₂StoP (завершеного в 2014 году) заключалась в том, чтобы собрать общеевропейский набор данных геологических параметров и сохранить его в общедоступной базе данных, что позволило бы централизованно оценить потенциал хранения CO₂ с использованием единой методологии.

Подробные атласы хранения были разработаны для других регионов и стран, в которых в настоящее время осуществляются проекты CCUS, включая Северную Америку, Норвегию и Австралию. В Норвежском атласе хранилищ в Северном море, разработанном и опубликованном Норвежским нефтяным управлением, рассматриваются все соответствующие геологические формации в исследуемом районе. Он содержит обширные сейсмические данные и параметры бурения, которые можно использовать благодаря свободному доступу к разведочным и производственным данным. Атлас хранения CO₂ США и Канады охватывает почти весь североамериканский континент. В связи с размерами исследуемой территории она была разделена на семь регионов. «Партнерство в продвижении технологии удержания углерода» оценило потенциал каждого региона. В исследованиях, проведенных в США, в каждом регионе применялась единая методология оценки.

Дополнительные проекты в области хранения и атласы включают Атлас геологического хранения CO₂ Квинсленда, Региональную оценку потенциала хра-

нения CO₂ на Индийском субконтиненте, Оценку основных осадочных бассейнов Китая на предмет потенциала и пригодности для геологического хранения CO₂ и демонстрационный проект в бассейне Ордос.

Следует подчеркнуть, что национальные оценки потенциала хранения, даже в тех случаях, когда они доступны, могут отличаться по исходным допущениям, и их невозможно сопоставить или агрегировать для получения региональных оценок потенциала хранения CO₂ (МЭА, 2013; Kearns et al., 2016). Существует острая необходимость в разработке единой процедуры, «которая позволила бы проводить прозрачную и надежную оценку геологического хранения CO₂ во всем мире в различных геологических условиях, независимо от объема геологических данных» (МЭА, 2013).

С учетом расстояния, которое часто разделяет источники поставок и места хранения, создание инфраструктуры для транспортировки CO₂ является ключевым компонентом успешной внедрения CCUS.

2.5 Транспорт и инфраструктура для CCUS

В настоящее время стальные трубопроводы являются наиболее распространенным средством безопасной и рентабельной транспортировки больших объемов газа на дальние расстояния. Трубопроводная транспортировка природного газа и нефти – это отработанная технология, используемая во всем мире, которая охватывает несколько миллионов километров действующих трубопроводов во всем мире. Ее основным преимуществом является то, что трубопроводы позволяют осуществлять непрерывную транспортировку без необходимости в дополнительном промежуточном хранении.

С 1970-х годов было построено и в настоящее время эксплуатируется более 6000 км трубопроводов для транспортировки CO₂, которые впервые появились в США. Чтобы использовать пропускную способность трубопроводов экономически эффективным образом, CO₂ сжимается до сверхкритического состояния, что придает ему плотность жидкости одновременно с вязкостью газа и облегчает прохождение по трубопроводам. Давление в трубопроводе определяется гидравлическими характеристиками, и для поддержания сверхкритического состояния CO₂ могут потребоваться станции восстановления давления, что очевидно влияет на стоимость трубопровода (Mallon et al., 2013).

Коррозия стали под воздействием углекислоты является дополнительной проблемой при разработке проектов транспортировки CO₂ по трубопроводам. Улавливаемый CO₂ содержит небольшой процент воды, которая может вступать в реакцию с образованием агрессивной угольной кислоты. Реакцией мож-

но управлять путем сушки отделенного CO₂ для снижения влагосодержания или путем строительства трубопроводов с использованием некоррозионных материалов, таких как нержавеющая сталь. Поскольку стоимость каждого варианта зависит от маршрута и объемов транспортируемого CO₂, вопрос о том, какой из вариантов является экономически целесообразным, должен решаться индивидуально для каждого проекта.

Второй вариант представляет собой транспортировку CO₂ специальными судами, поскольку свойства сжиженного CO₂ аналогичны свойствам сжиженного нефтяного газа (СНГ). В настоящее время в отрасли практикуется перевозка морем небольших объемов CO₂ (<1500 кубических метров); технология может быть масштабирована до уровня более крупных перевозчиков, что увеличивает вероятность транспортировки больших объемов в будущем (Santos, 2012).

Для выбора целесообразных средств транспортировки и создания инфраструктуры заинтересованным сторонам необходимо учитывать количество CO₂ и расстояние, которое необходимо преодолеть между местами улавливания и хранения CO₂.

Чтобы свести к минимуму инвестиционный риск на ранних этапах разработки CCUS, инфраструктура для транспортировки CO₂, по всей вероятности, бу-

дет развиваться в виде «двухточечных» соединений между одним источником выбросов и конкретным местом хранения. Со временем на замену таким двусторонним соединениям могут прийти инфраструктурные кластеры, в которых выбросы из нескольких источников CO₂ будут объединяться и совместно транспортироваться по трубопроводу к общему хранилищу. Распределение транспортных расходов между несколькими источниками выбросов приведет к экономии за счет масштаба, в результате чего стоимость каждого из них будет ниже, чем в случае реализации отдельного проекта для одного источника.

С учетом вышеизложенных соображений относительно доступных мест хранения, обеспеченности CO₂ и необходимости наличия инфраструктуры и транспорта для связи между ними, планирование кластеров CO₂ является эффективным и рентабельным подходом. Помимо упрощения агрегации переменного спроса в рамках различных проектов хранения при одновременной поддержке стабильности поставок, возможность совместного использования инфраструктуры может снижать общие затраты для всех заинтересованных сторон.

3. ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ХРАНЕНИЯ CO₂

Отправной точкой для определения геологического потенциала хранения в конкретной стране является определение местоположения и характеристик осадочных бассейнов. На следующем этапе необходимо провести оценку пригодности бассейнов для хранения CO₂ с качественной и количественной точек зрения. Первая предполагает изучение их «перспективности для хранения»; вторая направлена на оценку объема CO₂, который может храниться в данном пласте.

В настоящее время доступная информация сильно разнится. Однако неполные знания и ограниченный доступ к данным затрудняют надежную оценку потенциала для всех типов хранилищ в глобальном масштабе. В результате, несмотря на наличие хорошего представления об имеющихся хранилищах в некоторых странах ОЭСР с высоким уровнем выбросов CO₂ (включая ЕС, Северную Америку и Австралию), глобальная оценка потенциала хранения находится на ранней стадии подготовки.

Важно отметить, что потенциал хранения – как и в случае с другими минеральными ресурсами – является истощаемым природным ресурсом, и его доступность уменьшается всякий раз, когда он используется. В целях оказания содействия в оценке и управлении этими ресурсами Рабочая классификация ресурсов Организации Объединенных Наций обеспечивает глобальную рамочную основу для определения зрелости и развития ресурсов для проектов. Ее можно использовать для классификации отдельных проектов по закачке CO₂ в соответствии с геологическими знаниями, технической осуществимостью и экономической целесообразностью (РКО-ОН, 2019 г.; см. Приложение).

3.1 Качественная оценка потенциала хранения

«Насколько эффективно» данный бассейн может накапливать CO₂ – это первый вопрос, который нужно исследовать. Поскольку хранение CO₂ зависит от наличия осадочных бассейнов, качественная характеристика имеющихся бассейнов является важным первым шагом. Для каждого бассейна она включает сбор информации о его размере и местонахождении, толщине и типе отложений, из которых он состоит, а также подробную информацию о его геологических параметрах. Эта информация помогает определить бассейны, наиболее подходящие для хранения; следующий шаг включает сортировку бассейнов с точки зрения их вероятной пригодности для хранения (Bachu, 2003). Это качественное исследование, которое обычно выполняется группой экспертов, представляет собой ранжирование бассейнов с точки

зрения их предполагаемой «перспективности» для хранения.

3.2 Количественная оценка потенциала хранения

«Сколько» – это второй важный вопрос потенциала хранения. Ключевыми определяющими факторами являются объем пласта хранения и доступное поровое пространство. Кроме того, оцениваются температура и давление на глубине хранения, поскольку они определяют количество хранящегося CO₂ на единицу объема пористой породы. На глубине низкие температуры предпочтительнее высоких, поскольку при них CO₂ может приобретать более высокую массовую плотность, что позволяет более эффективно использовать доступное пространство для хранения.

На этапе закачки и в течение длительного периода времени после этого в удержании CO₂ доминируют физические механизмы хранения – до такой степени, что количественная оценка хранения учитывает только эти процессы. Химические механизмы хранения, которые в большинстве случаев способны удерживать CO₂ только в более долгосрочной перспективе, обычно не учитываются при оценке потенциала хранения.

3.3 Потенциал хранения в водоносных пластах

Потенциал хранения в водоносных пластах оценивается на основе данных волюметрической оценки, которая в той или иной форме проводится во всем мире по формуле

$$G=A \times h \times \varphi \times \rho \times E$$

где G обозначает технически доступный ресурс хранения (TASR), A – площадь оцениваемого региона. N обозначает общую мощность минерализованного пласта; φ – его пористость; и ρ – массовую плотность CO₂ при подповерхностном давлении и температуре. Символ E обозначает эффективность хранения, определяемую как доля объема порового пространства, который может быть заполнен CO₂.

TASR включает поровое пространство, которое, как можно обоснованно ожидать, будет удерживать CO₂ в течение длительного периода времени без неблагоприятного воздействия на окружающую среду, рассчитанное на основе современных геологических и гидрологических знаний и инженерно-технической практики. В этом смысле TASR представляет собой «верхний предел». Факторы, которые могут ограничить доступное поровое пространство, включают:

- Технические аспекты, связанные с имеющимися технологиями, обеспечивающими доступ к поровому пространству
- Экономические параметры и стоимость
- Социально-политические аспекты, включая общественное одобрение и нормативные ограничения

Это подчеркивает разницу между технически доступным потенциалом водоносных пластов и объемом хранилища, который можно фактически использовать. Принятие решений о том, какие ограничения следует применять, является частью любой деятельности по оценке хранения CO₂.

3.4 Потенциал хранения в нефтяных коллекторах

В случае нефтяных месторождений потенциал хранения можно оценить на основе имеющихся геологических и петрофизических данных, полученных и собранных исходя из коммерческих интересов. В данном случае хранение CO₂ в рамках повышения нефтеотдачи пластов определяется множеством факторов, действующих в сочетании друг с другом, которые, в свою очередь, зависят от геологических характеристик коллектора и, что важно, от реализации технологии EOR.

До недавнего времени EOR в основном рассматривалось как технология оптимизации добычи нефти, при этом нефтедобывающим компаниям приходилось покупать CO₂ для закачки. Таким образом, операторы EOR тщательно рассчитывают коэффициент использования, то есть, количество CO₂ (в тоннах), использованное для добычи дополнительного барреля нефти, и экономически заинтересованы в достижении заданного уровня добычи нефти с использованием минимального количества CO₂. EOR применяется только до критического момента, когда затраты на приобретение CO₂ превысят доходы, полученные от продажи дополнительной нефти на рынке. Тем не менее, практически весь CO₂, закупленный для закачки с целью увеличения нефтеотдачи, в конечном итоге остается в пласте.

Потенциальная возможность для превращения практики увеличения нефтеотдачи пластов в механизм, способный фактически сократить выбросы CO₂ – по сути, «декарбонизировать нефть» – появилась только недавно. Изменяя принципы функционирования проектов EOR, можно значительно увеличить объем закачиваемого CO₂, чтобы частично или полностью компенсировать выбросы, связанные с дополнительной добычей нефти. При помощи активного операционного управления коллекторами и скважинами возможно достичь значительно более высоких коэффициентов использования CO₂ и, та-

ким образом, обеспечить возможность хранения больших объемов CO₂.

В Соединенных Штатах, например, на каждый баррель добываемой в настоящее время нефти на хранение закачивается ~ 0,3-0,4 тонны CO₂ (тCO₂), в то время как при сжигании нефти в атмосферу выделяется 0,4 тCO₂ (McGlade, 2019). По оценкам МЭА (2015), в проектах, предусматривающих совмещение добычи нефти и хранения CO₂, показатель использования CO₂ может составить ~ 0,6 тCO₂/баррель; этот сценарий EOR называется «Усовершенствованная технология EOR+», чтобы провести различие с «традиционной» технологией EOR. Если технологии увеличения нефтеотдачи будут ориентированы на хранение, то чистое использование CO₂ может возрасти до 0,9 тCO₂. В этом случае, в пересчете на один баррель, при производстве обеспечивается хранение большего количества CO₂, чем выделяется при сжигании на стороне потребителя.

Это говорит о том, что технология EOR может играть важную роль на начальных этапах внедрения CCUS. Поскольку сфера применения EOR ограничена узкими рамками, обусловленными геофизическими факторами и технологическими параметрами разработки пластов, эта технология не сможет обеспечить возможности для хранения на всех месторождениях. Тем не менее, поскольку доходы от нефти, добытой с помощью EOR, компенсируют часть затрат, связанных с хранением CO₂, она может стать экономически привлекательным способом хранения.

4. ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА CCUS В ЦЕЛЕВОМ РЕГИОНЕ

Оценка потенциала CCUS в СТРАНАХ Юго-Восточной и Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии представляет собой особо сложную задачу в связи с недостаточным количеством общедоступных геологических данных. На сегодняшний день никто не проводил достаточно детальных оценок перспектив хранения CO₂ в бассейнах региона и всеобъемлющих количественных оценок потенциала хранения. Поскольку устранение этого пробела выходит за рамки настоящего доклада, он скорее направлен на решение двух задач:

- Определить бассейны в регионе, которые «весьма пригодны» для хранения, но не ставя целью предоставить полноценную подробную карту перспективности хранения
- Определить и проанализировать существующие количественные оценки по странам, для которых они доступны

В недавней статье, опубликованной в Международном журнале по вопросам регулирования выбросов парниковых газов (IJGGC) была представлена концепция «уровня готовности технологий хранения» (УГХ) (основанная на широко используемой концепции уровней технологической готовности), которая будет использоваться для дальнейших оценок потенциала (Akhurst et al., 2021). Несмотря на то, что ранняя работа по УГХ еще не опубликована, ее следует принять во внимание при проведении будущих

исследований в области потенциала хранения CO₂, в частности, чтобы помочь каталогизировать различные уровни детализации, отраженные в индивидуальных оценках потенциала. Это позволит применить более унифицированный подход к анализу положения дел в области оценки потенциала хранения во всем мире.

4.1 Качественная оценка

Следующий анализ основан на общедоступной базе данных о бассейнах и залежах Robertson Basins and Plays (2020), в которой содержится информация о расположении и протяженности осадочных бассейнов во всем мире.

В исследуемом регионе определено 95 бассейнов. Семнадцать из этих бассейнов классифицируются в базе данных как хорошо разведанные и имеющие обнаруженные залежи углеводородов. Поскольку характеристики этих бассейнов хорошо известны, они являются основными целевыми объектами хранения CO₂. Это актуально в плане расположения как углеводородных, так и водоносных пластов, поскольку при разведке углеводородов компании-разработчики часто бурят «сухие скважины», что может указывать на наличие водоносных пластов, пригодных для хранения. Выявленные бассейны перечислены в Таблице 1 и географически отображены на Рисунке 3.

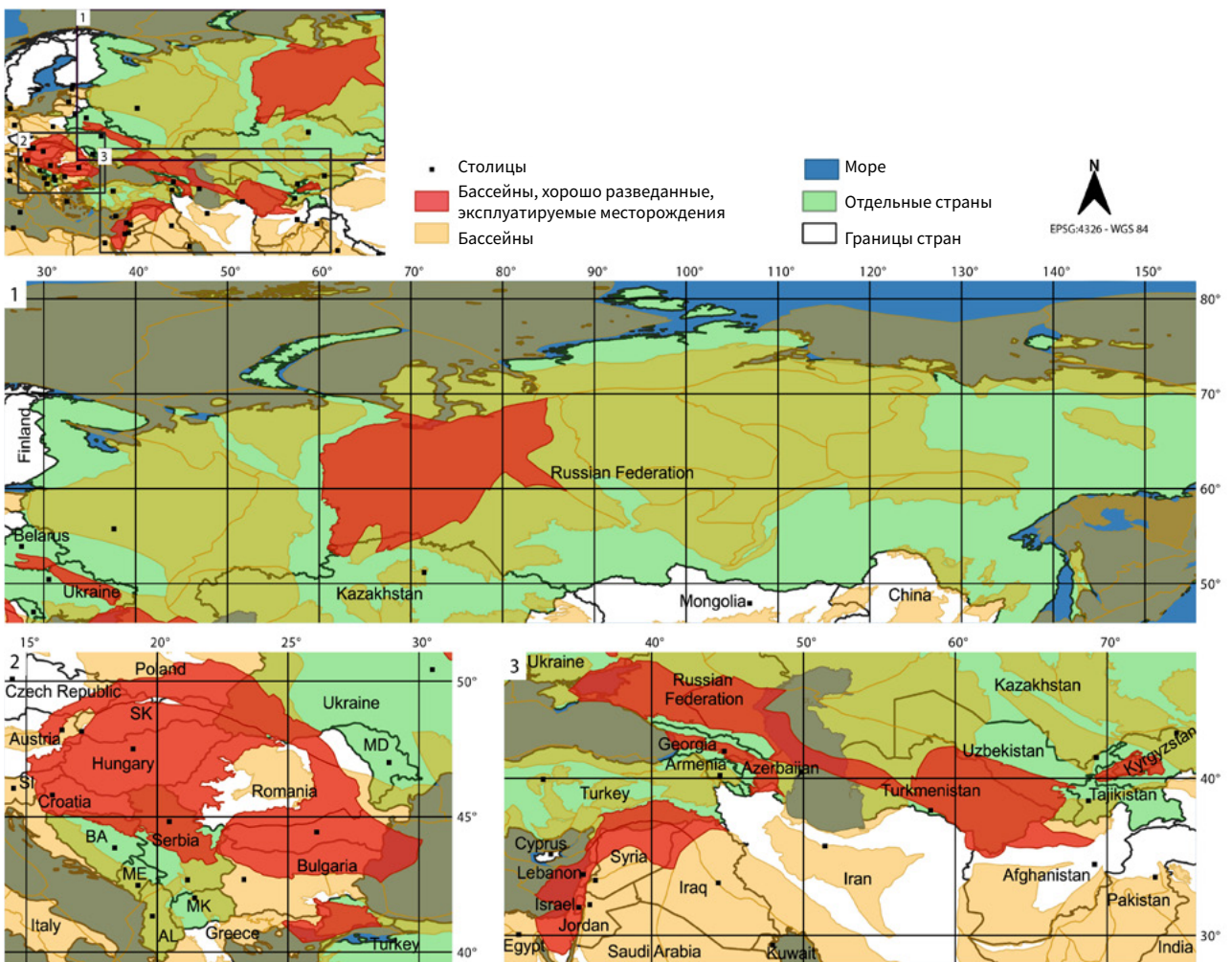
Таблица 1 Бассейны, особенно пригодные для хранения, в порядке их протяженности

Относительная протяженность	Название бассейна	Провинция в соотв. с классификацией бассейнов и залежей	Макс. мощность отложений (км)	Место расположения
1	Центральный суббассейн - Западная Сибирь	Западно-Сибирский прогиб	16	Наземный и морской
2	Аму-Дарьинский	Туранская плита	15	Наземный
3	Паннонский	Закарпатский трансенсивный бассейн	7	Наземный
4	Северокавказский	Паракавказский задуговый бассейн	14	Наземный и морской
5	Индо-Кубанский	Паракавказский задуговый бассейн	11	Наземный и морской
6	Синайско-Левантский	Арабская пассивная окраина	11	Наземный и морской
7	Мезийская платформа	Платформа Пара-Торнквиста	12	Наземный и морской
8	Евфратско-Синджарский	Аравийский форланд	9	Наземный
9	Северокарпатский	Карпатский форланд	12	Наземный

10	Юго-Восточная Турция	Аравийский форланд	10	Наземный и морской
11	Днепровско-Донецкий	Украинская провинция	20	Наземный
12	Кура - Картлийский	Закавказский задуговый бассейн	11	Наземный
13	Южнокарпатский	Карпатский форланд	9	Наземный
14	Ферганский	Туранская плита	10	Наземный
15	Припятский	Украинская провинция	6	Наземный
16	Фракийский	Эгейский экстенциональный бассейн	9	Наземный и морской
17	Риони	Закавказский задуговый бассейн	8	Наземный и морской

Источник: C. Weismüller and W. Heidug

Рисунок 3 Карты бассейнов исследуемого региона; те, которые особенно пригодны для хранения CO₂, выделены красным цветом.



Источник: C. Weismüller and W. Heidug

Критерии, используемые для выбора бассейнов, демонстрирующих наличие потенциала, являются простыми, но довольно строгими. В частности, они включают возможность хранения в бассейнах, разведанных в ограниченной степени, и в геологических условиях, где отсутствуют углеводородные системы. Наглядным примером является потенциал хранения в Казахстане: он не отражен в настоящем докладе в связи с недостаточным уровнем разведанности соответствующего бассейна (Abouy, 2020). В целом, необходимо провести более подробные исследования, чтобы составить полную классификацию бассейнов в рассматриваемых странах в соответствии с их перспективностью для хранения CO₂.

4.2 Количественная оценка

Количественная оценка потенциала хранения в исследуемом регионе является гораздо более сложной задачей.

Для регионов Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии лучшим источником самых последних общедоступных данных по оценке хранилищ по-прежнему является проект GeoCapacity (GeoCapacity, 2009). Кроме того, МЭАПГ провела обзор потенциала хранения CO₂ в бассейнах, имеющих потенциал в плане повышения нефтеотдачи пластов с использованием CO₂, включая объекты в Казахстане, России и Туркменистане (МЭАПГ, 2009). В отчете Kearns et al. (2017) также ставилась задача разработать последовательную базу данных о региональном потенциале геологического хранения CO₂ во всем мире, которая включала «Прочие страны Евразии» наряду с оценкой стран ЕС в целом. Некоторые из соответствующих стран опубликовали национальные оценки потенциала хранения, результаты которых кратко изложены в следующем разделе.

4.3 Минерализованные водоносные пласты

Как отмечалось в Разделе 2, минерализованные водоносные пласты могут обладать самым большим потенциалом для хранения CO₂ в мире. На сегодняшний день региональных оценок минерализованных водоносных пластов для регионов Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии не имеется. Особенно сложной проблемой в этом регионе является ограниченная публичная доступность количественных данных о потенциале водоносных пластов для хранения CO₂. Поскольку разведка недр с помощью сейсмических исследований и бурения сопряжена с большими затратами, она обычно не проводится без экономического обоснования. В результате объем данных о хранении в минерализованном пласте невелик по сравнению с данными о нефтяных и газовых месторождениях. Некоторые страны провели национальные оценки, результаты которых перечислены ниже.

Албания сообщает, что, согласно данным консервативной оценки, потенциал для «эффективного хранения CO₂» в водоносных пластах составляет 20 миллионов тонн (Мт) (Hatzianannis, 2009). Этот объем обеспечивает расположенный в районе Думрея (к югу от Эльбасана) соляной купол с большим диапировым телом, простирающимся на глубину 5 км, который обладает потенциалом для хранения CO₂ в соляных пещерах. Несмотря на то, что конкретный объект определен и проведена первичная оценка, первоначальная концепция хранения еще не полностью разработана. (Примечание: в рамках второго исследования оценивались нефтегазоносные месторождения Албании.)

Азербайджан является частью обширной нефтегазоносной системы в провинции Южно-Каспийского бассейна, наряду с Ираном и Туркменистаном, что предполагает наличие потенциала для хранения как в водоносных пластах, так и в нефтяных месторождениях. В настоящее время в открытом доступе нет оценочных данных о потенциале для хранения CO₂, однако SOCAR (государственная нефтяная компания) выразила заинтересованность в развитии CCUS в регионе (Hellenic Shipping News, 2019). Геологическая служба США опубликовала информацию об нефтегазоносных провинциях Каспийского моря (Smith-Rouch, 2006), однако общедоступная информация о геологическом строении в масштабе бассейна представляется ограниченной (Alizadeh et al., 2017).

Босния и Герцеговина оценивает свой потенциал для хранения в минерализованных водоносных пластах в 296 Мт, основываясь на результатах оценки бассейна Сараево-Зеница (GeoCapacity, 2009). Ее следует рассматривать как первичную оценку в масштабе бассейна; геометрические характеристики коллектора еще не установлены, и требуется дополнительный сбор данных.

Казахстан оценивает свой потенциал для хранения в минерализованных водоносных пластах в 403 Гт (Abuov, 2020), в основном на карбонатных платформах в подсолевом комплексе Прикаспийского бассейна и в надсолевых резервуарах, образованных обломочными породами, защемленными соляным куполом. Информация о методологии оценки имеется в ограниченном объеме, но, как представляется, эта оценка является предварительной.

Северная Македония оценивает потенциал для хранения CO₂ в водоносном пласте вблизи города Кавдарци в 390 Мт (GeoCapacity, 2009) и отмечает, что потенциальный максимальный объем хранения составляет 1050 Мт. Для геологического строения страны характерно преобладание кристаллических пород, которые не подходят для хранения CO₂. Таким образом, оценка основана на исследовании водоносного пласта в отложениях эоцена, покрытых глинами, вода в котором имеет соленость 10 000 частей

на миллион (ppm). Исходя из того, что был определен участок и проведена оценка структурной карты и скважин для выполнения первичного анализа потенциала, этот участок находится на низком уровне готовности для хранения. (Примечание: залежей углеводородов в стране не обнаружено.)

Россия. В отчете Shogenova et al. (2011) Северо-запад России рассматривался в рамках оценки потенциала хранения в водоносных пластах, но в конечном итоге был сделан вывод о недостаточности данных для расчетной оценки потенциала в масштабах всей страны. В этом отчете отмечается, что в европейской части России среднекембрийские песчаники Тискреской свиты являются наиболее перспективным водоносным пластом, хотя многие его участки залегают слишком близко к поверхности. Глубина > 800 м встречается только на юго-востоке Новгородской области, в пределах Московской синеклизы и на расстоянии > 200 км от Эстонской электростанции.

Сербия не публиковала никаких количественных оценок потенциала, но определила 17 потенциальных участков и провела анализ их геологического строения (Komatina-Petrović, 2007). Из восьми выявленных потенциальных участков зона Вардар была отмечена как обладающая наиболее подходящим геологическим строением для хранения CO₂.

Турция провела несколько оценок потенциала хранения, уделяя особое внимание истощающимся нефтяным и газовым месторождениям. Глубокие минерализованные водоносные пласты, обнаруженные в регионе Фракии, Центральной Анатолии и Юго-Восточной Турции, наряду с соляными кавернами содовых шахт, также были определены как потенциальные варианты хранения; на сегодняшний день расчетная оценка потенциала не проводилась (Okandan et al., 2011).

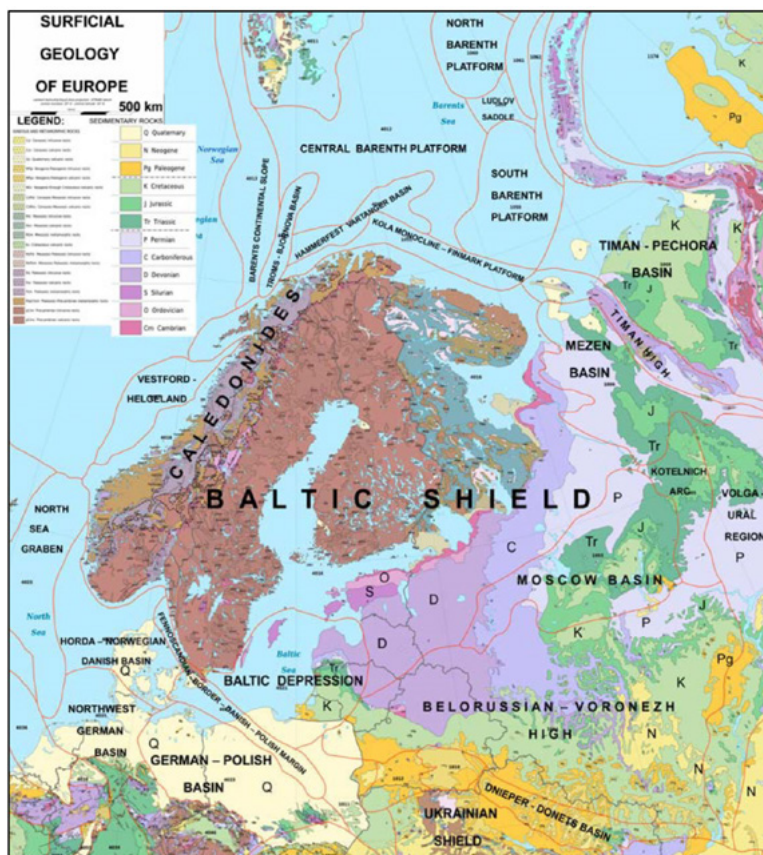
(Примечание: Министерство окружающей среды и

урбанизации Турции (2013 г.) провело оценку потенциала для возможных проектов по повышению нефтеотдачи пластов с использованием CO₂ и сопутствующего хранения, по итогам которой оценочный ресурс месторождений в регионах Батман, Адыяман и Фракия составляет ~ 108 Мт).

Украина, как показано в двух отчетах (Донецкий национальный университет, 2013; Nedopekin et al., 2019), имеет потенциал для хранения в Донбасском регионе, расположенном на востоке Украины и частично на юго-западе России. В отчетах указывается общий потенциал в диапазоне от 45,7 до 428 Гт. Несмотря на то, что детализированных оценок потенциала не производилось, геологическое строение региона было изучено и выявлены несколько перспективных участков в палеозойских отложениях Донбасса, восемь из которых оцениваются как потенциально пригодные (Nedopekin et al., 2019). Этот анализ подразумевает, что некоторые элементы потенциала известны на основе геологических параметров, однако они не представлены в отчете.

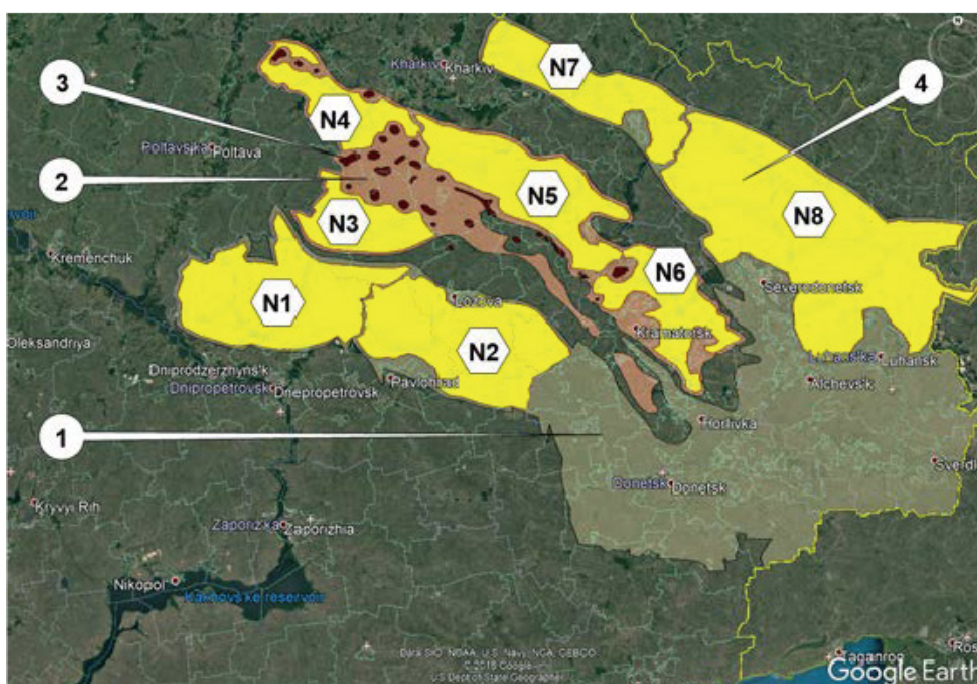
Не удалось найти оценок потенциала хранения CO₂ в водоносных пластах в Армении, Азербайджане, Беларуси, Грузии, Кыргызстане, Молдове, Черногории, Таджикистане, Туркменистане, Украине или Узбекистане.

Рисунок 4 Карта исследуемого региона вблизи границ Эстонии; территория Московского бассейна в России выделена, чтобы показать его протяженность



Источник: Shogeniova et al., 2011

Рисунок 5 Карта перспективных участков для геологического хранения CO₂ (от N1 до N8) с указанием крупных источников выбросов CO₂ (от 1 до 4)



Источник: Nedopekin et al., 2019

4.4 Оценка нефтяных коллекторов в исследуемых странах

При анализе возможностей хранения CO₂ на нефтяных месторождениях, расположенных в исследуемых странах, используются допущения и методологические принципы, описанные выше.

База данных UCube, составленная Rystad Energy, содержит информацию о коллекторах и добыче примерно на 35 000 нефтяных и газовых месторождениях по всему миру и использовалась в публикации Ward et al. (2018) для оценки глобального потенциала хранения CO₂ на нефтяных месторождениях за пределами США. В настоящем анализе применяется подход, использованный в публикации Ward et al. В дополнение к техническим скрининговым критериям, которые включают технологические условия разработки месторождений, для определения подходящих проектов по повышению нефтеотдачи в массиве данных UCube применяются следующие критерии нетехнического характера:

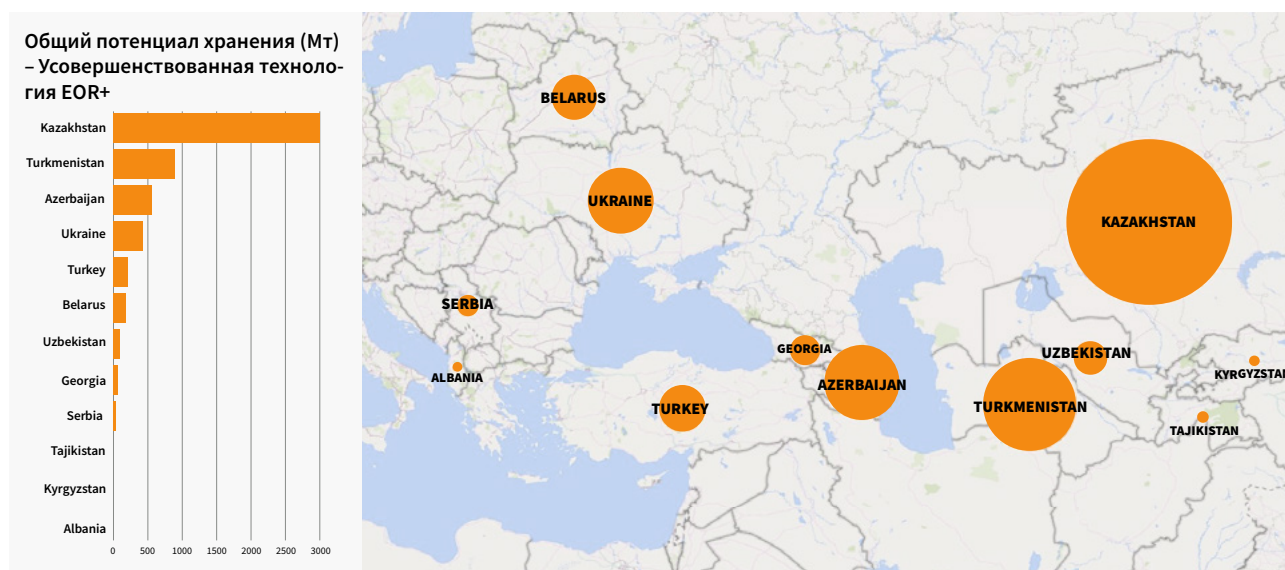
- Рассматривались только заброшенные, эксплуатируемые или находящиеся в стадии имманентной разработки месторождения. Перспективные разработки были исключены, поскольку неизвестно, когда эти коллекторы будут готовы выполнять функцию поглотителей.
- Морские месторождения были исключены из-за их ограниченной значимости в сравнении с потенциалом наземных месторождений.

- Месторождения с небольшим потенциалом для дополнительной добычи были исключены, так как обеспечить окупаемость требуемых инвестиций было бы сложно. К этой категории относятся коллекторы, запасы которых были выработаны более чем на 80% или в которых остаточные запасы нефти составляют менее 10 миллионов баррелей. Исключение было сделано для небольших месторождений, если их можно было привязать к более крупному месторождению, расположенному в пределах 20 км, которое рассматривается в качестве отдельного проекта.

Для коллекторов, включенных в короткий список, в ходе анализа также была определена потребность в CO₂ для разработки каждого потенциального проекта, что, в свою очередь, позволило оценить общее количество CO₂, которое может храниться в рамках проекта с технической точки зрения. Результаты показаны в разбивке по странам на Рисунке 6 для показателя использования CO₂ 0,6 тCO₂/баррель («Усовершенствованная технология EOR+»).

Общий расчетный технический потенциал для хранения CO₂ в регионе составляет около 62 000 Мт CO₂. Российский потенциал, составляющий 56 410 Мт CO₂, настолько огромен, что находится за пределами шкалы измерений и поэтому не отображен на графике. На другой стороне шкалы находятся Армения, Босния и Герцеговина, Молдова, Черногория и Северная Македония, в которых был обнаружен незначительный или нулевой потенциал для хранения CO₂, связанный с технологией EOR.

Рисунок 6 Общий потенциал хранения CO₂ для Усовершенствованной технологии EOR+. Поскольку потенциал России значительно превосходит возможности других стран, он не отображен по графическим причинам



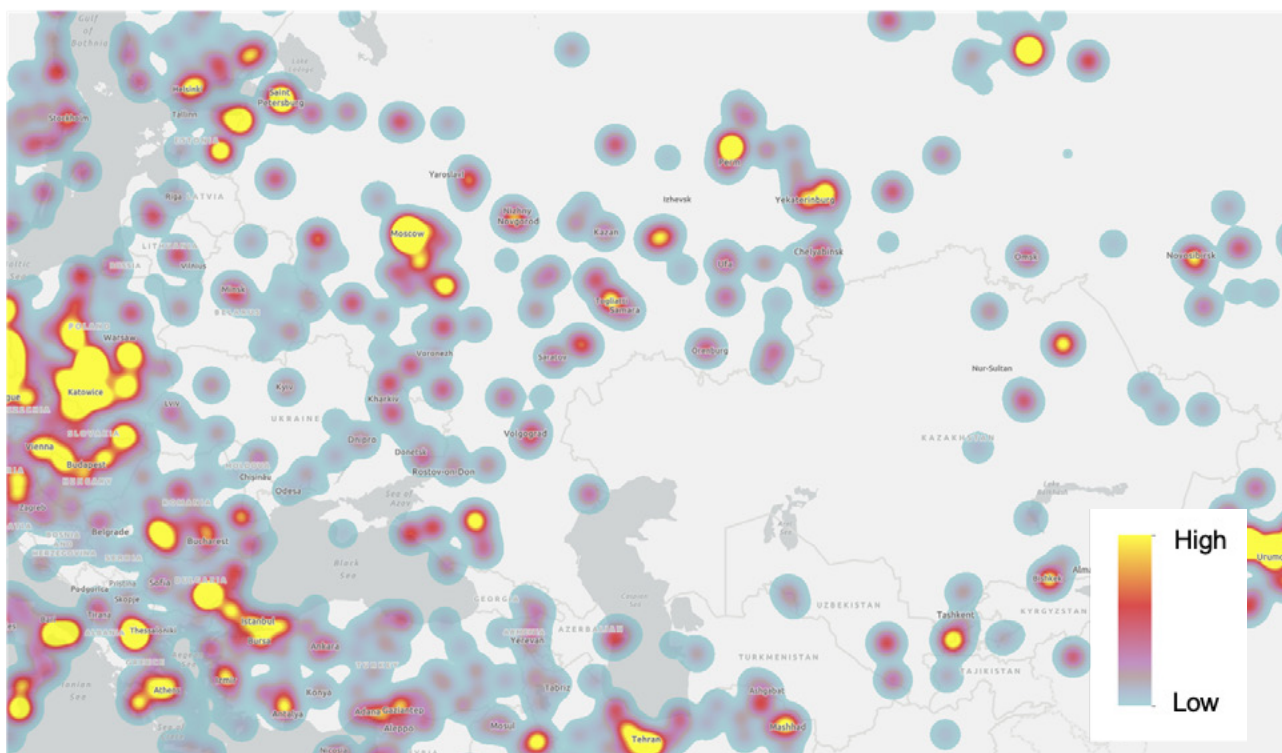
4.5 Объемы предложения CO₂ определяют практически возможные объемы хранения

В предыдущей части доклада предполагалось, что CO₂, предназначенный для хранения в указанных местах, всегда имеется в наличии. Это смелое предположение, поскольку оно подразумевает расположение источников и поглотителей CO₂ в непосредственной близости друг от друга, что в действительности вряд ли осуществимо. Чтобы получить более реалистичное представление о практической значимости хранения CO₂, то есть о том, какой вклад оно может внести в сокращение выбросов, важно понимать сторону предложения CO₂ и, в частности, расположение источников CO₂.

Для этого аналитики могут воспользоваться данными Европейской базы данных о выбросах для глобальных атмосферных исследований (EDGAR, 2017), которая содержит информацию о географическом распределении стационарных источников CO₂, классифицирует их по типу источника и отслеживает их выбросы в прошлом. Источники выбросов, перечисленные в EDGAR, включают:

- Производство электроэнергии из угля или газа
- Производство чугуна и стали
- Производство цемента
- Добыча газа
- Производство удобрений
- Производство этанола

Рисунок 7 Географическое распределение стационарных источников выбросов в 2018 году. Показаны регионы со среднегодовыми объемами выбросов от 5 миллионов тонн (желтый цвет) до 50 тысяч тонн (голубой цвет) CO₂



Источник: База данных Rystad Energy CCS

4.6 Кластеры поставки и хранения CO₂ в целевых странах и регионах

Чтобы определить практически возможный объем хранения CO₂, выбросы из источников необходимо сопоставить с емкостью поглотителей. Ввиду неопределенности в отношении местоположения и потенциала хранения водоносных пластов, существующая информация не позволяет провести такое сопоставление. Ситуация с нефтяными коллекторами является более обнадеживающей. После определения потенциальных источников CO₂ (по данным Rystad Energy CCS database) и спроса на CO₂ (по данным UCube) для возможных проектов по повышению нефтеотдачи были определены перспективные пары спроса/предложения путем выбора ближайшего

источника с достаточным объемом предложения для каждого проекта. При проведении этого сопоставления применялись следующие условия:

- Максимальное расстояние транспортировки CO₂ от источника к поглотителю было произвольно установлено на уровне 500 км.
- Было оговорено, что предложение CO₂ должно быть достаточным для удовлетворения пикового спроса на CO₂ в рамках проекта по повышению нефтеотдачи.
- Политические границы не принимались во внимание, таким образом CO₂ свободно перемещается через государственные границы.

Результаты этого сопоставления показаны на Рисунке 8 и отдельно для России на Рисунке 9.

Рисунок 8 Потенциал хранения и кластеры в регионе Восточной Европы и Центральной Азии для Усовершенствованной технологии EOR с использованием CO₂ из доступных в настоящее время источников

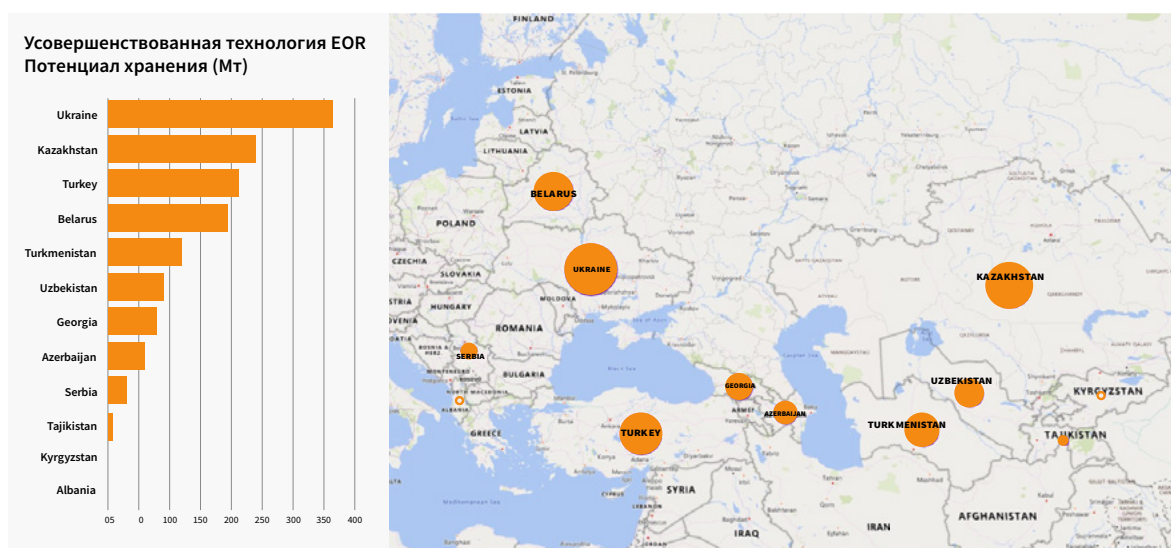
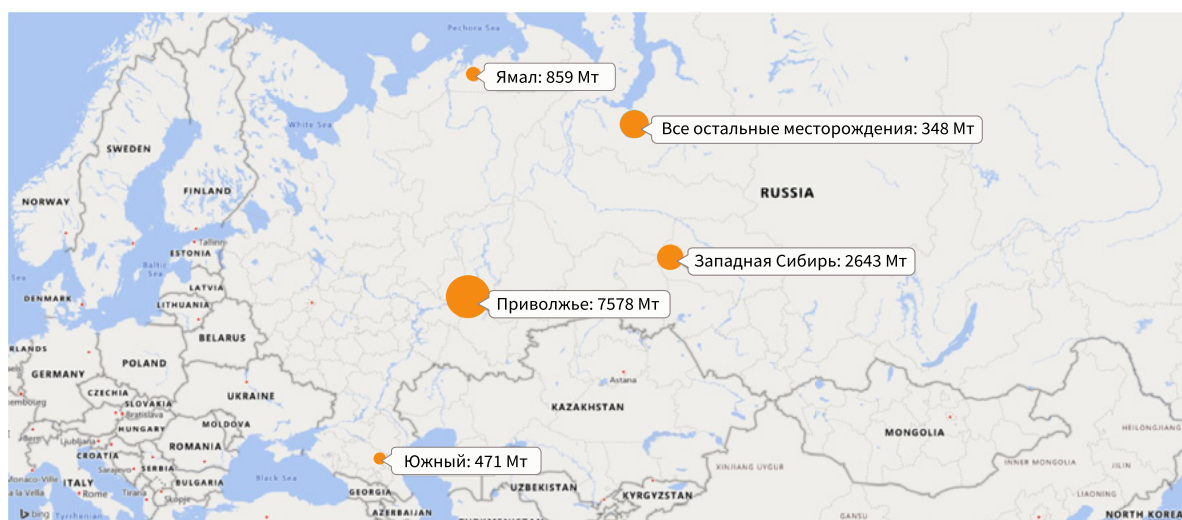


Рисунок 9 Кластеры хранения в России, где применяется Усовершенствованная технология EOR+ с использованием CO₂ из доступных в настоящее время источников



Как видно, большинство (но не все) жизнеспособные проекты могут быть объединены в кластеры, включающие несколько коллекторов, расположенных в непосредственной близости от источника CO₂. Такие кластерные структуры обладают преимуществом в плане наличия общей транспортной инфраструктуры и стабильного спроса на CO₂ в результате агрегирования переменного спроса отдельных проектов по повышению нефтеотдачи. На территории России было определено четыре кластера, в то время как во всех других странах региона имеется только один кластер.

В странах, перечисленных в Таблице 2, потенциал хранения на базе технологии EOR, соответствующий

доступным источникам CO₂, составляет в общей сложности 13 327 Мт CO₂. Для полноты в таблице также представлена сводная информация о потенциале хранения в водоносных пластах.

Как показано в таблице, Россия и Казахстан, в частности, обладают значительным потенциалом для хранения. Реализация этих возможностей подразумевает решение задачи развития транспортной инфраструктуры, где ключевыми вопросами являются способы ее финансирования и регулирования.

Таблица 2 Расчетный потенциал хранения CO₂ на нефтяных месторождениях и в водоносных пластах. Данные по хранению на нефтяных месторождениях учитывают ограничения, связанные с доступностью CO₂, и обозначают практически доступный потенциал

Страна	Применяемые на практике технологии EOR+ [Мт]	Водоносные пласты [Мт]
Албания	0	20
Армения	0	?
Азербайджан	64	?
Беларусь	199	?
Босния и Герцеговина	0	296
Грузия	84	?
Казахстан	246	403
Кыргызстан	0	?
Молдова	0	?
Черногория	0	?
Северная Македония	0	390
Россия - Юг	472	?
Россия - Волга	7,579	?
Россия - Западная Сибирь	2,643	?
Россия - Ямал	859	?
Россия - Другие регионы	348	?
Сербия	34	?
Таджикистан	10	?
Турция	210	?
Туркменистан	122	?
Украина	364	?
Узбекистан	94	?
ВСЕГО	13,327	1,109

4.7 Экономические аспекты хранения CO₂ на нефтяных месторождениях в рассматриваемых странах

Для технологии EOR ключевым финансовым показателем рентабельности является чистая дисконтированная стоимость проекта (ЧДС), которая позволяет сравнить – в текущих значениях – доходы и расходы, возникающие в течение всего периода осуществления проекта. Проекты с положительной ЧДС будут прибыльными. Расчет ЧДС также выявляет основные факторы, способствующие прибыльности; в свою очередь, это актуально для разработки политики стимулирования хранения CO₂ с применением технологии EOR.

Ключевым параметром прибыльности проекта по повышению нефтеотдачи является цена предложения закачанного CO₂, которая может быть отрицательной или положительной. В случае действующих проектов в США, где оператор покупает CO₂, используемый для увеличения нефтеотдачи, цена является отрицательной. Если бы, напротив, оператору платили за долгосрочное хранение CO₂ в рамках схемы сокращения выбросов, являющейся частью климатической политики, цена могла бы быть положительной. В последнем случае на цену предложения CO₂ влияет

стоимость улавливания CO₂ из источников выбросов, стоимость транспортировки до места хранения и тариф на выбросы CO₂, установленный в рамках политики по борьбе с изменением климата. Например, если предположить, что затраты на улавливание и транспортировку составляют 50 долларов США/тCO₂, то цена предложения CO₂ в размере 10 долларов США/тCO₂ будет соответствовать штрафу за выбросы, составляющему 60 долларов США/тCO₂. Независимо от того, является ли цена предложения положительной или отрицательной, она должна быть достаточно высокой, чтобы ЧДС позволяла бы по крайней мере достичь точки безубыточности, т.е. чтобы ЧПС была равна 0.

Детальный расчет ЧДС для всех проектов по повышению нефтеотдачи в вышеуказанных кластерах затруднен и выходит далеко за рамки настоящего исследования. Для него потребовалось бы получить коммерчески важные данные о затратах, а также выполнить моделирование эффективности добычи и хранения для отдельных коллекторов, что, в свою очередь, требует наличия довольно подробной геологической модели пласта-хранилища и коллектора. Однако с помощью упрощений и правдоподобных допущений можно произвести расчетную оценку ЧДС потенциальных проектов, чтобы предоставить рекомендации высокого уровня для выработки политики. Настоящий анализ основан на процедуре оценки, описанной в публикации Ward et al. (2018).

Вставка 2 Стоимость хранения: данные и учитываемые факторы

Затраты на улавливание CO₂ представляют собой самый дорогостоящий элемент технологической цепочки CCUS и варьируются в зависимости от области применения. Институт по разработке технологий улавливания и хранения углерода на глобальном уровне (2017) сообщает следующие данные для первых в своем роде (FOAK) и серийных (NOAK) направлений практического применения:

Долл. США/тCO ₂	Электрогенерация				Промышленные источники				
	Сжигание угольной пыли, суперкрит.	Кислородно-топливное горение, суперкрит.	IGCC	NGCC	Черная металлургия	Цемент	Природный газ	Удобрения	Производство этанола
FOAK	из биомассы	66-75	97	89	77	124	21.5	25.4	21.5
NOAK	55	52	46	43	65	103	20.4	23.8	20.4

IGCC = комбинированный цикл комплексной газификации

NGCC = комбинированный цикл с сжиганием природного газа

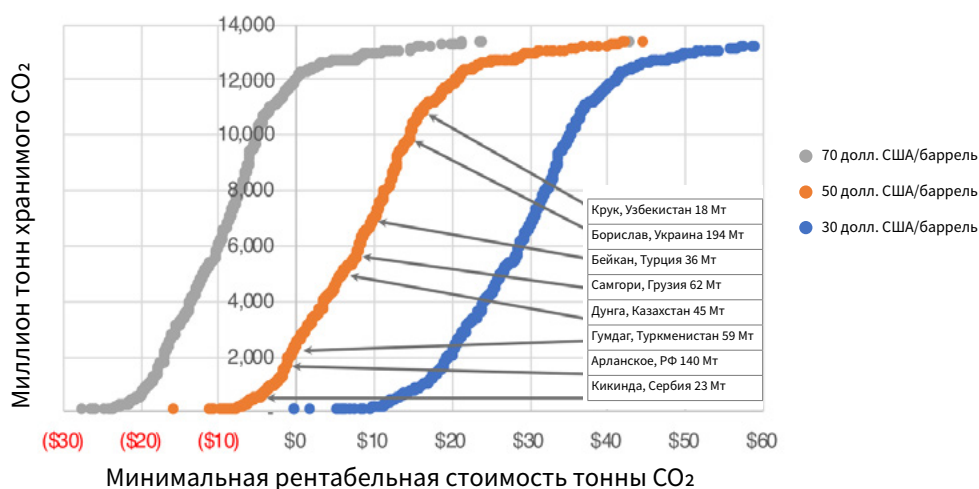
Стоимость наземного трубопровода демонстрирует умеренную экономию за счет масштаба. По данным публикации Morgan and Grant (2014), затраты для объема хранения 3,2 МтCO₂/год составляют 3,10 долл. США/тCO₂/100 миль, а для для объема хранения 30 МтCO₂/год они снижаются до 1,10 долл. США/тCO₂/100 миль.

Затраты на хранение в водоносном пласте варьируются в пределах 7–13 долл. США/тCO₂ в зависимости от свойств коллектора (МЭ США, 2014).

Хранение с применением технологии EOR сопряжено с дополнительными расходами, связанными с бурением уплотнительных скважин, рециркуляцией и сжатием CO₂, которые учитываются при расчете ЧДС.

- Затраты на строительство промышленных объектов в исследуемых странах обычно на 5% ниже затрат в США (Compass Inc, 2015). Энергетические затраты в разных странах сильно различаются в зависимости от наличия газа, угля и электроэнергии.

Рисунок 10 Влияние цены предложения CO₂ на экономический потенциал хранения для проектов EOR в кластерах. Отдельные проекты выделены для наглядности



На Рисунке 10 показаны цены предложения CO₂, при которых ЧДС для всех потенциальных проектов EOR в кластерах выходит на точку безубыточности, а также соответствующие объемы хранимого CO₂. В основе этого количественного показателя лежат расчеты ЧДС, выполненные с использованием того же набора предположений о капитальных затратах, эксплуатационных издержках, добыче нефти и профилях закачки CO₂, что и в публикации Ward et al. Фиксированный коэффициент дисконтирования установлен на уровне 10%.

Как показано на Рисунке 10, цены на CO₂, позволяющие достичь безубыточности, различаются для разных проектов. Кроме того, изменения цен на нефть имеют предсказуемые последствия. Более высокие цены на нефть соответствуют более низким ценам на CO₂, обеспечивающим безубыточность проектов, поскольку производители считают более выгодным использовать CO₂ для увеличения добычи – и будут это делать, даже если им будут меньше платить за хранение CO₂. Как показано на графике, для внедрения технологии EOR во всем регионе цены на поставку CO₂ должны превышать 60 долл. США/тCO₂ при ценах на нефть порядка 50 долл. США/баррель.

5. ПОЛИТИКА В ОБЛАСТИ CCUS

На сегодняшний день разработка и внедрение технологий CCUS не достигли масштабов, необходимых для выполнения их предполагаемой роли в смягчении воздействия на климат.

Учитывая важность CCUS для достижения глобальных целей по сокращению выбросов, необходимы рамочная концепция и стимулы для ускорения их внедрения в коммерческих масштабах. Чтобы обеспечить доверие и легитимность для привлечения международного финансирования по линии борьбы с изменением климата, такую схему необходимо создать на международном уровне под эгидой РКИК ООН и в соответствии с Парижским соглашением, принятым на КС-21.

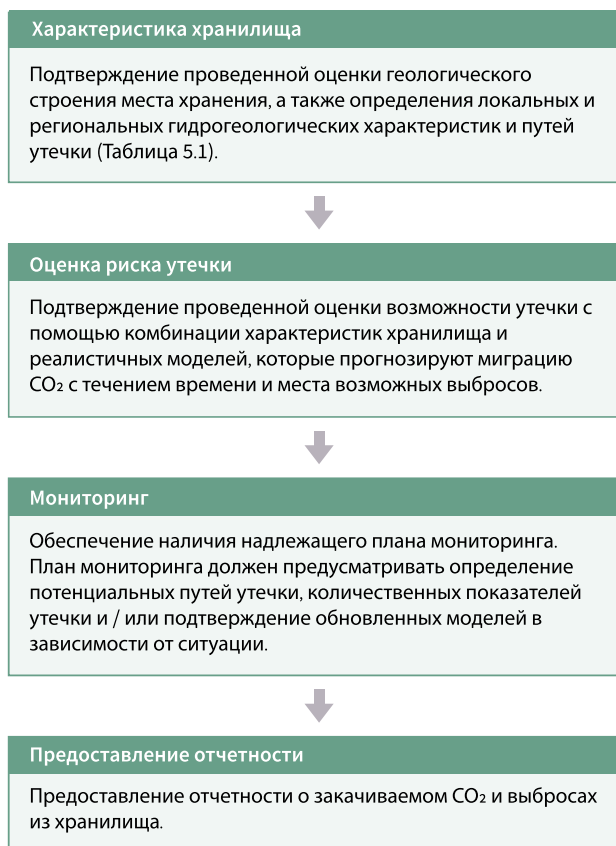
Учитывая масштаб необходимого внедрения CCUS, международные и национальные меры должны дополнять друг друга и основываться на многостороннем сотрудничестве. Различные механизмы, созданные в рамках РКИК ООН для финансирования чистой энергии, могли бы обеспечить соответствующую платформу. Например, в Статье 2 Киотского протокола прямо упоминается геологическое хранение и содержится призыв к Сторонам осуществлять и разрабатывать меры политики, направленные на развитие и более широкое использование технологий секвестрации углерода. Специальный доклад МГЭИК «Улавливание и хранение двуокси углерода» (МГЭИК, 2005) обеспечивает научную и техническую основу для дальнейших мер политики. Важными этапами являются:

- Согласование Руководящих принципов национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК 2006 года (МГЭИК, 2006), что позволило создать международную рамочную основу для мониторинга и предоставления отчетности по сокращению выбросов в результате использования CCUS на страновом уровне. Соглашение предлагает протоколы для определения характеристик объектов, моделирования потенциальных путей утечки и мониторинга, чтобы гарантировать, что закачиваемый CO₂ останется изолированным от атмосферы на неопределенно долгий срок. Фактически, Руководящие принципы устанавливают нормативно-правовую базу высокого уровня по вопросам CCUS (Рисунок 11).
- Согласование в 2012 году условий и процедур применения CCUS в рамках деятельности по проекту чистого развития (РКИК ООН, 2011). Это позволило установить руководящие принципы и гарантии, с помощью которых проекты CCUS могли бы получить сертифицированное сокращение выбросов (ССВ) через Механизм чистого развития (МЧР) Киотского протокола. Таким образом, была

заложена основа для финансирования CCUS в развивающихся странах. Последующий обвал рынка ССВ (конец 2012 года) привел к ослаблению интереса к использованию МЧР для финансирования проектов CCUS.

Рисунок 11 Процедуры оценки выбросов от хранилищ CO₂

Оценка, проверка и предоставление отчетности по выбросам от хранилищ CO₂



Источник: РМГЭИК, 2006 г.

Парижское соглашение, принятое на КС-21, обеспечивает рамочную основу для международного сотрудничества, направленного на сокращение выбросов CO₂, включая схему международных потоков финансирования на цели борьбы с изменением климата. Все подписавшие Соглашение страны устанавливают свои цели по сокращению выбросов в форме определяемых на национальном уровне вкладов (ОНУВ). Используя ряд механизмов и вариантов, изложенных в статье 6, Соглашение позволяет странам приступить к реализации стратегий сотрудничества с другими странами, чтобы достичь целевого уровня, установленного в их собственных ОНУВ, или превзойти его. Статья направлена на открытие новых возможностей для гибкого сотрудничества между

странами в целях достижения результатов по смягчению воздействия на климат, особенно когда они согласуются с общими интересами.

Парижское соглашение, принятое на КС-21, также поддерживает сотрудничество между странами в достижении ОНУВ путем создания «климатических клубов». Это создает возможность для учреждения «клуба CCUS» с основной целью объединить финансовые и технические ресурсы, чтобы сделать внедрение CCUS важной частью стратегий смягчения воздействия на климат как внутри страны, так и посредством многосторонних процессов. Такой клуб не обязательно должен включать все страны, но для внедрения CCUS в него должны вступить мотивированные члены, имеющие технический интерес и финансовые возможности. Со временем состав членов клуба может расширяться, основываясь на продемонстрированных выгодах, извлеченных из первоначального опыта. Развитые страны, для которых технологии CCUS представляют наибольший интерес в долгосрочной перспективе, могут быть заинтересованы в поддержке проектов CCUS в других странах по ряду причин:

- Внедрение CCUS в различных условиях, включая страны, не входящие в ОЭСР, может привести к получению большего объема знаний, чем пилотные и демонстрационные проекты, сосредоточенные на региональном уровне.
- Разработка CCUS возможна с меньшими затратами.
- Выгоды от снижения ущерба в результате изменения климата накапливаются во всем мире, независимо от того, где улавливается и хранится CO₂.

Статья 6 Парижского соглашения, принятого на КС-21, обеспечивает основу для создания механизмов, через которые могут осуществляться совместные действия.

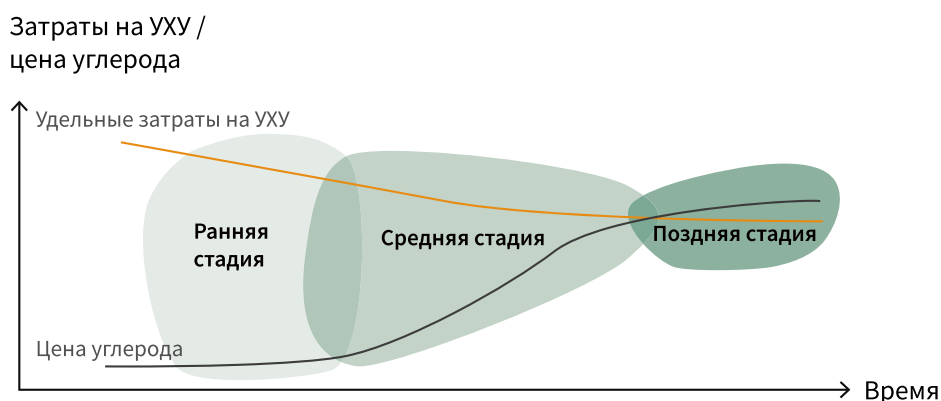
5.1 Инструменты политики для ускорения внедрения CCUS

Как и в случае политического вмешательства в разработку и внедрение технологий, важно разрабатывать меры политики, соответствующие различным этапам зрелости CCUS. Полезно принять точку зрения, согласно которой путь к рынку включает три основных этапа, которые взаимосвязаны и частично совпадают друг с другом (МЭА, 2012; Krahe, 2013; Grubb, 2014) (Рисунок 12).

На первом (раннем) «демонстрационном этапе» устанавливается техническая целесообразность практического внедрения CCUS (МЭА, 2012). На втором (среднем) этапе «формирования рынка» технология приобретает ограниченный рыночный опыт, что, в свою очередь, снижает риски и затраты, тем самым повышая доверие инвесторов. В случае CCUS, первый рыночный опыт в такой форме может быть получен в результате внедрения в конкретных секторах на нишевых рынках, где технология CCUS может быть реализована с низкими затратами, как например, EOR. В конечном итоге, «распространение», представляющее собой третий (поздний) этап на пути внедрения, включает широкомасштабное внедрение, движимое экономией за счет масштаба, развитием инфраструктуры и нормативно-правовой базы, которые в совокупности позволяют CCUS конкурировать с другими вариантами сокращения выбросов CO₂ в качестве отработанной технологии.

Характер, масштаб и сферу охвата инструментов политики необходимо согласовывать с конкретными этапами разработки и внедрения CCUS. Для CCUS требуется не один инструмент, а комплексная рамочная основа, включающая набор инструментов политики, каждый из которых предназначен для удовлетворения потребностей на конкретном этапе разработки технологии.

Рисунок 12 Отдельные этапы развития технологии CCUS могут быть связаны с уровнем удельной стоимости CCUS и строгостью углеродной политики, выраженной в ценах на выбросы углерода



Источник: РМЭА, 2012

Поддержка на раннем этапе

Для поддержки практического применения CCUS на ранних этапах, направленной в первую очередь на стимулирование исследований и разработок, вероятно, потребуются капитальные и операционные субсидии. Столкнувшись с сочетанием технологического риска, недостаточно проработанной нормативно-правовой базой и стратегическими документами, а также с низкими или отсутствующими рыночными доходами, инвесторы будут неохотно вкладывать значительные суммы. Государственное финансирование в виде капитальных и операционных субсидий может гарантировать реализацию демонстрационных проектов CCUS, что позволит получить базовый опыт. Степень участия государственного сектора, по всей вероятности, в разных странах будет различаться в зависимости от таких факторов, как:

- Нахождение соответствующих секторов в собственности государства
- Политические опасения относительно перенесения затрат, связанных с CCUS, на потребителей (например, в электроэнергетическом секторе)
- Стратегическая роль CCUS в развитии технического потенциала страны и реализации ее климатических амбиций

Как правило, этот этап поддержки можно рассматривать как этап «прорыва на политическом уровне», поскольку он предполагает разработку инструментов, приемлемых для технологий, находящихся в докоммерческой стадии.

Поддержка на промежуточном этапе

На данном этапе технология апробирована, но для реализации потенциала снижения затрат необходимо значительное расширение масштабов внедрения. Поскольку выгоды от снижения затрат не будут в полной мере сохраняться за инвесторами, применение политических мер по поддержке CCUS, привязанных к конкретным технологиям, может быть оправданным. В целом, это этап, который в настоящее время успешно проходят многие более развитые технологии в области возобновляемой энергетики.

Меры политики на этом этапе могут включать механизм поддержки на количественной основе, например государственный контракт на закупку или стандартпортфельнарядуполитикойинфраструктурной поддержки. Такая схема может быть реализована, например, посредством обязательства со стороны правительства ежегодно приобретать определенное (и, возможно, увеличивающееся) количество сертификатов хранения на базе технологии CCUS, с получением таких сертификатов на каждую тонну надежно хранимого CO₂.

Более инновационный подход, сочетающий рыночное финансирование с государственным вмешательством, может включать создание «авансовых рыночных обязательств» (АРО). АРО – это юридически обязывающее соглашение, которое поддерживает создание рынка для CCUS, гарантируя заранее приобретение (по фиксированной цене) определенного количества кредитов CCUS для еще недоступной технологии CCUS. За последние десятилетия АРО приобрели известность в сфере общественного здравоохранения, где они обычно используются для продвижения инвестиций в вакцины от «забытых» болезней, которые в непропорциональной степени влияют на население в развивающихся странах. Альтернативные варианты направления государственных средств на экономически эффективную поддержку CCUS, помимо АРО, рассмотрены во Вставке 3.

Однако на национальном уровне этого может быть недостаточно для внедрения CCUS в требуемом масштабе. Международное сотрудничество в сочетании с инструментами формирования рыночного спроса, ориентированными на показатели эффективности, может оказаться необходимым для привлечения необходимых инвестиций с целью ускорения темпов внедрения. Эти усилия могут быть основаны на схеме кредитов за хранение CO₂ для технологий CCUS, примером которой может служить схема, недавно предложенная в публикациях Zakkour and Heidug (2019) и Zakkour et. al. (2020). Особенностью этой концепции является то, что в ней используются варианты международного финансирования мероприятий, связанных с климатом, разработанные в рамках Парижского соглашения, принятого на КС-21 (см. ниже).

Поддержка на продвинутом этапе

Когда технология CCUS будет отработана, следует исходить из предположения, что ее внедрение будет стимулироваться только за счет инструментов выплат за выбросы углерода. Обоснование для использования выплат за выбросы углерода (например, налогов на выбросы углерода и программ ограничения и торговли квотами на выбросы) вытекает из наблюдения, что установление единого тарифа на сокращение выбросов приводит к выравниванию предельных издержек регулируемых фирм. Это обеспечивает снижение выбросов экономически эффективным образом, то есть, максимальное снижение выбросов при минимальных совокупных затратах. Выплаты за выбросы углерода – это инструмент, не зависящий от технологий, поскольку он обеспечивает внедрение технологии CCUS только в тех случаях, когда она является экономически эффективным средством сокращения выбросов, при этом экономическая эффективность повышается за счет предыдущих этапов поддержки, описанных выше.

Вставка 3 Инструменты, ориентированные на показатели эффективности, для формирования рыночного спроса

Помимо АРО, были разработаны другие инструменты формирования рыночного спроса для искусственного создания ренты, что повысило привлекательность инвестиций в CCUS. Три типа инструментов, рассматриваемых в настоящей вставке (Gosh et al., 2012), имеют общую характеристику, а именно предоставление финансовой поддержки постфактум на основании подтвержденного сокращения выбросов.

Прямая покупка

При прямой покупке участники приобретают подтвержденное количество сокращения выбросов, достигнутое при помощи CCUS, непосредственно у центрального органа или правительства. Центральный орган или регулирующий орган предлагает купить сокращения, достигнутые при помощи CCUS, по заранее оговоренной цене за счет государственных средств. Определение того, кто и по какой цене может продавать сокращения выбросов, достигнутые при помощи CCUS, является ключевым вопросом при разработке политики. Распределение средств через обратный аукцион может быть экономически эффективным решением. Центральный орган будет запрашивать заявки у инвесторов в технологии CCUS, в которых будет указываться объем CO₂, который они готовы поставить по заданной цене. Затем центральный орган выбирает заявки с самыми низкими ценами.

Инструмент увеличения суммы выплат

В соответствии с механизмом увеличения суммы правительство увеличивает поступления от продажи подтвержденных сокращений CCUS до предварительно согласованного значения сокращений CCUS. В частности, инструмент может быть структурирован таким образом, чтобы центральный орган выплачивал инвесторам в технологии CCUS или поставщикам сокращений CCUS разницу между согласованной ценой и преобладающей ценой на выбросы углерода (то есть, ставкой налога на выбросы углерода или рыночной ценой разрешений на выбросы), когда сокращения CCUS или соответствующие кредиты поступают на рынок. Если преобладающая цена на углерод превышает согласованную цену, когда инвестор в технологию CCUS готов поставить на рынок достигнутое сокращение выбросов, то центральный орган ничего не платит, обязательства инвестора в технологию CCUS перед покупателем прекращаются, и кредиты просто предлагаются на рынке по более высокой цене. Как и в предыдущем случае, обратный аукцион может быть экономически эффективным решением для внедрения этого инструмента.

Коммерчески реализуемые опционы на продажу

Коммерчески реализуемые опционы дают держателю опциона право продать подтвержденный объем сокращения выбросов по указанной цене до указанной даты. По разным причинам инвестор в технологию CCUS может быть не в состоянии реализовать обещанные сокращения. В этом случае одним из возможных решений могут быть опционные контракты на продажу. Такой контракт наделяет инвесторов в технологию CCUS правом, но не обязанностью, продать финансирующей стороне определенный объем сокращений по определенной согласованной цене к определенному времени (Müller, 2008; Pizer, 2011; Grüll and Taschini, 2011). Если эти контракты будут коммерчески реализуемыми, то когда текущий держатель решит, что он вряд ли будет их использовать, возможность продать их другим инвесторам в технологию CCUS или поставщикам сокращений выбросов, достигнутых при помощи CCUS, гарантирует, что они будут использованы.

Важным аспектом этих инструментов является то, что в первых двух контрактах фиксируется максимальный потенциальный доход (согласованная цена). Опционный контракт, напротив, снимает такое обязательство, поскольку поставщик сокращений, достигнутых при помощи CCUS, может просто продать выбросы на рынке и получить за них рыночную цену. В действительности, если рыночная цена выше согласованной цены, то поставщику сокращений, достигнутых при помощи CCUS, будет выгоднее продавать их на рынке, и опционный контракт не будет исполнен.

Ориентированные на хранение инструменты политики описанного выше типа также могут сыграть роль в поддержке развития инфраструктуры для транспортировки CO₂. Учитывая неопределенность в отношении будущей стоимости мощностей по транспортировке CO₂, инвесторы могут не решиться вкладывать средства в инфраструктуру CCUS, что может привести к недостаточному предложению транспортных услуг. Эта неопределенность снижается с помощью инструментов политики, ориентированных на критерии результативности, которые предлагают долгосрочные контракты, на основе которых правительства «покупают» определенный объем надежно хранимого CO₂ в течение определенного периода времени.

В этом контексте МЭА (2016) предлагает создать государственное агентство в качестве посредника между источниками выбросов и компаниями, занимающимися хранением CO₂. Агентство заключало бы долгосрочные контракты с поставщиками услуг хранения по принципу «поставка и оплата» для развития хранилищ и транспортной инфраструктуры. Эта схема позволяет эффективно устранить риск, связанный с поставкой CO₂, с которым сталкивается поставщик услуг хранения, и может обеспечить экономически обоснованную структуру для развития инфраструктуры для хранения CO₂.

5.2 Схема сертификации для CCUS

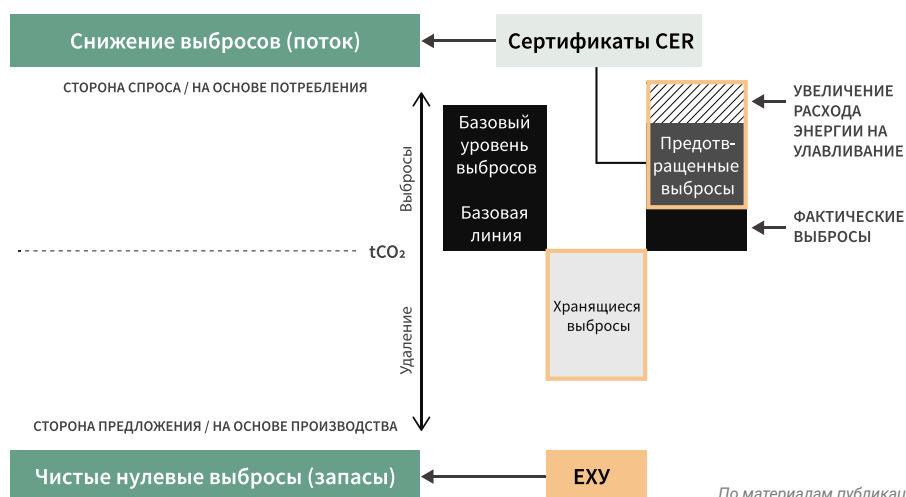
Можно привести веские аргументы в пользу точки зрения, согласно которой политика должна быть направлена на стимулирование элемента хранения – в противоположность улавлианию – в технологической цепочке CCUS. Это позволит поддержать расширение стоков, необходимое для достижения углеродной нейтральности, а также увязать стимулы с

фактической результативностью хранения. Как отмечалось выше, это является обязательным элементом мер политики в области CCUS на промежуточном этапе. Кроме того, по причинам, связанным со снижением инвестиционного риска и изложенным в документе МЭА (2016), стимулирование хранения упростит финансирование проектов CCUS.

В следующем разделе описывается схема международной сертификации хранения, которая будет соответствовать этим требованиям, недавно предложенная Заккуром и Хейдугом (Zakkour and Heidug, 2019, 2020; Zakkour et al.2020). Ключевой особенностью этой схемы будет «единица хранения углерода» (EXU). Как описано выше, клуб CCUS может применять положения Парижского соглашения, принятого на КС-21, для использования EXU в целях создания механизма выпуска кредитов за хранение CO₂ (Zakkour and Heidug, 2019).

EXU будет представлять собой подтвержденную запись о наличии тонны CO₂, надежно хранящейся в геологическом коллекторе (Рисунок 13). Эта концепция аналогична сертификату возобновляемой энергии (REC) (также известному как сертификат зеленой энергии или свободнообращающийся сертификат возобновляемой энергии), который служит доказательством того, что энергия была произведена из возобновляемых источников (например, солнечных или ветровых). Вместе с возложением обязательств по ВИЭ на производителей электроэнергии сертификат REC субсидирует электроэнергию из возобновляемых источников таким образом, чтобы дополнять выплаты за выбросы углерода в атмосферу. Каждый сертификат REC соответствует экологическим выгодам от производства 1 мегаватт-часа (МВт-ч) возобновляемой энергии. Когда организация покупает сертификат REC, от ее имени вырабатывается возобновляемая энергия.

Рисунок 13 EXU – это количественный показатель выбросов углерода, находящихся на хранении. Разница между выбросами, находящимися на хранении, и предотвращенными выбросами возникает из-за затрат энергии на улавливание углерода



По материалам публикации Zakkour and Heidug, 2019

ЕХУ – это нематериальный, коммерчески реализуемый товар, который служит доказательством того, что тонна CO₂ безопасно хранится в геологических формациях. Он не имеет фактической ценности в плане сокращения выбросов, а представляет собой подтвержденный учетный документ геологического хранения CO₂.

Обязательство по закупке ЕХУ, закрепленное в ОНУВ, будет представлять собой финансовый и технологический вклад во внедрение CCUS с неявной сопутствующей выгодой в виде сокращения выбросов. Концепция ЕХУ имеет параллели с другими типами целей, не связанных с парниковыми газами, очевидными в некоторых текущих ОНУВ, такими как мегаватты (МВт) установленной мощности возобновляемых источников энергии, повышения энергоэффективности определенных секторов или электрооборудования или целевые показатели площади земель для лесоразведения. Эти целевые показатели, не связанные с парниковыми газами, выражаются в единицах, отличных от выбросов или поглощения, например, в МВт освоенных источников возобновляемой энергии или в квадратных километрах облесенных земель.

Первоначально спрос на ЕХУ будет создаваться с помощью механизма финансирования деятельности, связанной с климатом, на основе результативности (RBCF) – метода, апробированного в других областях климатической политики. В ситуациях, когда других источников спроса не существуют, RBCF включает создание финансовых потоков из централизованного фонда для закупки количественных единиц сокращения или удаления выбросов. Именно с такой ситуацией столкнутся ЕХУ в переходный период. На практике члены клуба CCUS обязуются закупать ЕХУ и создать фонд, который, используя метод RCBF, включает форвардные контракты на покупку ЕХУ у операторов хранилищ CO₂ по согласованным ценам, в оговоренных объемах и в согласованные сроки.

Помимо создания явной поддержки для хранения CO₂, этот подход аккумулирует и объединяет финансовые ресурсы, чтобы снизить затраты на внедрение для любой отдельно взятой страны. Он также обеспечивает структурные элементы для коммерческого внедрения CCUS на будущих этапах.

Со временем возможен переход от RBCF к механизму, который создаст систематический спрос на ЕХУ. Для этого членам клуба необходимо будет прописать в своих ОНУВ целевые показатели геологического хранения, в зачет которых будет засчитываться приобретение и передача ЕХУ. Сосуществование целевых показателей по геологической секвестрации и сокращению выбросов обеспечило бы двойной стимул для поддержки деятельности в области CCUS, избегая при этом двойного учета; ЕХУ не будут предоставлять членам клуба какие-либо явные права на производство выбросов.

Кроме того, как подробно рассматривалось в публикации Zakkour and Heidug (2020), концепция ЕХУ может быть использована для определения путей декарбонизации ископаемого топлива. Фактически, внедряя CCUS и генерируя ЕХУ за счет хранения, нефтесодобывающие компании могут удалять CO₂ такими темпами, которые позволят странам-импортерам получать нулевые выбросы от конечного использования – в сущности, создавая систему, посредством которой ЕХУ, полученные на стадии добычи, компенсируют выбросы от сжигания ископаемого топлива. Основные политические стимулы для реализации этой стратегии будут включать различные стандарты портфеля низкоуглеродных видов топлива (например, Директива ЕС по возобновляемой энергии II и стандарты низкоуглеродного топлива в штатах США и провинциях Канады).

Таким образом, механизм выпуска кредитов за хранение CO₂, основанный на ЕХУ, может решить некоторые проблемы, которые препятствовали разработке и внедрению CCUS. К его привлекательным аспектам относятся:

- Применимость для широкого круга стран и обстоятельств. Подход ЕХУ представляет собой вариативный механизм, который может быть адаптирован к конкретным национальным условиям, отдельным проектам и наличию других источников финансирования и доходов.
- Механизм хорошо согласуется с текущим уровнем развития технологии CCUS. Учитывая, что установление цен на выбросы углерода вряд ли будет стимулировать значительные инвестиции, ЕХУ добавят дополнительный уровень финансирования для запуска новых проектов CCUS. Схема выпуска кредитов с участием ЕХУ позволяет устранить недостатки политики установления цен на выбросы углерода для CCUS и обеспечивает дополнительную практическую отдачу для отрасли и потребителей, одновременно внося долгосрочный вклад в достижение целей по смягчению воздействия на климат.
- ЕХУ совместимы с архитектурой, механизмами и целями Парижского соглашения, принятого на КС-21. Новый уровень финансирования CCUS может стать неотъемлемым элементом ОНУВ и передаваемых на международном уровне результатов смягчения воздействия на климат (ПМУРПИК). Он также может согласовываться с национальными или региональными схемами установления цен на выбросы углерода и другими программами стимулирования, которые включают CCUS, что позволит ЕХУ повысить уровень амбициозности задач, который можно достичь только с помощью общего ценового сигнала для всех типов технологий сокращения выбросов CO₂.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Два существенных пробела – недостаток информации и политическая приверженность – необходимо восполнить, прежде чем CCUS сможет оказать значимую поддержку в реализации стратегий декарбонизации в странах Юго-Восточной Европы, Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии, а также Российской Федерации и Турции.

Осведомленность о национальном потенциале хранения и его географическом распределении является необходимым условием для любой стратегии декарбонизации с использованием CCUS. Однако, как показывает этот анализ, в подавляющем большинстве этих стран очень часто имеется лишь элементарная, фрагментированная и неполная информация, особенно в отношении потенциала хранения в водоносных пластах. Несколько лучше обстоят дела с хранением на нефтяных месторождениях, но необходимы усилия для обеспечения и улучшения согласованности и качества имеющихся данных.

Проведение качественной оценки бассейнов, пригодных для хранения CO₂, могло бы стать первым шагом к восполнению этого пробела. Рассмотрение вопроса в настоящем докладе может стать основой для систематического подхода к классификации бассейнов с использованием установленных геологических критериев. Такой анализ можно было бы выполнить силами группы экспертов в короткие сроки и, предположительно, при скромном бюджете.

Логическим продолжением этой работы будут количественные оценки потенциала хранения бассейнов, определенных в качестве пригодных. Чтобы облегчить сравнение результатов национальных оценок, важным аспектом является четкое указание используемых методологий оценки. Руководящие указания по повышению согласованности оценок хранилищ даны в публикации МЭА (2013), которая основывается на рекомендациях экспертов, предлагающих передовые методы. Хотя эти усилия могут быть предприняты национальными геологоразведочными организациями, они должны координироваться на международном уровне для обеспечения совместности оценок.

Низкий уровень вовлеченности отражает неуверенность со стороны различных заинтересованных сторон; эту проблему можно было бы решить с помощью механизмов политики, которые обеспечили бы стимулы для инвестиций в технологии CCUS, их разработку и внедрение. В некоторых странах ОЭСР были приняты меры политики по поддержке CCUS, в том числе Система торговли выбросами ЕС и налоговая субсидия для CCUS, предусмотренная в разделе 45Q Налогового кодекса США. На сегодняшний день страны, не входящие в ОЭСР, не создали политических

механизмов, которые могли бы привлечь частные инвестиции в поддержку внедрения CCUS. Разработке соответствующего политического механизма для регионов, рассматриваемых в настоящем докладе, следует рассматривать как международную задачу по развитию внутрирегионального сотрудничества и демонстрации широкой глобальной приверженности. По указанным выше причинам механизм должен быть привязан к конкретной технологии и направлен на упрощение внедрения CCUS на международном уровне.

Схема сертификации для CCUS, согласующаяся с Парижским соглашением, принятым на КС-21 и действующая под эгидой РКИК ООН, могла бы стать вполне жизнеспособным решением. Для создания такой схемы сертификации CCUS потребовалась бы политическая поддержка и участие ключевых стран, заинтересованных в CCUS, включая США и ЕС. Необходимо было бы провести дополнительную работу по определению структуры управления и установлению правил и механизмов ее функционирования. Правила выпуска кредитов, включая выбор и мониторинг площадок, могли бы базироваться на существующих стандартах РКИК ООН (МГЭИК, 2005) для CCUS. Также необходимо будет выработать подход к ведению учета, в частности, чтобы избежать двойного учета сокращения выбросов.

Такой механизм CCUS вписался бы в формирующийся международный ландшафт политики в области изменения климата. Поскольку страны и регионы заявляют о своих амбициях достичь целевого уровня нулевых выбросов во второй половине этого века, существует необходимость в мерах политики, которые обеспечили бы возможность стоимостной оценки и монетизации деятельности по увеличению стоков, а также других типов технологий удаления углерода, включая геологическую секвестрацию, прямое улавливание из воздуха и лесное хозяйство (G20, 2020). Схема сертификации CCUS рассматриваемого типа будет способствовать использованию значительного потенциала хранения геологических поглотителей углерода, в той степени, в которой, согласно данным различных исследований, это необходимо для достижения целей по обеспечению нулевого баланса выбросов.

ПРИЛОЖЕНИЕ: КЛАССИФИКАЦИЯ РЕСУРСОВ ДЛЯ ПРОЕКТОВ ХРАНЕНИЯ CO₂

Классификация ресурсов – это концепция, которая применялась в горнодобывающей, а также нефтегазовой промышленности на протяжении многих десятилетий; в мире имеется несколько признанных систем классификации. Общим элементом систем, применяемых в настоящее время отраслью и регулирующими органами, является то, что они классифицируют ресурсы на основе технической и экономической зрелости проектов, направленных на добычу и продажу этих ресурсов.

Система управления нефтяными ресурсами², опубликованная Обществом инженеров нефтегазовой промышленности и другими организациями (SPE-PRMS), широко используется в нефтегазовой отрасли во всем мире. Таким образом, эта система хорошо известна как отрасли, так и регулирующим органам, а также сообществу инвесторов. Ресурсы классифицируются в соответствии с уровнем зрелости проектов нефтедобычи, также называемым «вероятностью коммерческой рентабельности» каждого проекта.

Система SPE-PRMS классифицирует ресурсы нефти и газа следующим образом:

- **Запасы** – открытые ресурсы, которые могут добываться на коммерческой основе.
- **Условные ресурсы** – открытые ресурсы, в отношении которых сохраняется определенный уровень условных ограничений, прежде чем их можно будет классифицировать как коммерческие.
- **Перспективные ресурсы** – ресурсы, которые еще предстоит открыть
- Каждый основной класс делится на подклассы и категории, в зависимости от зрелости проектной деятельности.

Рамочная классификация ресурсов Организации Объединенных Наций (РКООН)³ представляет собой еще одну основанную на проектах систему классификации ресурсов, разработанную ЕЭК ООН для определения экологической и социально-экономической жизнеспособности и технической осуществимости проектов по разработке ресурсов на проектах система классификации, определения экологической, социально-экономической жизнеспособности и технической осуществимости проектов по освое-

нию ресурсов. Она обеспечивает последовательную основу для характеристики степени достоверности оценок будущих объемов производства в рамках соответствующего проекта.

Такие термины, как «ресурсы» и «запасы» намеренно избегаются в РКООН. Это основанная на принципах система, в которой продукты проекта, связанного с освоением ресурсов, классифицируются – с использованием системы числового кодирования – на основе трех основных критериев: экологическая, социально-экономическая жизнеспособность (E); техническая осуществимость (F); и степень достоверности оценки объемов (G).

- **Ось E** определяет степень благоприятности экологических, социальных и экономических условий для обеспечения жизнеспособности проекта, включая учет рыночных цен и соответствующих юридических, нормативных, природоохранных и договорных условий.
- **Ось F** определяет степень проработки технологий, исследований и принятых обязательств, необходимых для осуществления проекта. Эти проекты находятся в диапазоне от первых концептуальных исследований до полностью проработанного действующего проекта.
- **Ось G** обозначает степень достоверности оценки объема продукции, получаемой в результате осуществления проекта.
- Категории и подкатегории являются «строительными блоками» системы и объединяются в «Классы».

РКООН увязана с некоторыми другими системами классификации с помощью так называемых связующих документов, включая SPE-PRMS.

[2] Последнее обновление за 2018 год можно скачать на веб-сайте www.spe.org

[3] Издание 2019 года и спецификации для его применения доступны на веб-сайте ЕЭК ООН: www.unece.org

РКООН применительно к проектам закачки с целью геологического хранения

В последние годы Группа экспертов ЕЭК ООН по управлению ресурсами (EGRM) также разработала спецификации для применения РКООН к другим энергетическим товарам, включая несколько проектов по освоению возобновляемых источников энергии и проектов закачки для целей геологического хранения, как например, для хранения CO₂. Проекты по добыче ресурсов заменяются проектами по закачке, а соответствующие количественные показатели отражают возможные объемы, которые могут храниться в резервуарах-реципиентах в результате различных проектов по закачке с учетом определенных проектных мероприятий и издержек. Далее эти количественные показатели можно классифицировать на основе тех же категорий E, F и G. Спецификации к проектам закачки были впервые опубликованы в 2016 году⁴.

Спецификации к проектам по закачке включают определения и вспомогательные пояснения для каждой категории и подкатегории. Для категорий E и F количественные показатели представляют определенный уровень развития. Подкатегории в Категории G представляют собой «низкую», «наилучшую» и «высокую» оценку количества или, другими словами, неопределенность оценки хранящихся количеств. Категории и подкатегории E, F и G могут быть объединены в классы, определяющие уровень зрелости проекта по закачке. В Таблице А.1 показаны наиболее часто используемые комбинации, но и другие комбинации могут быть в равной степени допустимыми в зависимости от специфики оцениваемых проектов.

Таблица 13 Классы РКООН, определяемые категориями и подкатегориями, применительно к проектам по закачке

Классы РКООН-2009, определяемые категориями и подкатегориями, применительно к проектам по закачке в целях геологического хранения									
Общий потенциал геологического хранения	Потерянные количества								
	Закачанные и хранящиеся количества								
		Класс	Категории			Подкласс	Категории и подкатегории		
			E	F	G		E	F	G
	Будущий потенциал хранения коммерческих проектов по закачке	Коммерческие проекты по закачке	1	1	1,2,3	Активная закачка	1	1.1	1,2,3
						Утверждены к реализации	1	1.2	1,2,3
						Обоснованы для реализации	1	1.3	1,2,3
	Будущий потенциал хранения в известных резервуарах коммерческих проектов по закачке	Возможные коммерческие проекты по закачке	2	2	1,2,3	Ожидающие реализации	2	2.1	1,2,3
						Реализация задержана	2	2.2	1,2,3
		Некоммерческие проекты по закачке	3	2	1,2,3	Вопрос о реализации неясен	3.2	2.2	1,2,3
Реализация нерентабельна						3.3	2.3	1,2,3	
Хранение невозможно		3	4	1,2,3	Хранение невозможно	3.3	4	1,2,3	
Будущий потенциал хранения коммерческих проектов по закачке в неразведанных резервуарах	Изыскательские проекты	3	3	4	Выявленный потенциал геологического хранения	3.2	3.1	4	
					Указанный потенциал геологического хранения	3.2	3.2	4	
					Прогнозный потенциал геологического хранения	3.2	3.3	4	
Хранение невозможно		3	4	4	Хранение невозможно	3.3	4	4	

[4] С ними можно ознакомиться на веб-сайте ЕЭК ООН в разделе Areas of Work (Направления работы) наряду с другими спецификациями для конкретных товаров.

Общий потенциал геологического хранения оцениваемой территории или портфеля проектов представляет собой сумму всех количеств, которые были и будут размещены на хранение в результате действующих и/или запланированных проектов, а также количеств, которые могут быть размещены на хранение в результате будущих, еще не определенных проектов по закачке (изыскательские проекты). Он также может включать количества, соответствующие площадям или резервуарам, хранение в которых по определенной причине невозможно. Эта последняя категория сопоставима с неизвлекаемыми объемами в нефтегазовых проектах.

Коммерческие проекты по закачке это те проекты, которые имеют подтвержденную коммерческую целесообразность. Они могут быть или не быть коммерческими в традиционном смысле; при условии подтверждения экологической, социально-экономической жизнеспособности и технической осуществимости проекта, проект можно классифицировать как коммерческий⁵. Его также можно отнести к подклассу экономически целесообразного для самостоятельной разработки (E1.1) или к подклассу проектов, которые становятся жизнеспособными за счет государственных субсидий и / или исходя из других соображений (E1.2). (Не показано в Таблице A.1).

Подкатегории F3 были разработаны специально для применения к проектам по закачке, чтобы облегчить дифференциацию изыскательских проектов на разных этапах оценки до того, как будет определен конкретный проект по закачке.

SPE-SRMS - Система управления ресурсами хранения

В 2017 году Общество инженеров нефтегазовой промышленности также опубликовало версию своей системы управления ресурсами, адаптированную для хранения CO₂ – Систему управления ресурсами хранения (SPE-SRMS)⁶. Она базируется на системе SPE-PRMS и следует аналогичным принципам классификации ресурсов хранения на основе проектов. Ресурсы хранения классифицируются следующим образом:

- Потенциал хранения – количества, которые, как ожидается, будут коммерчески доступны в описанной геологической формации в результате реализации проектов по освоению ресурсов.
- Условные ресурсы хранения – потенциально доступные количества в известных геологических формациях, где применяемые проекты еще не считаются достаточно проработанными для коммерческого освоения.
- Неоткрытые ресурсы хранения – пригодность для хранения в целевой геологической формации не определена.

Подклассы зрелости проекта также определяются в соответствии с системой SPE-PRMS (Таблица A.2).

[5] В спецификациях РКООН для проектов по закачке по-прежнему используется термин «коммерческие проекты». В обновленной редакции 2019 года этот термин заменен на «жизнеспособные проекты», определяемые как проекты, имеющие подтвержденную экологическую, социально-экономическую жизнеспособность и техническую осуществимость.

[6] The complete SPE-SRMS document is available at www.spe.org

Таблица А.2 Классы и подклассы SPE-SRMS на основе зрелости проекта

СОВОКУПНЫЕ РЕСУРСЫ ХРАНЕНИЯ	ОТКРЫТЫЕ РЕСУРСЫ ХРАНЕНИЯ	STORED		Подклассы по зрелости проекта		
		ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНЫЕ	ПОТЕНЦИАЛ	Ведется закачка		
				Разработка утверждена		
				Разработка обоснована		
		ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НЕЦЕЛЕСООБРАЗНЫЕ	УСЛОВНЫЕ РЕСУРСЫ ХРАНЕНИЯ	Разработка ожидается		
				Разработка приостановлена		
	Разработка не обоснована					
			НЕДОСТУПНЫЕ			
	НЕОТКРЫТЫЕ РЕСУРСЫ ХРАНЕНИЯ	ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РЕСУРСЫ ХРАНЕНИЯ	Перспективный поисковый объект (Prospect)			
			Недостаточно изученная структура (Lead)			
Направление поисково-разведочных работ (Play)						
		НЕДОСТУПНЫЕ				
		← ДИАПАЗОН НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ →				
				↑ ПОВЫШЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ КОММЕРЧЕСКОЙ РЕНТАБЕЛЬНОСТИ		

Хранимые количества также классифицируются на основе степени неопределенности. Что касается потенциала хранения, то оценки количества подразделяются на доказанный, вероятный и возможный потенциал, что идентично классификации запасов в системе PRMS. Потенциал хранения также может подразделяться на освоенный потенциал (проекты, в рамках которых осуществляется закачка и хранение) и неосвоенный потенциал (проекты, в рамках которых закачка еще не началась).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

AAPG (2020). Robertson Basins and Plays – Sedimentary Basins of the World. Available at: www.arcgis.com/home/item.html?id=9845f1f30a1641efbe54dd1f9c8c668b Accessed on X December 2020.

Abuov, Seisenbayev, and Woojin Lee (2020). CO₂ storage potential in sedimentary basins of Kazakhstan. Int.J. Greenh. Gas Control, vol. 103, No. 103186 (December).

Alizadeh, A., Guliyew, I.S., Kadirov, F.A., and L.V. Eppelbaum (2017). Geosciences of Azerbaijan – Volume II: Economic Geology and Applied Geophysics. Springer. E-book.

Bachu, Stefan (2003). Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media. Environmental Geology, vol. 44, No. 277-289 (March).

Compass International Inc. (2020). Industrial/Commercial Construction Cost Engineering Data. Available at: <https://compassinternational.net/product/global-construction-costs/>

Cook, Peter (2012). Clean energy, climate and carbon. Balkema, Netherlands: CRC Press.

Donetsk National University (2013). Guidelines for the Implementation of CCT and CCUS technologies in the Eastern region of Ukraine. Part II, 30 December.

EU GeoCapacity (2009). Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide. Available at: www.geology.cz/geocapacity

G20 (2020). Achieving net-zero in the G20: A novel supply-side climate policy to value carbon sinks, 10 December 2020. Available at: www.g20-insights.org/policy_briefs/achieving-net-zero-in-the-g20-a-novel-supply-side-climate-policy-to-value-carbon-sinks

Global CCUS Institute (2017). Cost of Carbon Capture and Storage, June 2017.

Ghosh, Arunabha, Müller, B., Pizer, W., and G. Wagner (2012). Mobilizing the Private Sector: Quantity- Performance Instruments for Public Climate Funds. Oxford Energy and Environment Brief.

Grubb, Michael (2014). Planetary Economics. Taylor & Francis: London.

Grüll, G., and Taschini, L. (2011). Cap-and-Trade Properties under Different Hybrid Scheme Design, Journal of Environmental Economics and Management, vol. 61, No. 1 (January).

Interview: Azerbaijan's SOCAR not concerned about future gas sales (2019). Hellenic Shipping News, 14 December. Available at: www.hellenicshippingnews.com/interview-azerbaijans-socar-not-concerned-about-future-gas-sales/.

IEA (International Energy Agency) (2013). Methods to assess geologic CO₂ storage capacity: status and best practice. Workshop, September 2013. Paris.

-(2015). Storing CO₂ through Enhanced Oil Recovery. Paris.

-(2016). Disaggregating CCUS - Spurring storage and other parts of the CCUS value chain. In: 20 years of carbon capture and storage: Accelerating future deployment. November 2016. Paris.

-(2019). Putting CO₂ to Use. September 2019, Paris.

International Energy Agency Greenhouse Gas Programme (2009). CO₂ Storage in Depleted Oilfields: Global application criteria for carbon dioxide enhanced oil recovery, 2009-12, December 2009. Available at: https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2009-12.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change (2005). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

-(2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2006. Japan.

-(2018). Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global

response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty, 2018. Cambridge.

Kearns, Jordan, Teletzke, G., Palmer, J., Thomann, H., Keshgi, H., Chen, Y.-H., Paltsev, S., and H. Herzog (2017). Developing a consistent database for regional geologic CO₂ capacity worldwide. *Energy Procedia*, vol. 114, No. 4697-4709 (July).

Kelemen, Peter, Benson, S., Pilorgé, H., Psarras, P., and J. Wilcox (2019). An Overview of the Status and Challenges of CO₂ Storage in Minerals and Geologic Formations. *Frontiers in Climate*, vol. 1, No. 9 (November).

Komatina-Petrovic, Snežana (2007). *Geology of Serbia and Potential Localities for Geological Storage of CO₂*. Available at: www.geology.sk/co2neteast/documents/workshop_zagreb/Snezana_Komatina-Petrovic-Geology_of_Serbia_and_potential_localities_for_geological_storage_of_CO2.pdf Accessed on January 2021.

Mallon, Wim, Buit, L., Wingerden, J.v., Lemmens, H., and N.H. Eldrup (2013). Cost of CO₂ Transportation Infrastructure Markets, *Energy Procedia*, vol. 37, No. 2969-2980.

Marcantonini, Claudio, Teixido-Figueras, J., Verde, S.F. and X. Labandeira, X. (2017). Low-carbon Innovation and Investment in the EU ETS. Policy Brief from Robert Schuman Centre for Advanced Studies, vol. 2017/22 (July).

McGlade, Christopher and Paul Etkins (2015). The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2 °C. *Nature*, vol. 517, No. 187-190 (January).

Morgan, D. and T. Grant (2014). FE/NETL CO₂ Transport Cost Model: Model Overview. Presentation DOE/NETL-2014/1668. National Energy Technology Laboratory, Pittsburgh, PA

Müller, Benito (2008). Bonn 2007: Russian Proposals, Policy CDM and 'CER Put Options' (CERPOs). Oxford Institute for Energy Studies, Energy and Environment Comment.

Nedopekin, F., Shestavin, N., and V. Yurchenk (2019). Prospects of implementation of carbon dioxide capture and geological storage technologies in the Donbass for mitigation of the effects of climate change, *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, vol. 6 (September).

Okandan, Ender, Karakece, Y., Çetin, H., Topkaya, I., Parlaktuna, M., Akın, S., Bulbul, S., Dalha, C., Anbar, S., Cetinkaya, C., Ermis, I., Yılmaz, M., Ustun, V., Yapan, K., Erten, A.T., Demiralın, Y., and E. Akalan (2011). Assessment of CO₂ storage potential in Turkey, modeling and a prefeasibility study for injection into an oil field. *Energy Procedia*, vol. 4. Available at: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211007314

Pizer, William (2011). Seeding the market: Auctioned Put Options for Certified Emissions Reductions, Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, Duke University.

Ranathunga, A.S, Ranjith PG, and MSA Perera (2017). Challenges and issues for CO₂ storage in deep coal seams. In *Rock Mechanics and Engineering Volume 4*, Wiltshire, UK: CRC Press.

Santos, Stanley (2012). CO₂ Transport via Pipeline and Ship. Available at: https://ieaghg.org/docs/General_Docs/IEAGHG_Presentations/3_CO2_Transport_Overview_-_S._Santos_IEAGHG.pdf. Accessed December 2020.

Shogenova, Alla, Shogenov, K., Vaher, R., Ivask, J., Sliupa, S., Vangkilde-Pedersen, T., Uibu, M., and R. Kuusik (2011). CO₂ geological storage capacity analysis in Estonia and neighbouring regions. *Energy Procedia*, vol. 4. Available at: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211003791

Taschini, Luca (2020). Flexibility Premium of Emission Permits. *Journal of Economic Dynamics and Control*. Available at: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165188920301810?dgcid=author

Thibeau, S., and V. Mucha (2011). Have We Overestimated Saline Aquifer CO₂ Storage Capacities?, *Oil & Gas Science and Technology*, vol. 66 No. 1 (March).

Turkey, Ministry of Environment and Urbanization (2013). Technical Assistance for Developed Analytical Basis for Formulating Strategies and Actions Towards Low Carbon Development. Available at: www.lowcarbonturkey.org/wp-content/uploads/2018/05/LCDTR-Activity-1.1.1.-Status-Report.pdf

United Nations Framework Classification for Resources 2016 (UNFC). Available at: <https://unece.org/unfc-and-injection-projects-0>

United Nations Framework Convention on Climate Change (2011). Modalities and procedures for carbon dioxide

capture and storage in geological formations as clean development mechanism project activities, 09 November. Available at: https://unfccc.int/files/meetings/durban_nov_2011/decisions/application/pdf/cmp7_carbon_storage.pdf

US Department of Energy (2014). CO₂ saline storage model: model description and baseline results. National Technology Energy Center, July 2014.

Ward, Colin, Wolfgang Heidug (2018), and Nils-Henrik Bjurstrøm. Enhanced Oil Recovery and CO₂ Storage Potential Outside North America: An Economic Assessment. Report King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC), Riyadh.

Zakkour, Paul, and Wolfgang Heidug (2019). A Mechanism for CCUS in the Post-Paris Era. Report King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC). Riyadh.

-(2020). Supply-side Climate Policy for Crude Oil Producers. Report King Abdullah Petroleum Studies and Research Center (KAPSARC). Riyadh.

Zakkour, Paul, Heidug, W., Howard, A., Haszeldine, R.S., Allen, M.R., and D. Hone (2020). Progressive supply-side policy under the Paris Agreement to enhance geological carbon storage, *Climate Policy*, vol. 21, No. 1 (January).

Геологическое хранение CO₂ в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии: первичный анализ потенциала и политики

Этот отчет представляет собой исследование потенциала хранения CO₂ в Восточной Европе, на Кавказе и в Центральной Азии, что может поддержать достижение Целей устойчивого развития и достижение углеродной нейтральности.

В этом исследовании выделяются инструменты и методологии, которые могут использовать страны для оценки потенциала и разработки политики в поддержку улавливания, использования и хранения углерода (CCUS), что может сделать технологии CCUS реальностью быстрее.

United Nations Economic Commission For Europe

Palais des Nations
CH - 1211 Geneva 10, Switzerland
Telephone: +41(0)22 917 12 34
E-mail: unece_info@un.org
Website: <http://www.unece.org>