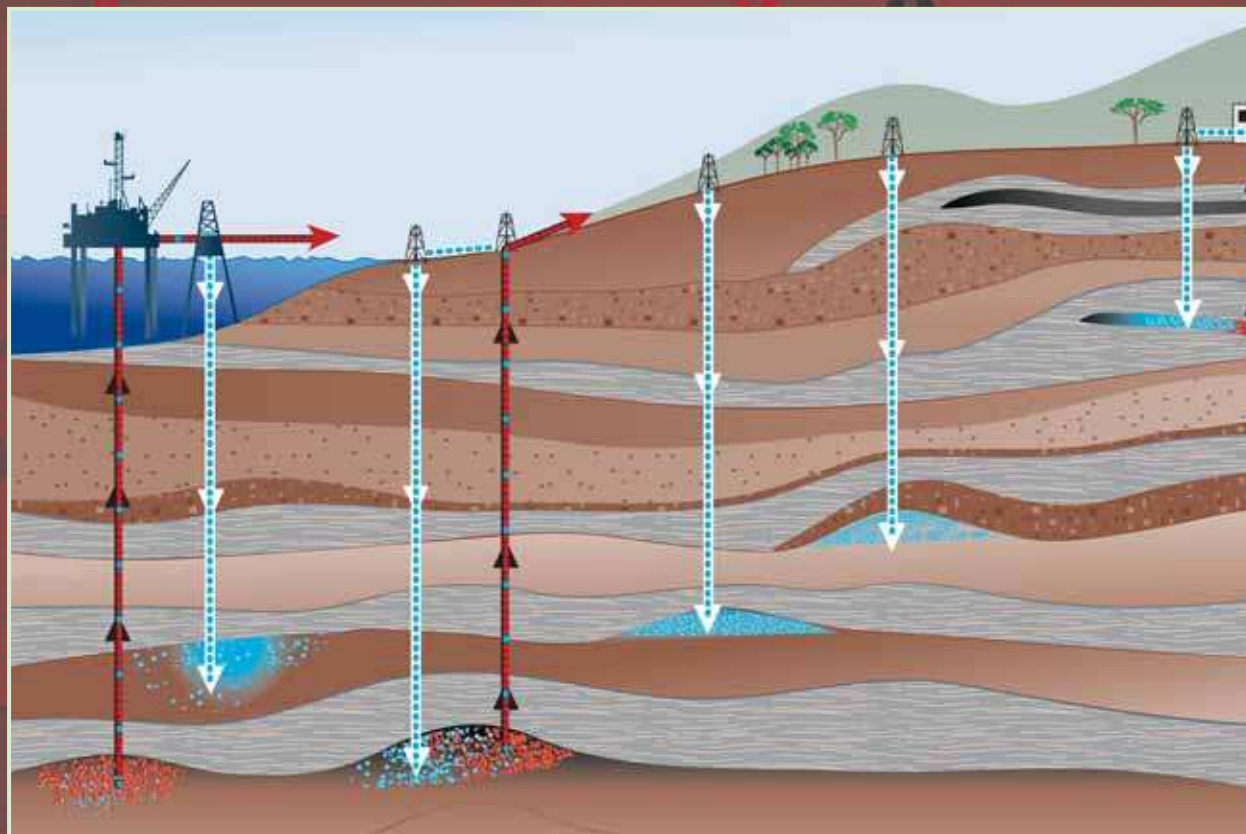


УЛАВЛИВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА

Резюме для лиц, определяющих политику,
и Техническое резюме



Межправительственная группа экспертов
по изменению климата



Специальный доклад МГЭИК

Улавливание и хранение двуокиси углерода

Резюме для лиц, определяющих политику

Доклад рабочей группы III МГЭИК

и

Техническое резюме

Доклад, принятый рабочей группой III МГЭИК,
но утвержденный в общем виде

Редакторы:

Берт Метц, Огунладе Дэвидсон

Хелен де Конинк, Мануэла Лоос, Лео Мейер

Этот доклад подготовлен Межправительственной группой экспертов по изменению климата по просьбе Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата

© 2005, Межправительственная группа экспертов по изменению климата

ISBN 92-9169-419-3

Предисловие

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) была учреждена совместно Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО) и Программой Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП) в 1988 г. Ее круг полномочий включает: (i) оценку имеющейся научной и социально-экономической информации об изменении климата и его последствиях, а также о вариантах смягчения последствий изменения климата и адаптации к нему, и (ii) предоставление по запросу научных, технических и социально-экономических консультаций для Конференции Сторон (КС) Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН). С 1990 г. МГЭИК выпустила серию докладов об оценках, специальные доклады, технические документы, методологические пособия и другие публикации, которые стали стандартной справочной документацией, широко используемой лицами, принимающими политические решения, учеными и другими экспертами.

На КС-7 был принят проект решения о том, чтобы просить МГЭИК подготовить технический документ о технологиях геологического хранения углерода^a. В соответствии с этой просьбой на своей двадцатой сессии, проведенной в 2003 г. в Париже, Франция, МГЭИК постановила подготовить Специальный доклад об улавливании и хранении двуокиси углерода.

Настоящее издание — Специальный доклад об улавливании и хранении двуокиси углерода — подготовлено рабочей группой III МГЭИК, и главное внимание в нем уделяется улавливанию и хранению двуокиси углерода (УХУ) как варианту смягчения воздействий на изменение климата. Он состоит из девяти глав, охватывающих источники CO₂, технические особенности его улавливания, транспортировки и хранения в геологических формациях, океане или минералах, или его использования в промышленных процессах. В нем также дается оценка стоимости и потенциала УХУ, воздействий на окружающую среду, рисков и безопасности, его последствий для кадастров и учета парниковых газов, общественного восприятия и правовых вопросов.

Мишель Жарро

Генеральный секретарь,
Всемирная Метеорологическая Организация

Как обычно, успех МГЭИК при подготовке настоящего доклада зависел в первую очередь от знаний, энтузиазма и сотрудничества многих сотен экспертов всего мира по многочисленным, связанным между собой, но разным дисциплинам. Мы хотели бы выразить нашу признательность всем координирующим ведущим авторам, ведущим авторам, авторам, представившим материалы, редакторам-рецензентам и экспертам-рецензентам. Они потратили огромное количество времени и приложили колоссальные усилия для выпуска настоящего доклада, и мы весьма благодарны им за их преданность делу МГЭИК. Мы хотели бы поблагодарить сотрудников группы технической поддержки рабочей группы III и Секретариат МГЭИК за их преданность работе по координации выпуска еще одного успешного доклада МГЭИК. Мы также признательны правительствам, которые поддержали участие своих ученых в деятельности МГЭИК и внесли вклады в Целевой фонд МГЭИК для обеспечения широкого участия экспертов из развивающихся стран и стран с переходной экономикой.

Мы хотели бы выразить свою признательность правительствам Норвегии, Австралии, Бразилии и Испании, которые являлись принимающими сторонами сессий по подготовке докладов в своих странах, и особенно правительству Канады, которое организовало проведение в своей стране рабочего совещания по этой теме, а также восьмой сессии рабочей группы III по официальному рассмотрению и принятию доклада в Монреале, и правительству Нидерландов, которое финансирует группу технической поддержки рабочей группы III.

Мы хотели бы выразить особую благодарность председателю МГЭИК, д-ру Раджендру Пачаури, за его руководство деятельностью МГЭИК, секретарю МГЭИК, д-ру Ренате Кристи, и ее сотрудникам за оказанную поддержку, а также сопредседателям рабочей группы III, профессору Огунладе Дэвидсону и д-ру Берту Метцу, за их руководство рабочей группой III в ходе подготовки настоящего доклада.

Клаус Тепфер

Исполнительный директор, Программа Организации
Объединенных Наций по окружающей среде
и Генеральный директор, Отделение Организации
Объединенных Наций в Найроби

^a См. <http://unfccc.int>, Доклад КС-7, документ FCCC/CP/2001/13/Add.1, решение 9/CP.7 (статья 3.14 Киотского протокола), проект решения -/CMP.1, пункт 7, стр. 65: «просит Межправительственную группу экспертов по изменению климата, в сотрудничестве с другими соответствующими организациями, подготовить технический документ о технологиях геологического хранения углерода, охватывающий имеющуюся информацию, и представить доклад по этому вопросу для его рассмотрения Конференцией Сторон, действующей в качестве совещания Сторон Киотского протокола, на ее второй сессии».

Вступление

Этот Специальный доклад об улавливании и хранении двуокси углерода (СДУХУ) подготовлен под эгидой рабочей группы III (Смягчение воздействий на изменение климата) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Доклад был составлен в ответ на предложение проведенной в 2001 г. седьмой Конференции Сторон (КС-7) Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН). В апреле 2002 г. МГЭИК постановила на своей девятнадцатой сессии в Женеве провести рабочее совещание, которое состоялось в ноябре 2002 г. в Регине, Канада. Результатами этого рабочего совещания были первая оценка литературы по улавливанию и хранению CO_2 и предложение о Специальном докладе. На своей двадцатой сессии в 2003 г. в Париже, Франция, МГЭИК поддержала это предложение и согласовала план и график^b. Рабочей группе III было поручено провести оценку научных, технических, связанных с окружающей средой, экономических и социальных аспектов улавливания и хранения CO_2 . Мандат доклада включал, соответственно, оценку технологического развития, технического и экономического потенциала для внесения вклада в смягчение воздействий на изменение климата, а также оценку расходов. Он также включал правовые и нормативные вопросы, общественное восприятие, последствия для окружающей среды и безопасность, а также вопросы, касающиеся кадастров и учета сокращений выбросов парниковых газов.

В первую очередь в этом докладе дается оценка литературы, опубликованной после Третьего доклада об оценках (2001 г.) и посвященной источникам, системам улавливания, транспортировке и различным механизмам хранения CO_2 . Он не охватывает вопросы биологического поглощения углерода в результате землепользования, изменений в землепользовании и лесном хозяйстве или в результате обогащения океанов. Доклад строится на материалах рабочей группы III, представленных для Третьего доклада об оценках изменения климата, 2001 г. (Смягчение последствий), а также на Специальном докладе о сценариях выбросов 2000 г., в части, касающейся улавливания и хранения CO_2 в рамках вариантов смягчения воздействий. В нем указываются те пробелы в знаниях, которые необходимо ликвидировать, чтобы способствовать широкомасштабному применению.

Структура доклада соответствует компонентам системы улавливания и хранения CO_2 . В вводной главе излагается общая основа для оценки и дается краткий обзор систем УХУ. В главе

2 характеризуются основные источники CO_2 , которые подходят для улавливания с технической и экономической точек зрения, с тем чтобы оценить практическую осуществимость УХУ в глобальном масштабе. Технические варианты улавливания CO_2 подробно рассматриваются в главе 3, а глава 4 посвящена главным образом методам транспортировки CO_2 . В последующих трех главах рассматривается соответственно каждый из основных вариантов хранения: геологическое хранение (глава 5), хранение в океане (глава 6), а также карбонизация минералов и промышленные виды использования (глава 7). Вопросы общих расходов и экономического потенциала УХУ рассматриваются в главе 8, после которой следует анализ последствий УХУ для кадастров и учета выбросов парниковых газов (глава 9).

В подготовке доклада участвовало почти 100 ведущих и координирующих ведущих авторов и 25 авторов, представивших материалы; все они потратили огромное количество времени и приложили колоссальные усилия. Они представляли промышленно развитые страны, развивающиеся страны, страны с переходной экономикой и международные организации. В рецензировании доклада принимало участие более 200 человек (как отдельных экспертов, так и представителей правительств) со всего мира. Надзор за рецензированием осуществлялся 19 редакторами-рецензентами, благодаря которым всем замечаниям было уделено должное внимание.

В соответствии с процедурами МГЭИК, Резюме для лиц, определяющих политику, настоящего доклада утверждалось порочно правительствами на сессии рабочей группы III МГЭИК, проведенной в Монреале, Канада, 22–24 сентября 2005 г. В ходе процедуры утверждения ведущие авторы подтвердили, что согласованный текст Резюме для лиц, определяющих политику, полностью соответствует исходному полному докладу и Техническому резюме, которые были приняты правительствами, однако ответственность за которые полностью несут авторы.

Мы хотели бы выразить свою признательность правительствам, которые предоставили поддержку в финансовой и натуральной форме при организации различных совещаний, которые были важны для завершения этого доклада. Мы особенно благодарны канадскому правительству за организацию проведения рабочего совещания в Регине 18–22 ноября 2002 г., а также сессии рабочей группы III по утверждению доклада в Монреале 22–24 сентября 2005 г. Группа составителей этого

^b См.: <http://www.ipcc.ch/meet/session20/finalreport20.pdf>

доклада встречалась четыре раза для подготовки доклада и обсуждения результатов двух последовательных официальных раундов МГЭИК по рецензированию доклада. Совещания были любезно организованы соответственно правительствами Норвегии (Осло, июль 2003 г.), Австралии (Канберра, декабрь 2003 г.), Бразилии (Сальвадор, август 2004 г.) и Испании (Овьедо, апрель 2005 г.). Кроме того, успешному завершению этого доклада способствовали отдельные совещания, телеконференции и взаимодействия с правительствами.

Мы присоединяемся к словам благодарности, выраженной в предисловии Генеральным секретарем ВМО и Исполнительным директором ЮНЕП группе авторов, редакторам-рецензентам и экспертам-рецензентам.

Мы хотели бы поблагодарить персонал группы технической поддержки рабочей группы III за их работу по подготовке этого доклада, в частности Хелен де Конинк за ее выдающуюся и эффективную координацию доклада, Мануэлу Лоос и Кору Бланкендааль за их техническую, логистическую и секретариатскую поддержку, а также Лео Мейера (руководителя ГТП) за его руководство. Мы также выражаем нашу признательность Аните Мейер за ее общую поддержку, Дейву Томасу, Питу Томасу, Тони Каннингаму, Фрэнку Айткенсу, Энн Дженкс и Рут де Вийс за техническое редактирование документа и

Вуту Найзену, Мартину Мидельбургу, Хенку Стейкельбику, Альберту ван Стаа, Еве Стам и Тиму Хулизелану за подготовку окончательного макета и графического материала доклада. Особые слова благодарности адресуются Ли-Энн Шеферд из Объединенного центра исследований технологий улавливания и хранения парниковых газов (ОЦИТПГ) за умелую подготовку рисунков в Резюме для лиц, определяющих политику. И наконец, мы хотели бы выразить свою признательность Ренате Крист и ее персоналу, а также Франсису Хейсу (ВМО) за их трудную работу по оказанию поддержки данному процессу.

В качестве сопредседателей рабочей группы III мы надеемся, вместе с другими членами бюро рабочей группы III, ведущими авторами и группой технической поддержки, что этот доклад будет служить большей информированности об улавливании и хранении CO₂, как варианта смягчения воздействий на изменение климата, лиц, отвечающих за принятие решений на уровне правительств и в частном секторе, а также других заинтересованных читателей в научных кругах и широкой общественности.

Огунладе Дэвидсон и Берт Метц

Сопредседатели рабочей группы III МГЭИК по смягчению воздействий на изменение климата

Содержание

Резюме для лиц, определяющих политику

Что представляет собой улавливание и хранение CO ₂ и каким образом оно может способствовать смягчению воздействий на изменение климата?	2
Каковы характеристики УХУ?	2
На каком этапе находится в настоящее время технология УХУ?	3
Каково географическое распределение источников и возможных мест хранения CO ₂ ?	7
Какова стоимость УХУ и каков технический и экономический потенциал?	8
Что представляют собой риски, связанные с УХУ, для здоровья, безопасности и окружающей среды на локальном уровне?	13
Будет ли являться физическая утечка хранящегося CO ₂ угрозой для УХУ как варианта смягчения воздействий на изменение климата?	14
Каковы правовые и нормативные вопросы, связанные с осуществлением хранения CO ₂ ?	14
Каковы последствия УХУ для кадастров и учета выбросов?	15
Что представляют собой пробелы в знаниях?	15

Техническое резюме

1. Введение и основа настоящего доклада	18
2. Источники CO ₂	21
3. Улавливание CO ₂	24
4. Транспортировка CO ₂	29
5. Геологическое хранение	30
6. Хранение в океане	36
7. Карбонизация минералов и промышленное использование	39
8. Стоимость и экономический потенциал	41
9. Кадастры и учет выбросов	46
10. Пробелы в знаниях	48
Приложение I Глоссарий, акронимы и сокращения	51
Приложение II Список основных докладов МГЭИК	56

Специальный доклад МГЭИК

Улавливание и хранение двуокиси углерода

Резюме для лиц, определяющих политику

На основе проекта, подготовленного следующими авторами:

Хуан Карлос Абанадес (Испания), Макото Акаи (Япония), Сэлли Бенсон (США), Кен Келдейра (США), Хелен де Конинк (Нидерланды), Питер Кук (Австралия), Огунладе Дэвидсон (Сьерра-Леоне), Ричард Доктор (США), Джеймс Дулей (США), Поль Фриунд (Соединенное Королевство), Джон Гейл (Соединенное Королевство), Вольфганг Гейдуг (Германия), Говард Герцог (США), Дэвид Кейт (Канада), Марко Мадзотти (Италия и Швейцария), Берт Метц (Нидерланды), Лео Мейер (Нидерланды), Балгис Осман-Елаша (Судан), Эндрю Пальмер (Соединенное Королевство), Риитта Пипатти (Финляндия), Эдвард Рубин (США), Коен Смененс (Бельгия), Мохаммед Солтание (Иран), Келли (Каилаи) Тамбимуту (Австралия и Канада)

Что представляет собой улавливание и хранение CO₂ и каким образом оно может способствовать смягчению воздействий на изменение климата?

1. Улавливание и хранение двуокиси углерода (CO₂) — УХУ — это процесс, включающий отделение CO₂ от промышленных и энергетических источников, транспортировку к месту хранения и долгосрочную изоляцию от атмосферы. В этом докладе УХУ рассматривается как вариант в рамках мер по смягчению воздействий, направленных на стабилизацию атмосферных концентраций парниковых газов.

Другие варианты смягчения воздействий включают повышение энергетического КПД, переход на менее углеродоемкие виды топлива, атомную энергию, возобновляемые источники энергии, совершенствование биологических поглотителей и сокращение выбросов парниковых газов, иных нежели CO₂. УХУ характеризуется наличием потенциала для уменьшения общей стоимости мер по смягчению воздействий и повышению гибкости при обеспечении сокращений выбросов парниковых газов. Широкомасштабное применение УХУ будет зависеть от технической зрелости, стоимости, общего потенциала, распространения и передачи технологии развивающимся странам и их способности применять данную технологию, нормативных аспектов, вопросов, касающихся окружающей среды, и общественного восприятия (разделы 1.1.1, 1.3, 1.7, 8.3.3.4).

2. В Третьем докладе об оценках (ТДО) указывается, что ни один технологический вариант не обеспечит всех сокращений выбросов, которые необходимы для достижения

стабилизации, и потребуются комплекс мер по смягчению воздействий.

В большинстве сценариев прогнозируется, что обеспечение первичной энергией будет по-прежнему зависеть от ископаемых видов топлива по меньшей мере до середины века. Как говорится в ТДО, большинство моделей также свидетельствуют о том, что благодаря известным технологическим вариантам¹ может быть достигнут широкий диапазон уровней атмосферной стабилизации, однако для их осуществления потребуются социально-экономические и институциональные изменения. В этом контексте наличие УХУ в перечне вариантов может способствовать достижению целей стабилизации (разделы 1.1, 1.3).

Каковы характеристики УХУ?

3. Улавливание CO₂ может применяться в отношении крупных точечных источников. В таком случае CO₂ подвергается сжатию и транспортируется для хранения в геологических формациях, в океане, природных карбонатах² или для использования в промышленных процессах.

К числу крупных точечных источников CO₂ относятся крупные энергоустановки на ископаемом топливе или биомассе, основные отрасли промышленности, являющиеся источником выбросов CO₂, производство природного газа, установки по производству синтетического топлива и установки по производству водорода на ископаемом топливе (см. таблицу РП.1). Потенциальными техническими видами хранения являются: геологическое хранение (в геологических формациях, таких как нефтяные и газовые месторождения, не имеющие

Таблица РП.1. Характеристики по виду процесса или промышленной деятельности мировых крупных стационарных источников CO₂, выбросы которых превышают 0,1 млн тонн CO₂ (МтCO₂) в год.

Процесс	Количество источников	Выбросы (МтCO ₂ /год ¹)
Ископаемое топливо		
Энергетика	4 942	10 539
Производство цемента	1 175	932
Нефтеочистительные заводы	638	798
Сталелитейная промышленность	269	646
Нефтехимическая промышленность	470	379
Переработка нефти и газа	Данные отсутствуют	50
Другие источники	90	33
Биомасса		
Биоэтанол и биоэнергетика	303	91
Итого	7 887	13 468

¹ «Известные технологические варианты» — это технологии, которые существуют в настоящее время на стадии функционирования или экспериментальной установки, о чем говорится в сценариях смягчения воздействий, рассмотренных в ТДО. Они не включают любые новые технологии, которые потребуют серьезных технологических прорывов. Известные технологические варианты описаны в ТДО, и несколько сценариев смягчения воздействий включают УХУ.

² Хранение CO₂ в качестве минеральных карбонатов не охватывает глубокую геологическую карбонизацию или хранение в океане с повышенной нейтрализацией карбоната, о чем говорится в главе 6 (раздел 7.2).

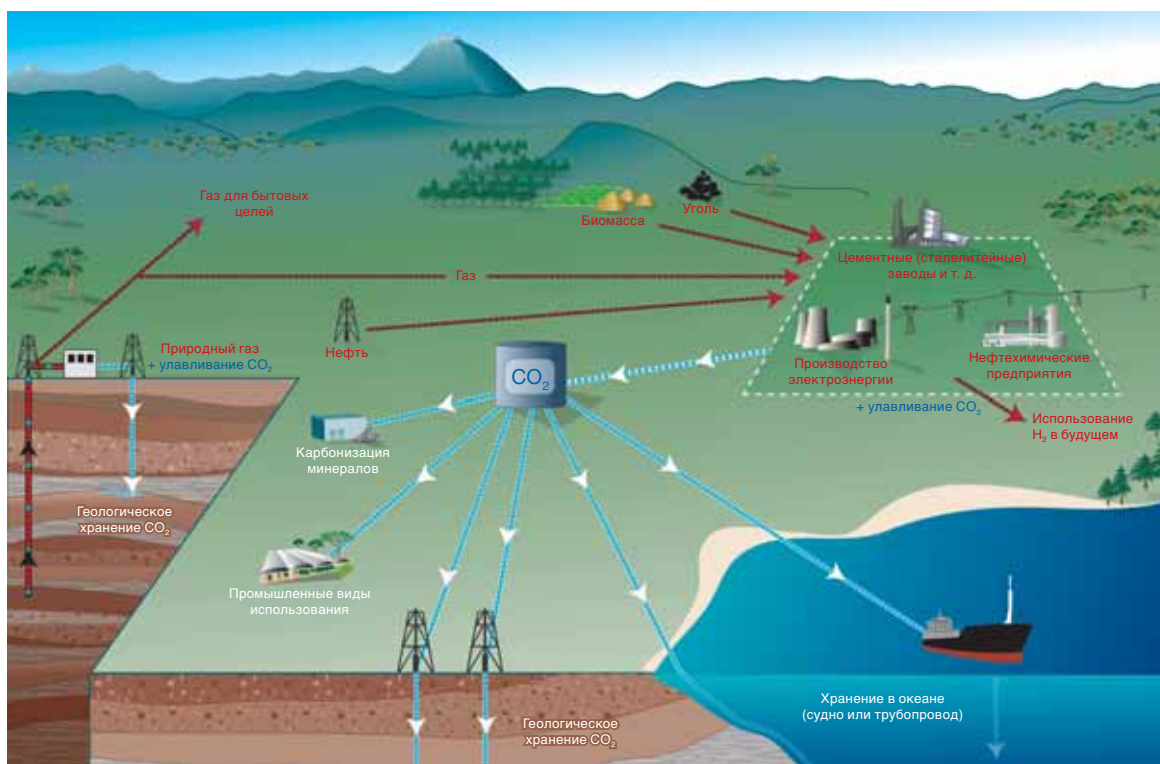


Рисунок РП.1. Схематическая диаграмма возможных систем УХУ, показывающая источники, к которым могло бы применяться УХУ, варианты транспортировки и хранения CO₂. (С разрешения ОЦИТПГ.)

промышленного значения угольные пласты и глубоко залегающие соленосные формации³), хранение в океане (прямой выброс в столб океанской воды или в морскую впадину) и промышленная фиксация CO₂ в неорганических карбонатах. В этом докладе также рассматриваются промышленные виды использования CO₂, однако считается, что оно не будет в значительной мере способствовать сокращению выбросов CO₂ (см. рисунок РП.1) (разделы 1.2, 1.4, 2.2, таблица 2.3).

4. Чистое сокращение выбросов в атмосферу при помощи УХУ зависит от доли улавливания CO₂, увеличения производства CO₂ в результате снижения общей эффективности энергоустановок или промышленных процессов вследствие дополнительной энергии, которая требуется для улавливания, транспортировки и хранения, любой утечки в результате транспортировки и доли CO₂, сохранившейся при хранении в течение длительного периода времени.

Благодаря имеющейся технологии улавливается порядка 85–95 % CO₂, прошедшего через уловитель. Энергоустановка, оборудованная системой УХУ (с выходом для геологического хранения или хранения в океане), потребует энергии приблизительно на

10–40 %⁴ больше по сравнению с установкой эквивалентной мощности без УХУ, при этом большая часть этой энергии идет на улавливание и компрессию. Для безопасного хранения чистый результат заключается в том, что энергоустановка с УХУ может снизить выбросы CO₂ в атмосферу приблизительно на 80–90 % по сравнению с установкой без УХУ (см. рисунок РП.2). В связи с возможностью утечки из резервуара хранения оставшаяся доля определяется в качестве доли общего объема закачанного CO₂, которая сохраняется в течение определенного периода времени. Системы УХУ с хранением в виде минеральных карбонатов потребуют энергии на 60–180 % больше по сравнению с установкой эквивалентной мощности без УХУ. (Разделы 1.5.1, 1.6.3, 3.6.1.3, 7.2.7).

На каком этапе находится в настоящее время технология УХУ?

5. Существуют разные типы систем улавливания CO₂: улавливание после сжигания, до сжигания и с сжиганием обогащенного кислородом топлива (рисунок РП.3). Важными факторами при выборе системы улавливания являются концентрация CO₂ в газовом потоке, давление газового потока и тип топлива (твердое или газ).

³ Соленосные формации представляют собой седиментационные породы, насыщенные водами формации с высокими концентрациями растворенных солей. Они имеют широкое распространение и содержат колоссальное количество воды, которая является непригодной для сельского хозяйства и потребления человеком. Ввиду вероятности расширения использования геотермальной энергии потенциальные геотермальные районы могут оказаться непригодными для хранения CO₂ (см. раздел 5.3.3).

⁴ Данный диапазон характеризует три типа энергоустановок: для установок с комбинированным циклом природного газа этот диапазон составляет 11–22 %, для установок на угольной пыли — 24–40 % и для установок комбинированного цикла комплексной газификации — 14–25 %.

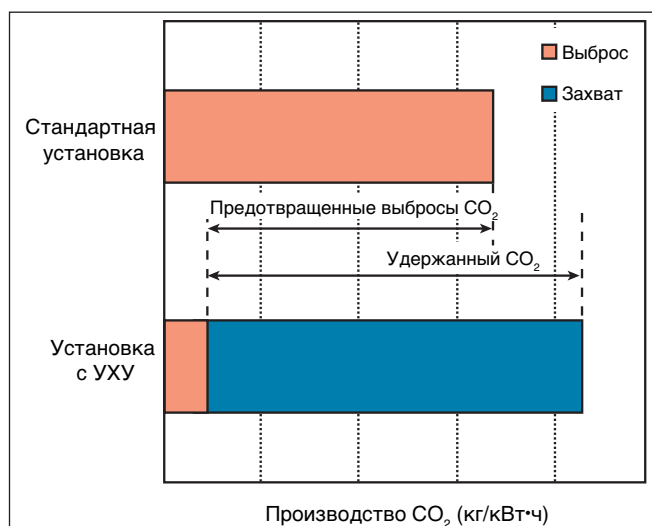


Рисунок РП.2. Улавливание и хранение CO_2 из энергоустановок. Повышенный объем производства CO_2 в результате снижения общей эффективности энергоустановок вследствие дополнительной энергии, которая требуется для улавливания, транспортировки и хранения, и любой утечки при транспортировке приводит к большему объему « CO_2 , производимого на единицу продукции» (нижняя линия) по сравнению с эталонной установкой (верхняя линия) без улавливания (рисунок 8.2).

Улавливание CO_2 после сжигания топлива в энергетических установках является экономически осуществимым при определенных условиях⁵. Оно используется для улавливания CO_2 из части дымовых газов, выбрасываемых рядом существующих энергоустановок. Сепарация CO_2 в промышленности по переработке природного газа, в которой применяется аналогичная технология, осуществляется в условиях развитого рынка⁶. Технология, необходимая для захвата до сжигания, широко применяется при производстве удобрений и водорода. Хотя первоначальные этапы улавливания до сжигания, связанные с преобразованием топлива, являются более сложными и дорогостоящими, процесс сепарации упрощается благодаря более высоким концентрациям CO_2 в газовом потоке и более высокому давлению. Сжигание с обогащением топлива кислородом находится на демонстрационном этапе⁷ и требует применения кислорода с высокой степенью чистоты. Результатом этого являются высокие концентрации CO_2 в газовом потоке и соответственно более простая сепарация CO_2 , а также повышенный расход энергии при отделении кислорода от воздуха (разделы 3.3, 3.4, 3.5).

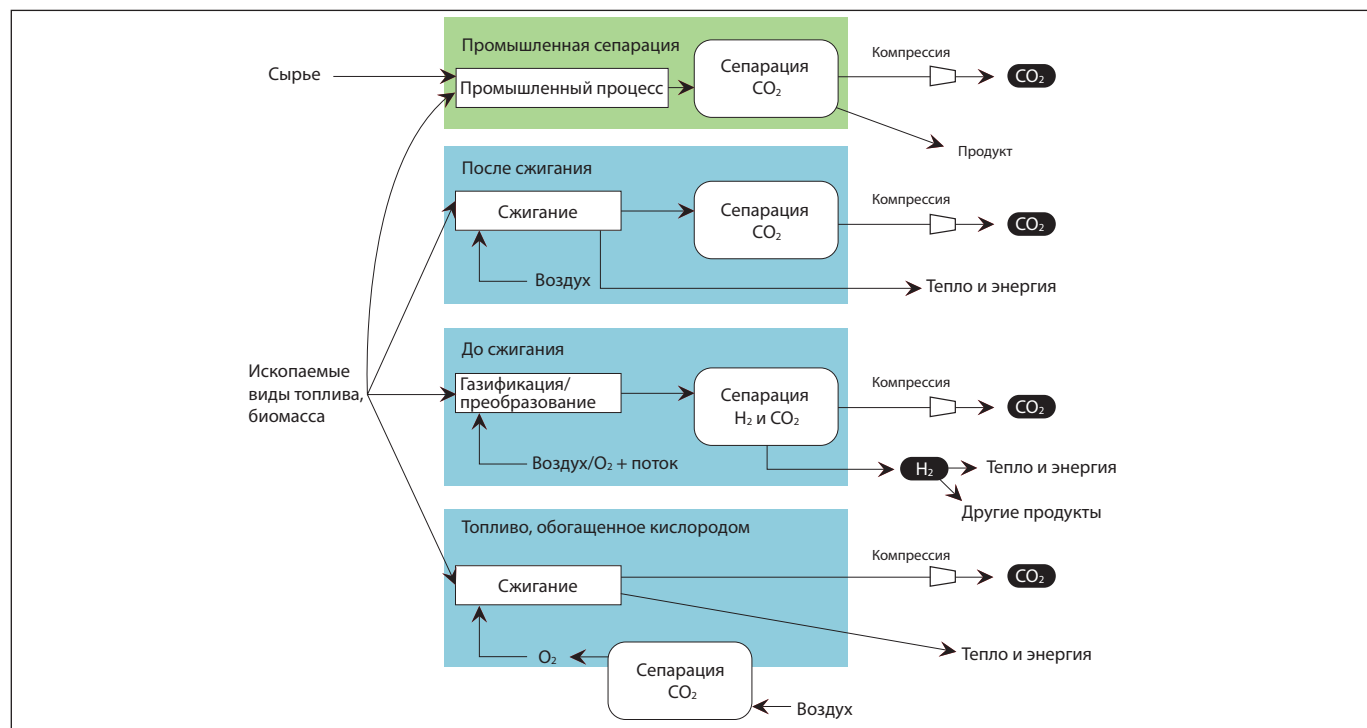


Рисунок РП.3. Схематическое представление систем улавливания. Виды топлива и продукции показаны для сжигания с обогащением топлива кислородом, для систем улавливания до сжигания (включая производство водорода и удобрений), после сжигания и промышленных источников CO_2 (включая установки для переработки природного газа и производства стали и цемента) [на основе рисунка 3.1]. (С разрешения ОЦИТПГ.)

⁵ «Экономически осуществимое при определенных условиях» означает, что технология является хорошо понятой и используется в отдельных коммерческих применениях, например, при благоприятном налоговом режиме или особо благоприятном положении на рынке, при обработке по меньшей мере 0,1 Мт CO_2 ·год⁻¹ и незначительном количестве (менее 5) повторений данной технологии.

⁶ «Развитый рынок» означает, что в настоящее время применяется технология с многочисленными повторениями технологии, используемой в коммерческих масштабах во всем мире.

⁷ «Демонстрационный этап» означает, что данная технология разработана и действует в масштабах экспериментальной установки, однако требуется дальнейшая доработка, пока эта технология не станет готовой для проектирования и создания полномасштабной системы.

6. Трубопроводы являются предпочтительным средством для транспортировки значительных объемов CO_2 на расстояния до порядка 1 000 км. Для объемов менее нескольких миллионов тонн CO_2 в год или для транспортировки через более протяженные морские пространства привлекательнее с экономической точки зрения может оказаться использование судов, если этот вариант является приемлемым.

Транспортировка CO_2 по трубопроводу является технологией развитого рынка (в США по трубопроводам протяженностью более 2 500 км транспортируется более 40 Мт CO_2 в год). В большинстве газопроводов газ приводится в движение компрессорами, находящимися в верхней части потока, однако для некоторых трубопроводов требуются промежуточные компрессорные станции. Сухой CO_2 не оказывает коррозионного воздействия на трубопроводы, даже если он содержит загрязняющие примеси. Если CO_2 содержит влагу, она удаляется из потока CO_2 для предотвращения коррозии и избежания расходов, связанных со

строительством трубопроводов из коррозиестойкого материала. Транспортировка CO_2 судами, аналогичная перевозке судами сжиженных нефтяных газов, является экономически осуществимой при определенных условиях, однако в настоящее время она осуществляется в незначительных масштабах ввиду ограниченного спроса. CO_2 может также перевозиться по железной дороге или в автоцистернах, однако эти варианты вряд ли могут являться привлекательными для крупномасштабной транспортировки CO_2 (разделы 4.2.1, 4.2.2, 4.3.2, рисунки 4.5, 4.6).

7. Для хранения CO_2 в залегающих на большой глубине береговых или морских геологических формациях применяются многие из тех технологий, которые были разработаны нефтегазовой промышленностью и доказали свою экономическую осуществимость при определенных условиях для нефтегазовых месторождений и соленосных формаций, но пока не применяются для хранения в не имеющих промышленного значения угольных пластах⁸ (см. рисунок РП.4).

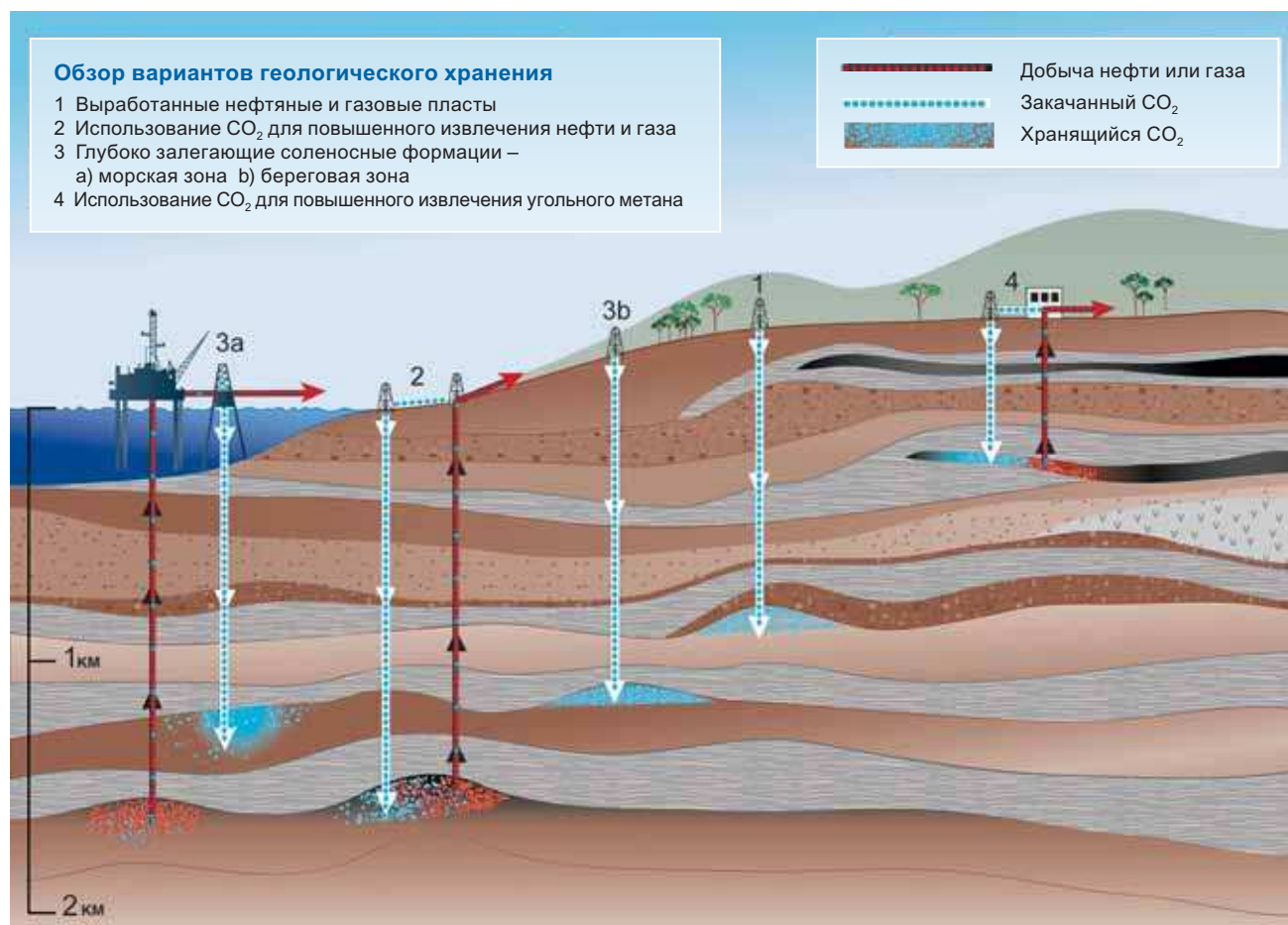


Рисунок РП.4. Обзор вариантов геологического хранения (на основе рисунка 5.3). (С разрешения ОЦИТПГ.)

⁸ Угольный пласт, который вряд ли будет когда-либо разрабатываться, поскольку он залегает слишком глубоко или является слишком тонким, может потенциально использоваться для хранения CO_2 . В случае последующей разработки хранящийся CO_2 может быть выпущен. Метод повышенного извлечения угольного метана (ПИУМ) может потенциально увеличить добычу метана из угольных пластов при одновременном хранении CO_2 . Полученный метан будет использоваться, а не выбрасываться в атмосферу (раздел 5.3.4).

При закачивании CO_2 в подходящие соленосные формации или нефтегазовые месторождения на глубины более 800 м⁹ различные физические и геохимические улавливающие механизмы не позволят ему выйти на поверхность. Обычно основным физическим механизмом улавливания является наличие перекрывающей породы¹⁰. Хранение в угольном пласте может осуществляться в малых глубинах и основано на адсорбции CO_2 на угле, однако техническая осуществимость в значительной степени зависит от проницаемости угольного пласта. Сочетание хранения CO_2 с повышенным извлечением нефти (ПИН¹¹) или, потенциально, повышенным извлечением угольного метана (ПИУМ) может дать дополнительные выгоды в результате добычи нефти или газа. В настоящее время на основе существующих применений ведется дальнейшая разработка технологии бурения скважин, технологии закачивания, компьютерной имитации действия резервуара хранения и методов мониторинга с целью их использования при проектировании и осуществлении проектов геологического хранения.

Идет осуществление трех проектов хранения промышленного масштаба¹²: проекта Слейпнера в морской соленосной формации в Норвегии, проекта ПИН Уэйберна в Канаде и проекта Ин-Салаха на газовом месторождении в Алжире. Планируются другие проекты (разделы 5.1.1, 5.2.2, 5.3, 5.6, 5.9.4, блоки 5.1, 5.2, 5.3).

8. Хранение в океане потенциально может осуществляться двумя способами: закачиванием и растворением CO_2 в водном столбе (обычно на глубине более 1 000 м) через фиксированный трубопровод или находящееся в движении судно, или путем его доставки через фиксированный трубопровод или морскую платформу на дно моря на глубинах более 3 000 м, где CO_2 имеет большую по сравнению с водой плотность и где он образует, как предполагается, «озеро», что будет задерживать растворение CO_2 в окружающей среде (см. рисунок РП.5). Хранение в

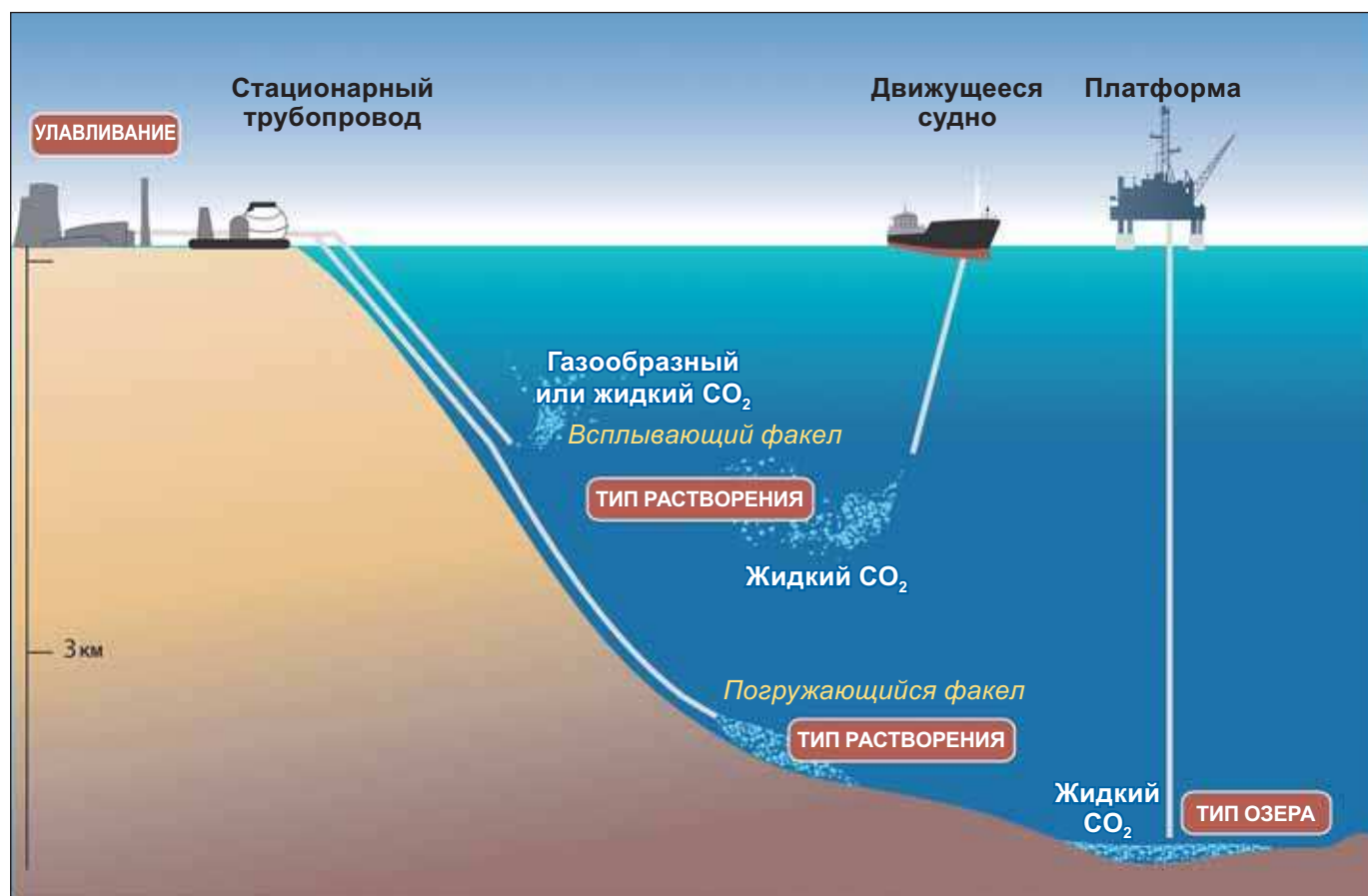


Рисунок РП.5. Обзор концепций хранения в океане. При хранении в океане «по типу растворения» CO_2 быстро растворяется в океанской воде, в то время как при хранении в океане «по типу озера» CO_2 первоначально представляет собой жидкость на дне моря. (С разрешения ОЦИТПГ.)

⁹ На глубинах более 800–1 000 м CO_2 становится сверхкритическим и приобретает жидкообразную плотность (порядка 500–800 кг·м⁻³), что обеспечивает потенциал для эффективного использования подземного пространства для хранения и повышает безопасность хранения (раздел 5.1.1).

¹⁰ Порода с весьма низкой проницаемостью, которая действует в качестве верхнего уплотнителя и не позволяет жидкости выходить за пределы резервуара.

¹¹ Для целей этого доклада ПИН означает повышенное извлечение нефти с применением CO_2 .

¹² «Промышленный масштаб» в настоящем документе означает порядка 1 Мт CO_2 в год.

океане и его последствия для окружающей среды находятся пока на исследовательском этапе¹³.

Растворенный и рассеянный CO_2 станет частью глобального цикла углерода, и в конечном итоге наступит его равновесие с CO_2 в атмосфере. В ходе лабораторных экспериментов, океанских экспериментов небольших масштабов и имитации при помощи моделей проводились исследования целого ряда вариантов хранения в океане применительно к технологиям и связанным с ними физическим и химическим явлениям, которые включают в первую очередь повышение кислотности (снижение pH) и их воздействие на морские экосистемы (разделы 6.1.2, 6.2.1, 6.5, 6.7).

9. В результате реакции CO_2 с окисями металлов, которые присутствуют в большом количестве в силикатных минералах и имеются в малых количествах в потоках отходов, образуются стабильные карбонаты. Эта технология находится в данное время на исследовательском этапе, однако определенные применения, связанные с использованием потоков отходов, находятся на демонстрационном этапе.

Естественная реакция протекает весьма медленно, и ее необходимо ускорить посредством предварительной обработки минералов, которая в настоящее время является весьма энергоемкой (разделы 7.2.1, 7.2.3, 7.2.4, блок 7.1).

10. Возможными являются промышленные виды использования¹⁴ удержанного CO_2 в качестве газа или жидкости или в качестве исходного сырья в химических процессах, в результате которых получают ценные углеродосодержащие продукты, однако считается, что они не внесут существенного вклада в уменьшение выбросов CO_2 .

Потенциал для промышленных видов использования CO_2 является незначительным, в то время как CO_2 , как правило, удерживается в течение коротких периодов (обычно месяцы или годы). Процессы с использованием задержанного CO_2 в качестве исходного сырья вместо ископаемых углеводородов не всегда обеспечивают чистые сокращения выбросов в течение жизненного цикла (разделы 7.3.1, 7.3.4).

11. Компоненты УХУ находятся на различных этапах разработки (см. таблицу РП.2). Полноценные системы УХУ могут быть скомпонованы на основе существующих технологий, которые являются совершенными или экономически осуществимыми при определенных условиях, хотя состояние разработки системы в целом может находиться на более низком уровне по сравнению с некоторыми из ее отдельных компонентов.

Имеется сравнительно небольшой опыт в области соединения улавливания, транспортировки и хранения CO_2 в полностью интегрированную систему УХУ. Еще предстоит осуществить применение УХУ для крупных энергоустановок (потенциальное применение, представляющее основной интерес) [разделы 1.4.4, 3.8, 5.1].

Каково географическое распределение источников и возможных мест хранения CO_2 ?

12. Крупные точечные источники CO_2 сконцентрированы вблизи основных промышленных и городских районов. Многие подобные источники находятся в пределах 300 км границ районов, которые потенциально располагают формациями, подходящими для геологического хранения (см. рисунок РП.6). Предварительное исследование показывает, что в целом небольшая доля крупных точечных источников находится вблизи потенциальных мест хранения в океане.

В настоящее время имеется ограниченное количество литературы по вопросам совместимости крупных точечных источников CO_2 с подходящими для хранения геологическими формациями. Для получения более качественной информации могут потребоваться детальные оценки на региональном уровне (см. рисунок РП.6b).

Изучение сценариев показывает, что прогнозируется увеличение в будущем количества крупных точечных источников и что к 2050 г., ввиду ожидаемых технических ограничений, около 20–40 % глобальных выбросов CO_2 в результате сжигания ископаемого топлива может быть технически пригодным для улавливания, включая 30–60 % выбросов CO_2 в результате производства электроэнергии и 30–40 % промышленных выбросов. Технически пригодными для улавливания могут также оказаться выбросы из больших установок по преобразованию биомассы. Вопрос о близости будущих крупных точечных источников к потенциальным местам хранения не изучался (разделы 2.3, 2.4.3).

13. УХУ обеспечивает контроль выбросов CO_2 в результате производства электроэнергии или водорода с использованием ископаемого топлива, что в долгосрочной перспективе может уменьшить часть рассеянных выбросов CO_2 из систем транспортировки и распределенных систем энероснабжения.

Электричество может использоваться в транспортных средствах, а водород — в топливных элементах, включая транспортный сектор. В настоящее время конверсия газа и угля, сопровождаемая комплексной сепарацией CO_2 (без хранения), является главным вариантом для производства водорода. Большой объем производства водорода или электричества на основе ископаемого топлива или биомассы приведет к увеличению количества крупных источников CO_2 , которые технически подходят для улавливания и хранения. В настоящее время трудно прогнозировать вероятное количество, местоположение и размер подобных источников (раздел 2.5.1).

¹³ «Исследовательский этап» означает, что хотя базовая научная основа является понятной, технология в настоящее время находится на этапе концептуальной разработки или испытаний на уровне лаборатории или рабочей площадки и не была продемонстрирована на экспериментальной установке.

¹⁴ Промышленные виды использования CO_2 означают такие виды использования, которые не включают ПИН, рассматриваемое в пункте 7.

Таблица РП.2. Нынешнее состояние технологической разработки компонентов системы УХУ. Знак «X» означает наивысший уровень совершенства для каждого компонента. Имеются также менее совершенные технологии для большинства компонентов.

Компонент УХУ	Технология УХУ	Исследовательский этап ¹³	Демонстрационный этап ⁷	Экономически осуществимый при определенных условиях ⁵	Развитый рынок ⁶
Улавливание	После сжигания			X	
	До сжигания			X	
	Сжигание обогащенного кислородом топлива		X		
	Промышленная сепарация (переработка природного газа, производство аммиака)				X
Транспортировка	Трубопровод				X
	Перевозка судами			X	
Геологическое хранение	Повышенное извлечение нефти (ПИН)				X ^a
	Газовые или нефтяные месторождения			X	
	Соленосные формации			X	
	Повышенное извлечение угольного метана (ПИУМ)		X		
Хранение в океане	Прямое закачивание (по типу растворения)	X			
	Прямое закачивание (по типу озера)	X			
Карбонизация минералов	Природные силикатные минералы	X			
	Материалы отходов		X		
Промышленные виды использования CO ₂					X

^a Закачивание CO₂ для ПИН является совершенной рыночной технологией, однако при использовании этой технологии для хранения CO₂ она является только «экономически осуществимой при определенных условиях».

Какова стоимость¹⁵ УХУ и каков технический и экономический потенциал?

14. Применение УХУ в сфере производства электроэнергии, по данным 2002 г., приведет, согласно оценкам, к увеличению стоимости производства электроэнергии почти на 0,01–0,05 долл. США¹⁶ за киловатт-час (долл. США/кВт·ч), в зависимости от вида топлива, конкретной технологии, местоположения и национальных условий. Включение прибылей от ПИН снизит дополнительные расходы на производство электроэнергии вследствие УХУ почти на 0,01–0,02 долл. США/кВт·ч¹⁷ (абсолютную стоимость производства электроэнергии см. в таблице РП.3 и стоимость предотвращенных выбросов CO₂ в долл. США/тCO₂ — в таблице РП.4). Повышение рыночных цен на топливо, используемое для производства энергии, будет, как правило, вести к повышению стоимости УХУ. Количественное воздействие на УХУ цены на нефть является неопределенным.

В то же время, выгода от ПИН будет обычно тем выше, чем выше цены на нефть. Хотя применение УХУ в сфере производства энергии на основе биомассы при нынешнем незначительном масштабе существенно повысит стоимость электричества, совместное сжигание биомассы в крупных энергоустановках с УХУ, работающих на угольном топливе, окажется более эффективным с экономической точки зрения.

Стоимость меняется значительным образом как в абсолютных, так и в относительных показателях в зависимости от страны. Поскольку комбинированный цикл природного газа, угольная пыль или системы с комбинированным циклом комплексной газификации еще не сконструированы с полномерным использованием УХУ, стоимость этих систем не может быть в настоящее время указана с высокой степенью точности. В будущем стоимость УХУ может быть снижена благодаря научным исследованиям и техническим разработкам, а также экономии, обусловленной ростом масштабов производства. Такая экономия могла бы также со временем значительно снизить

¹⁵ Использование термина «стоимость» в этом докладе относится только к рыночным ценам, но не включает внешние расходы, такие как ущерб окружающей среде и более значительные для общества расходы, которые могут быть связаны с использованием УХУ. В настоящее время проведена недостаточная работа для оценки и количественного определения подобных внешних расходов.

¹⁶ Любая стоимость в этом докладе выражена в долларах США по ценам 2002 г.

¹⁷ На основе цен на нефть в размере 15–20 долл. США за баррель, используемых в имеющейся литературе.

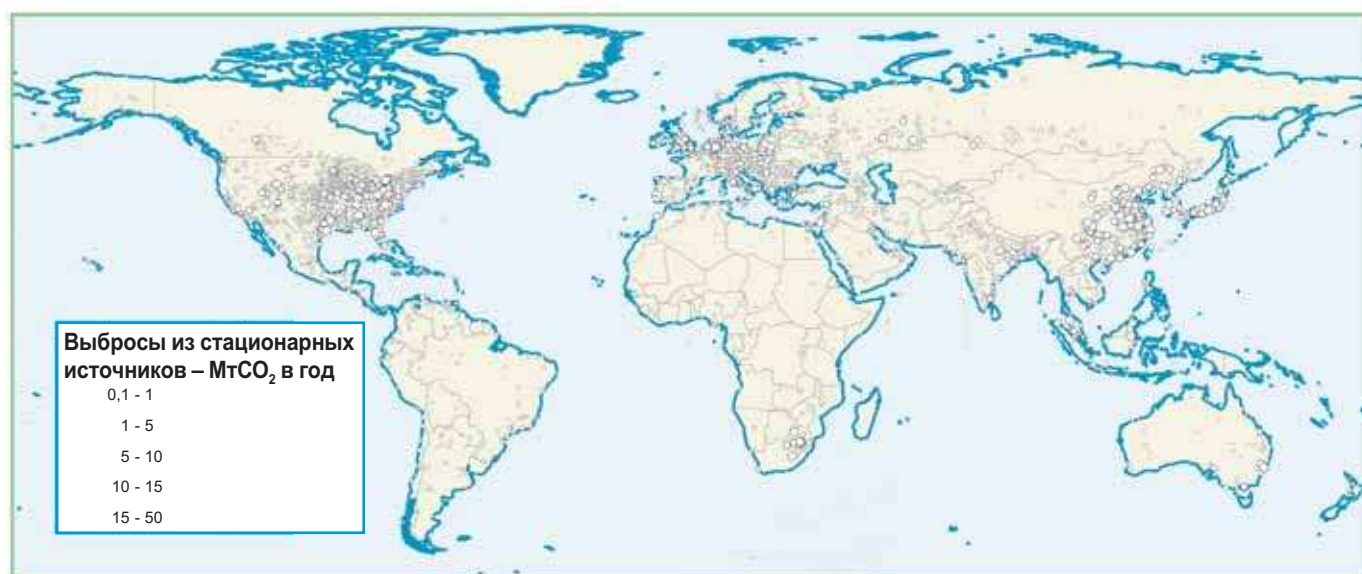


Рисунок РП.6а. Глобальное распределение крупных стационарных источников CO_2 (рисунок 2.3). (На основе компиляции имеющейся в свободном доступе информации о глобальных источниках выбросов; ПГ 2002 г., МЭА.)

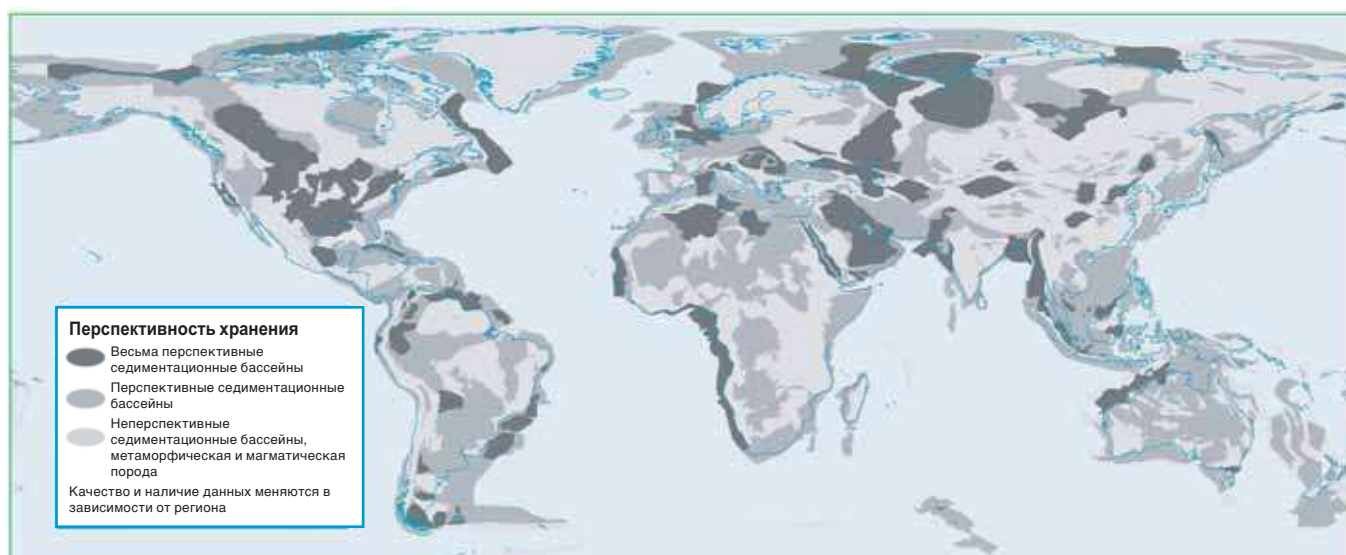


Рисунок РП.6б. Перспективные районы в седиментационных бассейнах, в которых могут быть найдены подходящие соленосные образования, нефтяные или газовые месторождения или угольные пласты. Места для хранения в угольных пластах включены только частично. Перспективность — это качественная оценка вероятности наличия подходящего для хранения места в данном районе на основе имеющейся информации. Этот рисунок следует рассматривать лишь в качестве руководства, поскольку он основан на частичных данных, качество которых может меняться в зависимости от региона и которые могут меняться со временем и с получением новой информации (рисунок 2.4). (С разрешения «Геосайнс Острэлия».)

стоимость систем УХУ на основе биомассы. Применение УХУ в конверсионных установках, работающих на биомассе в качестве топлива или принципе совместного сжигания, приведет к более низкому или негативному¹⁸ показателю выбросов CO_2 , что может снизить расходы на этот вариант, в зависимости от рыночной стоимости сокращений выбросов CO_2 (разделы 2.5.3, 3.7.1, 3.7.13, 8.2.4).

15. Ожидается, что модернизация существующих установок посредством оборудования их системами улавливания

CO_2 приведет к более высокой стоимости и значительно снизит общую эффективность по сравнению с новыми энергоустановками, оснащенными системой улавливания. Стоимостные убытки модернизации могут быть снижены, если речь идет о некоторых относительно новых и высокоэффективных действующих установках или если установка значительно обновлена или переоборудована.

¹⁸ Если, например, сбор биомассы осуществляется с неустойчивым показателем (т. е. быстрее, нежели ежегодный вторичный рост), величина чистых выбросов CO_2 в результате этой деятельности не может быть отрицательной.

Таблица РП.3. Стоимость УХУ: стоимость выработки электроэнергии для различных типов производства — без улавливания и для системы УХУ в целом. Стоимость полноценной системы УХУ для производства электроэнергии новой, крупной энергоустановкой, работающей на ископаемом топливе, зависит от ряда факторов, включая характеристики энергоустановки и системы улавливания, характеристики места хранения, объема CO_2 , и необходимое расстояние транспортировки. Приводимые цифры предполагают опыт работы с крупной установкой. Цены на газ предполагаются в размере 2,8–4,4 долл. США/ГДж¹, а цены на уголь — 1–1,5 долл. США/ГДж¹ (на основе таблиц 8.3 и 8.4).

Система энергоустановки	Комбинированный цикл природного газа (долл. США/кВт·ч)	Угольная пыль (долл. США/кВт·ч)	Комбинированный цикл комплексной газификации (долл. США/кВт·ч)
Без улавливания (стандартная установка)	0,03 – 0,05	0,04 – 0,05	0,04 – 0,06
С улавливанием и геологическим хранением	0,04 – 0,08	0,06 – 0,10	0,05 – 0,09
С улавливанием и ПИН ¹¹	0,04 – 0,07	0,05 – 0,08	0,04 – 0,07

Таблица РП.4. Стоимость предотвращения выбросов CO_2 для полной системы УХУ при производстве электроэнергии, для разных комбинаций стандартных энергоустановок без УХУ и энергоустановок с УХУ (геологическое хранение и ПИН). Объем предотвращенного выброса CO_2 равен разнице между выбросами стандартной установки и выбросами энергоустановки с УХУ. Цены на газ предполагаются в размере 2,8–4,4 долл. США/ГДж¹, а цены на уголь — 1–1,5 долл. США/ГДж¹ (на основе таблиц 8.3а и 8.4).

Тип энергоустановки с УХУ	Стандартная установка с комбинированным циклом природного газа Стоимость предотвращения выбросов в долл. США/т CO_2	Стандартная установка на угольной пыли Стоимость предотвращения выбросов в долл. США/т CO_2
Энергоустановка с улавливанием и геологическим хранением		
Комбинированный цикл природного газа	40 – 90	20 – 60
Угольная пыль	70 – 270	30 – 70
Комбинированный цикл комплексной газификации	40 – 220	20 – 70
Энергетическая установка с улавливанием и ПИН¹¹		
Комбинированный цикл природного газа	20 – 70	0 – 30
Угольная пыль	50 – 240	10 – 40
Комбинированный цикл комплексной газификации	20 – 190	0 – 40

Стоимость модернизации существующих установок посредством оборудования системами УХУ является разной. Промышленные источники CO_2 могут быть более легко оборудованы системой сепарации CO_2 , в то время как комплексные системы энергоустановок требуют более значительной модернизации. Для снижения будущей стоимости модернизации при проектировании новых установок может учитываться применение будущих систем УХУ (разделы 3.1.4, 3.7.5).

16. В большинстве систем УХУ стоимость улавливания (включая компрессию) является самым значительным компонентом стоимости.

Стоимость различных компонентов системы УХУ меняется в широком диапазоне в зависимости от исходной установки и широкого перечня источников CO_2 , видов транспортировки и вариантов хранения (см. таблицу РП.5). В течение следующего десятилетия стоимость улавливания может быть снижена на 20–30 %, и еще большая экономия должна быть достигнута благодаря новым технологиям, которые пока находятся на исследовательском или демонстрационном этапах. Стоимость транспортировки и хранения

CO_2 может снижаться медленными темпами по мере дальнейшего усовершенствования технологии и расширения масштабов применения (разделы 1.5.3, 3.7.13, 8.2).

17. Энергетические и экономические модели показывают, что источником основного вклада системы УХУ в смягчение воздействия на изменение климата будет являться ее применение в секторе производства электроэнергии. Большая часть моделирования, получившая оценку в рамках этого доклада, свидетельствует о том, что системы УХУ начинают применяться в значительных масштабах, когда цены на CO_2 начинают достигать приблизительно 25–30 долл. США/т CO_2 .

Возможности улавливания с низкими расходами (при переработке газа или производстве водорода и аммиака, когда сепарация CO_2 уже осуществлена) в сочетании с небольшими (<50 км) расстояниями транспортировки и вариантами хранения, которые приносят прибыль (такие как ПИН), могут обеспечить ограниченное хранение CO_2 (до 360 Мт CO_2 /год¹) при наличии незначительных стимулов или их отсутствии (разделы 2.2.1.3, 2.3, 2.4, 8.3.2.1).

Таблица РП.5. Диапазоны стоимости в ценах 2002 г. компонентов системы УХУ, применяемой в данном типе энергоустановки или промышленного источника. Стоимость отдельных компонентов не может быть просто суммирована для расчета стоимости всей системы УХУ с учетом стоимости предотвращения выбросов CO_2 в долл. США/ тCO_2 . Все цифры отражают расходы на крупномасштабные, новые установки, при этом цены на природный газ предполагаются в размере 2,8–4,4 долл. США*ГДж⁻¹, а цены на уголь — в размере 1–1,5 долл. США*ГДж⁻¹ (разделы 5.9.5, 8.2.1, 8.2.2, 8.2.3, таблицы 8.1 и 8.2).

Компоненты системы УХУ	Диапазон стоимости	Замечания
Улавливание из энергоустановки на сжигании угля или газа	15–75 долл. США/ чистая захваченная тCO_2	Чистая стоимость захваченного CO_2 по сравнению с аналогичной установкой без системы улавливания
Улавливание из установки по производству водорода и аммиака или переработке газа	5–55 долл. США/ чистая захваченная тCO_2	Применяется к источникам с высокой степенью чистоты, требующим простого осушения и компрессии
Улавливание из других промышленных источников	25–115 долл. США/ чистая захваченная тCO_2	Диапазон отражает использование ряда различных технологий и видов топлива
Транспортировка	1–8 долл. США/ транспортируемая тCO_2	На 250 км трубопровода или доставки судами при показателях массового расхода от 5 (высокий конец) до 40 (низкий конец) $\text{МтCO}_2 \cdot \text{год}^{-1}$
Геологическое хранение ^a	0,5–8 долл. США/ закачиваемая тCO_2	Исключая потенциальную прибыль от ПИН или ПИУМ
Геологическое хранение: мониторинг и проверка	0,1–0,3 долл. США/ закачиваемая тCO_2	Это включает мониторинг до закачивания, во время закачивания и после закачивания и зависит от нормативных требований
Хранение в океане	5–30 долл. США/ закачиваемая тCO_2	Включая транспортировку по морю на расстояние 100–500 км, без мониторинга и проверки
Карбонизация минералов	50–100 долл. США/ чистая минерализованная тCO_2	Диапазон для наиболее хорошо изученного случая. Включает использование дополнительной энергии для карбонизации

^a В течение длительного периода времени могут иметь место дополнительные расходы, связанные с восстановительными мерами и обязательствами.

18. Согласно имеющимся данным, во всем мире существует, вероятно¹⁹, технический потенциал²⁰, обеспечивающий емкость хранения в геологических формациях как минимум порядка 2 000 ГтCO_2 (545 ГтC^{21}).

Потенциал для хранения в геологических соленосных формациях мог бы быть гораздо больше, однако оценки верхнего предела являются неопределенными из-за отсутствия информации и согласованной методологии. Имеются более точные данные о емкости нефтяных и газовых пластов. Техническая емкость для хранения в угольных пластах является значительно меньшей и не столь хорошо известной.

Расчеты емкости для хранения CO_2 в океанах, составленные при помощи моделей, показывают, что эта емкость может составлять порядка тысяч ГтCO_2 , в зависимости от предполагаемого уровня стабилизации в атмосфере²² и ограничений, связанных с сохранением окружающей среды, таких как изменение pH в океане. В настоящее время невозможно определить возможную степень использования карбонизации минералов, поскольку она зависит от неизвестного количества силикатных запасов, которые могут технически эксплуатироваться, а также от таких связанных с окружающей средой вопросов, как объем удаления продукции (разделы 5.3, 6.3.1, 7.2.3, таблица 5.2).

19. Согласно большинству сценариев стабилизации атмосферных концентраций парниковых газов в пределах 450–750 ppmv CO_2 и совокупности наименее дорогостоящих вариантов смягчения воздействий, экономический потенциал²³ УХУ составит в общей сложности 220–2 200 ГтCO_2 (60–600 ГтC), что будет означать, что вклад УХУ составляет 15–55 % от общего объема деятельности по смягчению воздействий во всем мире в период до 2100 г., что является средней величиной на основе ряда исходных сценариев. Вероятно¹⁹, что технический потенциал²⁰ геологического хранения является достаточным для охвата высокого предела диапазона экономического потенциала, однако для отдельных регионов дело может обстоять иначе.

Неопределенности в этих оценках экономического потенциала являются существенными. Для того чтобы системы УХУ достигли подобного экономического потенциала, необходимо, чтобы в предстоящем столетии было установлено от нескольких сотен до нескольких тысяч систем улавливания CO_2 , при этом каждая из них должна улавливать порядка 1–5 МтCO_2 в год. Фактическое осуществление УХУ, как и других вариантов смягчения воздействия, характеризуется, вероятно, меньшими масштабами по сравнению с экономическим потенциалом вследствие таких факторов, как воздействие на окружающую среду, риски утечки и отсутствие четкой правовой основы или общественное восприятие (разделы 1.4.4, 5.3.7, 8.3.1, 8.3.3, 8.3.3.4).

¹⁹ «Вероятно» — это вероятность, составляющая 66–90 %.

²⁰ «Технический потенциал», определение которого содержится в ТДО, — это объем, на который можно сократить выбросы парниковых газов благодаря применению технологии или практики, которые уже были продемонстрированы.

²¹ Это заявление основано на экспертном заключении авторов имеющейся литературы. Оно отражает наличие неопределенности в отношении оценок емкости хранения (раздел 5.3.7).

²² Этот подход учитывает, что CO_2 , закачиваемый в океан, через некоторое время достигнет равновесия с атмосферой.

²³ Экономический потенциал — это объем сокращений выбросов парниковых газов в результате применения определенного варианта, который может быть обеспечен экономически эффективным образом с учетом доминирующих обстоятельств (т. е. рыночной стоимости сокращений выбросов CO_2 и стоимости других вариантов).

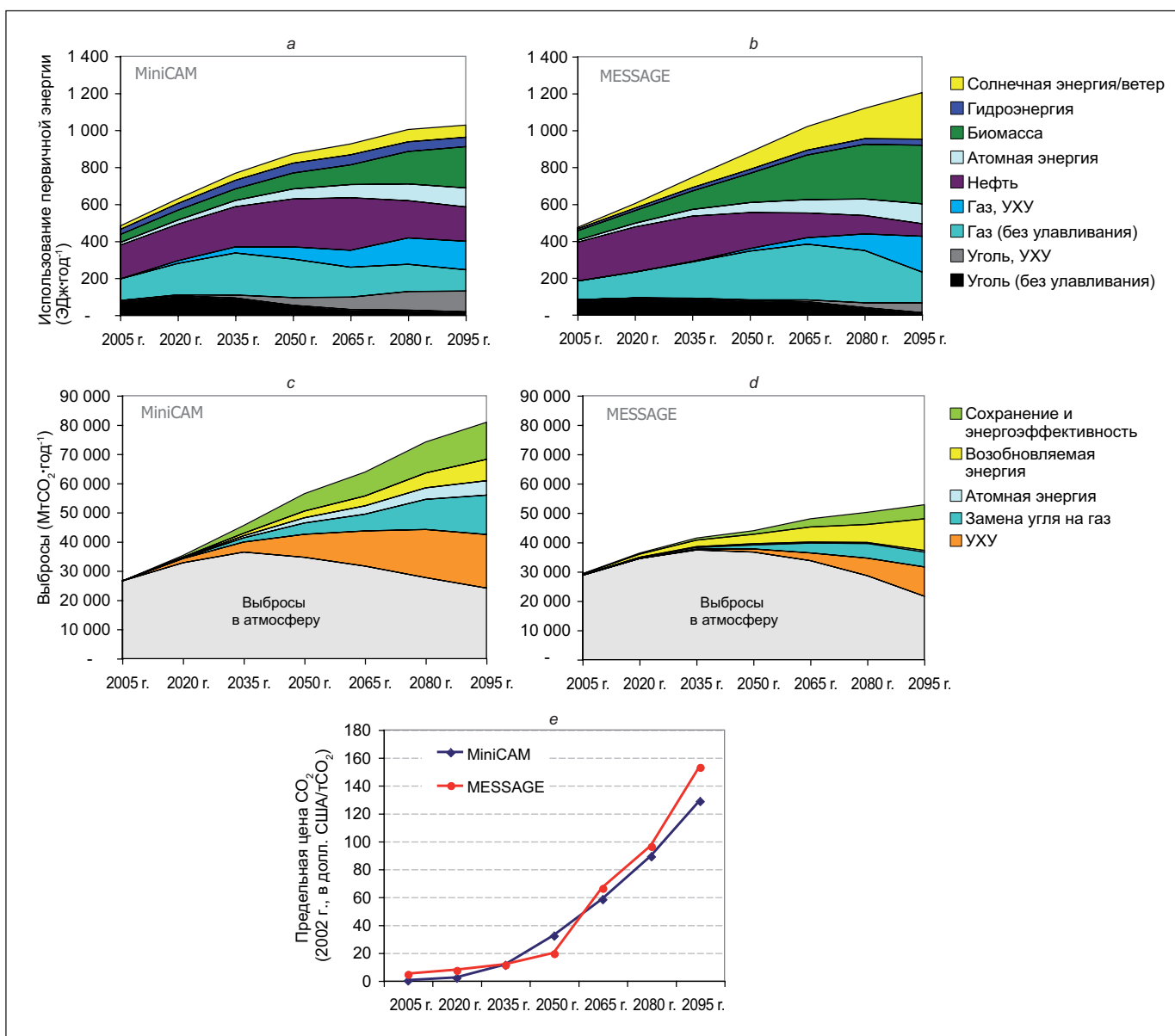


Рисунок РП.7. Эти цифры являются иллюстративными примерами глобального потенциального вклада УХУ как части портфеля мер по смягчению воздействий. Они основаны на двух альтернативных комплексных моделях оценки (MESSAGE и MiniCAM), хотя исходят из тех же самых предположений в отношении главных исходных факторов выбросов. Результаты могут в значительной мере отличаться в региональных масштабах. Этот пример основан на едином сценарии и поэтому не освещает весь диапазон неопределенностей. Секции а и б показывают глобальное использование первичной энергии, включая установку систем УХУ. Секции в и г показывают глобальные выбросы CO₂ серым цветом, а соответствующие вклады основных мер по сокращению выбросов даются в цвете. Секция д показывает расчетную предельную цену сокращений выбросов CO₂ (раздел 8.3.3, блок 8.3).

20. Согласно большинству исследований в рамках сценариев, роль УХУ в рамках совокупности мер по смягчению воздействий повысится в течение столетия, а включение УХУ в портфель мер по смягчению воздействий снизит, как считается, стоимость стабилизации концентраций CO₂ на 30 % или еще большую цифру.

Один из аспектов стоимостной конкурентоспособности систем УХУ заключается в том, что технологии УХУ совместимы с большинством существующих энергетических инфраструктур.

Глобальный потенциальный вклад УХУ в качестве части портфеля мер по смягчению воздействий показан с помощью примеров, приведенных на рисунке РП.7. Анализы ситуации в этой области характеризуются в настоящее время ограниченными рамками, и для повышения качества информации могут потребоваться дополнительные оценки (разделы 1.5, 8.3.3, 8.3.3.4, блок 8.3).

Что представляют собой риски, связанные с УХУ, для здоровья, безопасности и окружающей среды на локальном уровне?

21. *Риски²⁴ на локальном уровне, связанные с транспортировкой CO₂ по трубопроводу, могут быть аналогичными или более низкими по сравнению с теми рисками, которые создаются уже действующими трубопроводами для углеводородов.*

У существующих трубопроводов CO₂, проходящих главным образом в районах с низкой плотностью населения, количество аварий в расчете на 1 км трубопровода является весьма незначительным и сопоставимо с аналогичным показателем у трубопроводов для углеводородов. Неожиданный и значительный выброс CO₂ создал бы непосредственную опасность для жизни и здоровья людей, если бы они подверглись воздействию концентраций CO₂ в воздухе, превышающих 7–10 % в объемном выражении. Транспортировка CO₂ по трубопроводу, проходящему через населенные районы, требует уделения внимания выбору маршрута, защите от чрезмерного давления, выявлению утечек и другим конструктивным факторам. Не предвидится наличие каких-либо серьезных препятствий для конструирования трубопроводов с УХУ (раздел 4.4.2, приложение А1.2.3.1).

22. *При правильном выборе места на основе имеющейся информации о подповерхностной зоне, наличии программы мониторинга для выявления проблем, нормативной системы и правильном использовании методов восстановления для прекращения выбросов CO₂ или контроля за ними, если они происходят, риски для здоровья, безопасности и окружающей среды на локальном уровне, связанные с геологическим хранением, будут сопоставимы с рисками, связанными с такими существующими видами деятельности, как хранение природного газа, ПИН и захоронение кислого газа под землей на большой глубине.*

Естественные резервуары CO₂ способствуют пониманию поведения CO₂ под землей. Характеристики мест хранения с низкой вероятностью утечки включают перекрывающие породы с высокой степенью непроницаемости, геологическую стабильность, отсутствие каналов утечки и эффективные механизмы ловушки. Имеются два разных типа сценариев утечки: (1) внезапная утечка в результате повреждения закачивающей скважины или утечка из заброшенной скважины; и (2) постепенная утечка в результате необнаруженных дефектов, разрывов или из скважин. Последствия повышенных концентраций CO₂ в неглубоком подповерхностном слое могут включать смертельно опасное воздействие на растения и почвенных животных, а также загрязнение подземных вод. Интенсивные потоки в сочетании со стабильными атмосферными условиями могут стать причиной высоких местных концентраций CO₂ в воздухе, которые могут причинить ущерб животным или людям.

Наращивание давления, вызванное закачиванием CO₂, может провоцировать небольшие сейсмические явления.

Несмотря на наличие ограниченного опыта в области геологического хранения, тесно связанные между собой промышленный опыт и научные знания могут послужить основой для надлежащего управления в условиях риска, включая восстановительные меры. Эффективность имеющихся методов управления в условиях риска все еще нуждается в подтверждении в плане их использования при хранении CO₂. Если утечка происходит в месте хранения, восстановительные меры по ликвидации утечки могут включать стандартные методы ремонта скважин или перехват и откачку CO₂ до его утечки в неглубокий подземный водоносный горизонт. Учитывая продолжительные сроки, связанные с геологическим хранением CO₂, необходимым может оказаться мониторинг данного места в течение длительных периодов времени (разделы 5.6, 5.7, таблицы 5.4, 5.7, рисунок 5.25).

23. *Добавление CO₂ в океан или образование озер жидкого CO₂ на дне океана в промышленных масштабах приведет к изменению местных химических характеристик окружающей среды. Эксперименты показали, что устойчивые высокие концентрации CO₂ вызовут гибель океанских организмов. Воздействие CO₂ на морские организмы будет иметь последствия на уровне экосистемы. Еще предстоит исследовать необратимые последствия прямого закачивания CO₂ в океан для экосистемы в пределах крупных океанских районов и в течение длительного периода времени.*

Результаты имитаций при помощи моделей показывают повышение кислотности (уменьшение pH >0,4) для приблизительно 1 % объема океана в случае предположения об осуществлении выброса из семи мест на глубину океана в 3 000 м, где хранение в океане обеспечивает 10 % результативности мер по смягчению воздействий для стабилизации на уровне 550 ppmv CO₂. Для целей сравнения: в случае подобной стабилизации без хранения в океане можно предположить уменьшение pH >0,25 по сравнению с доиндустриальными уровнями на всей поверхности океана. Уменьшение на 0,2–0,4 pH значительно превышает доиндустриальные колебания средней кислотности океана. При этих уровнях изменения pH отмечались некоторые последствия для организмов, обитающих вблизи поверхности океана, однако устойчивые воздействия пока не изучены. До завершения комплексной оценки рисков необходимо достичь лучшего понимания этих последствий. Отсутствует какой-либо известный механизм неожиданного или катастрофического выброса хранящегося в океане CO₂ в атмосферу. Постепенный выброс рассматривается в пункте 26 РП. Преобразование молекулярного CO₂ в бикарбонаты или гидраты до или во время выброса CO₂ приведет к уменьшению влияния pH и продлению задержания CO₂ в океане, однако это также приведет к повышению расходов и другим последствиям для окружающей среды (раздел 6.7).

²⁴ При рассмотрении вопроса о рисках мы исходим из предположения о том, что риск является результатом вероятности того, что событие произойдет, и последствиями события, если оно все же происходит.

24. Последствия для окружающей среды широкомасштабной карбонизации минералов будут являться следствием необходимой добычи и удаления конечной продукции, которая не имеет никакого практического использования.

Для промышленной фиксации одной тонны CO_2 требуется от 1,6 до 3,7 тонн силикатной породы. Последствия карбонизации минералов аналогичны последствиям эксплуатации крупных, находящихся на поверхности шахт. Они включают очистку земли, ухудшение качества местного воздуха и причинение ущерба воде и растительности в результате бурения, перемещения земли, а также сортировки и выщелачивания металлов из отходов разработок, и все это может также косвенным образом привести к деградации среды обитания. Большинство продуктов карбонизации минералов необходимо удалять, для чего потребуются свалки и дополнительный транспорт (разделы 7.2.4, 7.2.6).

Будет ли являться физическая утечка хранящегося CO_2 угрозой для УХУ как варианта смягчения воздействий на изменение климата?

25. Результаты наблюдений за инженерными и естественными аналогами, а также применение моделей показывают, что доля, сохраняющаяся в должным образом выбранных и управляемых геологических пластах, весьма вероятно²⁵, превысит 99 % в течение 100 лет и, вероятно¹⁹, превысит 99 % в течение 1 000 лет.

В правильно выбранных, спроектированных и управляемых местах геологического хранения огромная часть общего количества CO_2 будет постепенно фиксироваться различными механизмами-ловушками и в таком случае может храниться в течение миллионов лет. Благодаря этим механизмам хранение может стать более безопасным в течение более длительных сроков (разделы 1.6.3, 5.2.2, 5.7.3.4, таблица 5.5).

26. Выброс CO_2 в результате хранения в океане будет постепенным в течение сотен лет.

Данные индикатора отслеживания океана и расчеты моделей показывают, что в случае хранения в океане удерживаемая доля составляет, в зависимости от глубины и места закачивания, 65–100 % через 100 лет и 30–85 % через 500 лет (более низкая процентная доля при заканчивании на глубину 1 000 м, более высокая процентная доля — на глубину 3 000 м) (разделы 1.6.3, 6.3.3, 6.3.4, таблица 6.2).

27. В случае карбонизации минералов хранящийся CO_2 не будет выбрасываться в атмосферу (разделы 1.6.3, 7.2.7).

28. Если происходит постоянная утечка CO_2 , она может, по меньшей мере частично, уравновесить выгоды УХУ для смягчения воздействий на изменение климата. Оценки последствий утечки для смягчения воздействий на изменение климата зависят от основы, выбранной для принятия

решений, и от имеющейся информации о тех долях, которые удерживаются при геологическом хранении или хранении в океане, как показано в пунктах 25 и 26.

Исследования, проведенные с целью изучения вопроса о том, каким образом заниматься непостоянным хранением, основаны на разных подходах: стоимость задержки выбросов, минимизация расходов по конкретному сценарию смягчения воздействий или допустимые будущие выбросы в контексте предполагаемой стабилизации атмосферных концентраций парниковых газов. В некоторых из этих исследований допускается компенсация будущей утечки за счет дополнительных сокращений выбросов; результаты зависят от предположений в отношении будущей стоимости сокращений, учетных ставок, количества хранящегося CO_2 и предполагаемого уровня стабилизации атмосферной концентрации. В других исследованиях компенсация не рассматривается в качестве варианта вследствие политических и институциональных неопределенностей, и анализ концентрируется на ограничениях, устанавливаемых предполагаемым уровнем стабилизации и хранящегося количества. Хотя конкретные результаты ряда исследований меняются в зависимости от методов и сделанных предположений, все исследования подразумевают, что если система УХУ является приемлемой в качестве меры смягчения воздействий, то должен быть указан верхний предел объема утечки, которая может иметь место (разделы 1.6.4, 8.4).

Каковы правовые и нормативные вопросы, связанные с осуществлением хранения CO_2 ?

29. Некоторые нормы, регулирующие деятельность в подповерхностной зоне, действительно существуют и могут иметь косвенное, а в некоторых случаях непосредственное отношение к геологическому хранению, однако не многие страны специально разработали правовую или нормативную основу, касающуюся вопросов долгосрочного хранения CO_2 .

Существующие законы и нормы, касающиеся, в частности, горнодобывающей промышленности, операций с нефтью и газом, контроля за загрязнением, удаления отходов, питьевой воды, переработки газов высокого давления и прав собственности на подповерхностную зону, могут иметь отношение к геологическому хранению CO_2 . Как правило, нерешенными остаются вопросы долгосрочной ответственности, связанные с утечкой CO_2 в атмосферу и последствиями для местной окружающей среды. Некоторые государства принимают на себя ответственность в ситуациях, сопоставимых с хранением CO_2 , таких как подземная разработка месторождений (разделы 5.8.2, 5.8.3, 5.8.4).

30. До сих пор не согласованы какие-либо формальные толкования в отношении того, является ли совместимым с определенными нормами международного права закачивание

²⁵ «Весьма вероятно» — это вероятность, составляющая 90–99 %

CO₂ в геологические структуры подстилающей поверхности придонного слоя или в океан, или при каких условиях оно является совместимым с указанными нормами.

В настоящее время имеется несколько договоров (особенно Лондонская конвенция²⁶ и Конвенция ОСПАР²⁷), которые потенциально применяются к закачиванию CO₂ в геологические структуры подстилающей поверхности придонного слоя или в океан. Все эти договоры были разработаны без конкретного учета хранения CO₂ (разделы 5.8.1, 6.8.1).

Каковы последствия УХУ для кадастров и учета выбросов?

31. Нынешние Руководящие принципы МГЭИК²⁸ не включают методы, непосредственно касающиеся оценки выбросов, связанных с УХУ.

Общее руководство, обеспечиваемое МГЭИК, может применяться к УХУ. Несколько стран действуют таким образом в настоящее время, используя одновременно свои национальные методы для оценки выбросов. В руководящих принципах МГЭИК как таковых пока не предусматриваются конкретные методы для оценки выбросов, связанных с УХУ. Ожидается, что они будут содержаться в Руководящих принципах МГЭИК национальных инвентаризаций парниковых газов 2006 г. Может возникнуть необходимость в конкретной методике, касающейся чистого улавливания и хранения CO₂, физической утечки, выбросов из неорганизованных источников и негативных выбросов, связанных с применениями биомассы в системах УХУ (разделы 9.2.1, 9.2.2).

32. Геологическое хранение предусматривается во всех немногочисленных существующих в настоящее время проектах УХУ, и поэтому имеется ограниченный опыт в области мониторинга, проверки и представления информации о фактических показателях физической утечки и связанных с этим неопределенностях.

Имеется или разрабатывается несколько методов мониторинга и проверки выбросов CO₂ из систем УХУ, однако они отличаются друг от друга с точки зрения применимости, характеристик конкретного места, пределов и неопределенностей обнаружения (разделы 9.2.3, 5.6, 6.6.2).

33. CO₂ может улавливаться в одной стране и храниться в другой, при этом действуют разные обязательства. В отношении УХУ существуют не только вопросы, связанные с учетом трансграничного хранения.

Правила и методы учета необходимо, вероятно, согласовать соответствующим образом. Необходимо будет учитывать возможную в будущем физическую утечку из места хранения (раздел 9.3).

Что представляют собой пробелы в знаниях?

34. Имеющиеся в настоящее время знания характеризуются пробелами в отношении некоторых аспектов УХУ. Большой объем знаний и опыта приведет к уменьшению неопределенностей и, таким образом, будет способствовать процессу принятия решений относительно применения систем УХУ в целях смягчения воздействий на изменение климата (раздел ТР.10).

²⁶ Конвенция по предотвращению загрязнения моря сбросами отходов и других материалов (1972 г.) и ее Лондонский протокол (1996 г.), который еще не вступил в силу.

²⁷ Конвенция по защите морской среды северо-восточной части Атлантического океана, которая была принята в Париже (1992 г.). ОСПАР – это сокращение от Осло-Париж.

²⁸ Пересмотренные руководящие принципы МГЭИК национальных инвентаризаций парниковых газов 1996 г. и доклады о Руководящих указаниях по эффективной практике; Руководящие указания по эффективной практике и учет факторов неопределенности в национальных кадастрах парниковых газов, а также Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства.

Специальный доклад МГЭИК

Улавливание и хранение двуокиси углерода

Техническое резюме

Координирующие ведущие авторы

Эдуард Рубин (США), Лео Мейер (Нидерланды), Хелен де Конинк (Нидерланды)

Ведущие авторы

Хуан Карлос Абанадес (Испания), Макото Акаи (Япония), Сэлли Бенсон (США), Кен Калдейра (США), Питер Кук (Австралия), Огунлаге Дэвидсон (Сьерра-Леоне), Ричард Доктор (США), Джеймс Дулей (США), Поль Фриунд (Соединенное Королевство), Джон Гейл (Соединенное Королевство), Вольфганг Гейдуг (Германия), Говард Герцог (США), Дэвид Кейт (Канада), Марко Мадзотти (Италия и Швейцария), Берт Метц (Нидерланды), Балгис Осман-Елаша (Судан), Эндрю Пальмер (Соединенное Королевство), Риитта Пипатти (Финляндия), Коен Сmekенс (Бельгия), Мохаммед Солтание (Иран), Келли (Каилаи) Тамбимуту (Австралия и Канада), Боб ван дер Зван (Нидерланды)

Редактор-рецензент

Исмаил эль-Гизули (Судан)

1. Введение и основа настоящего доклада

Улавливание и хранение двуокси углерода (УХУ) — тема настоящего Специального доклада — рассматривается в качестве одного из вариантов сокращения атмосферных выбросов CO_2 в результате деятельности человека. Целью этого Специального доклада является оценка нынешнего состояния уровня знаний о технических, научных, связанных с окружающей средой, экономических и социальных аспектах УХУ и определение места УХУ в контексте других вариантов в портфеле потенциальных мер по смягчению воздействий на изменение климата.

Структура настоящего Технического резюме повторяет структуру Специального доклада. Этот вводный раздел является общей основой для оценки, наряду с кратким обзором систем УХУ. В разделе 2 дается описание основных источников CO_2 — мера, необходимая для оценки практической осуществимости УХУ в глобальном масштабе. Затем в разделе 3 рассматриваются технические варианты улавливания CO_2 , а в разделе 4 главное внимание уделяется методам транспортировки CO_2 . После этого анализируется каждый из вариантов хранения. Главной темой раздела 5 является геологическое хранение, раздела 6 — хранение в океане, и раздела 7 — карбонизация минералов и промышленные виды использования CO_2 . Затем в разделе 8 обсуждается общая стоимость и экономический потенциал УХУ, после чего в разделе 9 анализируются последствия УХУ для кадастров и учета выбросов парниковых газов. В заключительной части Технического резюме рассматриваются пробелы в знаниях, особенно пробелы, имеющие большое значение с политической точки зрения.

Обзор систем улавливания и хранения CO_2

CO_2 выбрасывается главным образом в результате сжигания ископаемого топлива как в крупных установках для сжигания, таких как установки, используемые для производства электроэнергии, так и в меньших по размеру, распространенных источниках, таких как автомобильные двигатели и печи, используемые в жилых и коммерческих зданиях. Выбросы CO_2 также являются результатом некоторых промышленных процессов и процессов, связанных с добычей природных ресурсов, а также сжигания лесов при расчистке земли. УХУ будет, вероятнее всего, применяться в крупных точечных источниках CO_2 , таких как энергоустановки или масштабные промышленные процессы. Некоторые из этих источников могут давать декарбонизированное топливо, например водород, для транспортного, промышленного и строительного секторов, и таким образом снижать выбросы из этих распределенных источников.

УХУ связано с применением технологии, в первую очередь улавливания и концентрации CO_2 , образовавшегося в

промышленных и энергетических источниках, его транспортировкой в надлежащее место хранения и последующим хранением без контакта с атмосферой в течение длительного периода времени. УХУ позволит, таким образом, использовать ископаемое топливо при небольшом объеме выбросов парниковых газов. Применение УХУ в источниках энергии на биомассе может привести к чистой абсорбции CO_2 из атмосферы (часто упоминаемой в качестве «негативных выбросов») благодаря улавливанию и хранению атмосферного CO_2 , поглощаемого биомассой, при том условии, что сбор этой биомассы характеризуется устойчивым показателем.

На рисунке TP.1 показаны три основных компонента процесса УХУ: улавливание, транспортировка и хранение. Все три эти компонента присутствуют в современных промышленных операциях, хотя в основном не с целью хранения CO_2 . Этап улавливания связан с отделением CO_2 от других газообразных продуктов. Для процессов сжигания топлива, например в энергоустановках, могут применяться технологии сепарации для улавливания CO_2 после сгорания или декарбонизации топлива до сжигания. Этап транспортировки может требоваться для доставки захваченного CO_2 в подходящее место хранения, расположенное на определенном расстоянии от источника CO_2 . В целях упрощения как транспортировки, так и хранения CO_2 захваченный CO_2 , как правило, подвергается компрессии до высокой плотности в установке для улавливания. Потенциальные методы хранения включают закачивание в подземные геологические формации, закачивание в океан на больших глубинах или промышленное фиксирование в неорганических карбонатах. В некоторых промышленных процессах небольшие объемы захваченного CO_2 могут также использоваться и храниться в изготовленной продукции.

Уровень технического совершенства отдельных компонентов системы УХУ характеризуется широким разбросом. Некоторые технологии широко применяются на рынках с высоким уровнем развития, главным образом в нефтегазовой промышленности, в то время как другие технологии до сих пор находятся на стадии исследований, разработки или демонстрации. В таблице TP.1 дается обзор нынешнего статуса всех компонентов УХУ. По состоянию на середину 2005 г. имелось три коммерческих проекта, в которых улавливание CO_2 увязывалось с его геологическим хранением: проект Слейпнера в Норвегии по переработке природного газа в море, проект Уэйберна по повышенному извлечению нефти (ПИН)¹ в Канаде (связанный с хранением CO_2 , улавливание которого было осуществлено в США) и проект Ин-Салаха по природному газу в Алжире. В рамках каждого из этих проектов осуществляется улавливание и хранение 1–2 Мт CO_2 в год. Следует отметить, однако, что системы УХУ пока не применяются в крупных энергоустановках на ископаемом топливе (например 500 МВт) и что данные системы в целом не могут быть столь совершенными, как их отдельные компоненты.

¹ В этом докладе ПИН означает повышенное извлечение нефти с использованием CO_2 .

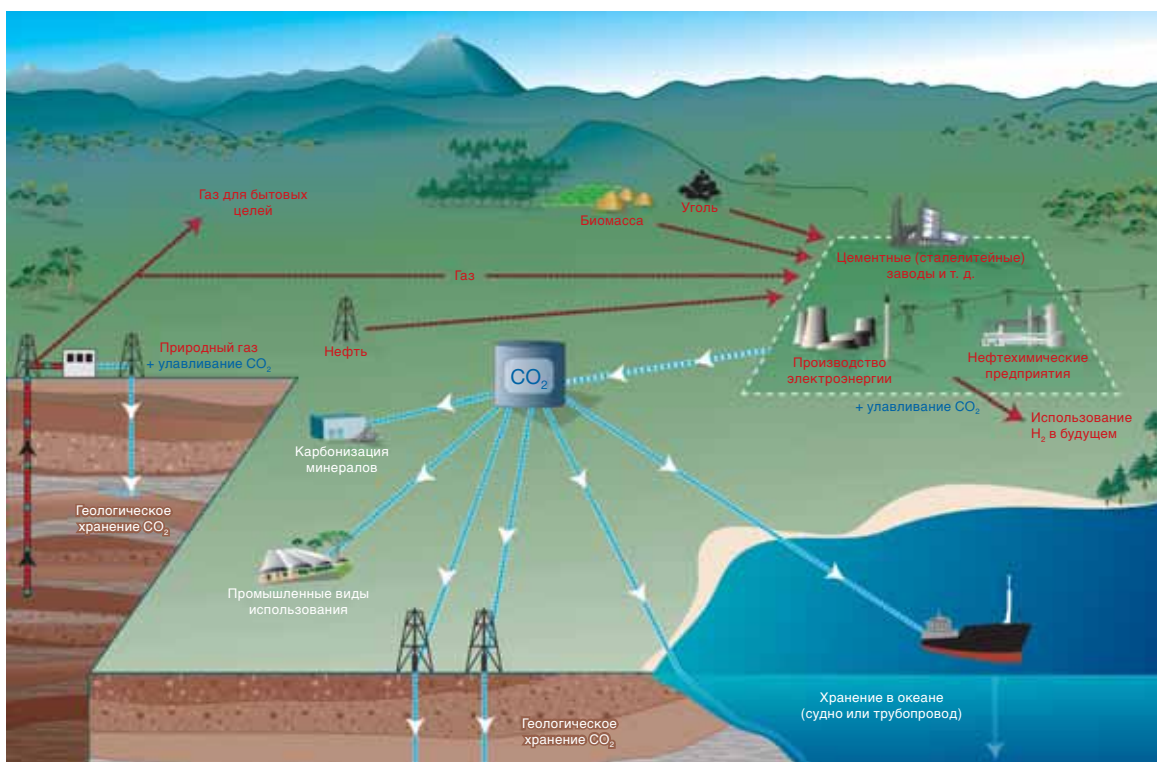


Рисунок ТР.1. Схематическая диаграмма возможных систем УХУ. Она показывает источники, для которых могли бы подойти системы УХУ, а также варианты транспортировки и хранения CO_2 . (С разрешения Объединенного центра исследований технологий улавливания и хранения парниковых газов — ОЦИТПГ.)

Чем объясняется интерес к улавливанию и хранению CO_2 ?

В 1992 г. результатом озабоченности международного сообщества в отношении изменения климата явилось принятие Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (РКИК ООН). Конечной целью этой Конвенции является «стабилизация концентраций парниковых газов в атмосфере на таком уровне, который не допускал бы опасного антропогенного воздействия на климатическую систему». С учетом этой перспективы контекст для рассмотрения УХУ (и других вариантов смягчения воздействия) представляет собой среду, в которой выбросы CO_2 ограничены в соответствии с международной целью по стабилизации атмосферных концентраций парниковых газов. В большинстве сценариев глобального использования энергии прогнозируется существенное увеличение выбросов CO_2 в течение этого века в случае непринятия конкретных мер по смягчению воздействий на климат. В них также предполагается, что обеспечение первичной энергией будет по-прежнему осуществляться главным образом за счет ископаемого топлива по меньшей мере до середины века (см. раздел 8). Масштабы сокращения выбросов, необходимые для стабилизации атмосферной концентрации CO_2 , будут зависеть как от уровня будущих выбросов (исходные усло-

вия), так и от поставленной задачи в отношении долгосрочной концентрации CO_2 : чем ниже уровень задачи по стабилизации и чем выше исходные выбросы, тем больше необходимое сокращение выбросов CO_2 . В Третьем докладе об оценках МГЭИК (ТДО) говорится, что в зависимости от рассматриваемого сценария в этом столетии необходимо будет предотвратить кумулятивные выбросы в сотни или даже тысячи гигаатонн CO_2 , для того чтобы стабилизировать концентрацию CO_2 на уровне 450–750 ppmv². В ТДО также делается вывод о том, что «большинство результатов моделей показывает, что известные технологические варианты³ могут обеспечить широкий диапазон уровней стабилизации CO_2 в атмосфере», но что «ни один вариант технологии не обеспечит все необходимые сокращения выбросов». Для достижения стабилизации скорее потребуется комбинация мер по смягчению воздействия. Эти известные технологические варианты имеются для целей стабилизации, хотя в ТДО содержится предупреждение о том, что «осуществление потребует соответствующих социально-экономических и институциональных изменений».

В этом контексте наличие УХУ в портфеле вариантов для сокращения выбросов парниковых газов может способствовать достижению целей стабилизации. Другие технологические варианты, которые были более подробно проанализированы в

² ppmv — это количество частей на миллион по объему.

³ «Известные технологические варианты» — это технологии, которые существуют в настоящее время на стадии функционирования или экспериментальной установки, о чем говорится в сценариях смягчения воздействия, рассмотренных в ТДО. Они не включают любые новые технологии, которые требуют серьезных технологических прорывов. Известные технологические варианты описаны в ТДО, и несколько сценариев смягчения воздействий включают УХУ.

Таблица ТР.1. Нынешний уровень совершенства компонентов систем УХУ. Знак «X» показывает наивысший уровень совершенства для каждого компонента. Имеются также менее совершенные технологии для большинства компонентов.

Компонент УХУ	Технология УХУ	Исследовательский этап ^a	Демонстрационный этап ^b	Экономически осуществимый при определенных условиях ^c	Развитый рынок ^d
Улавливание	После сжигания			X	
	До сжигания			X	
	Сжигание обогащенного кислородом топлива		X		
	Промышленная сепарация (переработка природного газа, производство аммиака)				X
Транспортировка	Трубопровод				X
	Перевозка судами			X	
Геологическое хранение	Повышенное извлечение нефти (ПИН)				X ^e
	Газовые или нефтяные месторождения			X	
	Соленосные формации			X	
	Повышенное извлечение угольного метана (ПИУМ) ^f		X		
Хранение в океане	Прямое закачивание (по типу растворения)	X			
	Прямое закачивание (по типу озера)	X			
Карбонизация минералов	Природные силикатные минералы	X			
	Материалы отходов		X		
Промышленные виды использования CO ₂					X

^a Исследовательский этап означает, что базовая наука является доступной, однако технология находится в настоящее время на уровне концептуальной разработки или лабораторных или стендовых испытаний и не была продемонстрирована в экспериментальной установке.

^b Демонстрационный этап означает, что технология разработана и действует на уровне экспериментальной установки, однако требует дальнейшей доработки, для того чтобы данная технология была готова для проектирования и создания полноценной системы.

^c Экономически осуществимый при определенных условиях означает, что технология является хорошо понятой и используется в отдельных коммерческих применениях, например, если существует благоприятный налоговый режим или особо благоприятные рыночные условия, или при переработке порядка 0,1 МтСО₂·год⁻¹ с менее чем пятью повторениями данной технологии.

^d Развитый рынок означает, что технология применяется в настоящее время с многочисленными ее повторениями во всем мире.

^e Закачивание CO₂ для ПИН является совершенной рыночной технологией, однако при ее использовании для хранения CO₂ она лишь «экономически осуществима при определенных условиях».

^f ПИУМ — это использование CO₂ для повышенного извлечения метана, присутствующего в не имеющих промышленного значения угольных пластах, посредством избирательной адсорбции CO₂ на угле. Не имеющие промышленного значения угольные пласты будут вряд ли разрабатываться, поскольку они слишком глубоко залегают или являются слишком тонкими. В случае последующей разработки произойдет выброс хранящегося CO₂.

предыдущих оценках МГЭИК, включают: 1) снижение спроса на энергию путем повышения эффективности преобразования энергии и/или устройств для ее использования; 2) декарбонизацию энергоносителей (или благодаря переходу к менее углеродоемким видам топлива (от угля к природному газу, например) и/или расширение использования возобновляемых источников энергии и/или ядерной энергии (каждый из этих источников в среднем выбрасывает меньшее или нулевое количество CO₂); 3) поглощение CO₂ благодаря более широкому использованию естественных поглотителей с биологической фиксацией; и 4) сокращение объема парниковых газов, иных нежели CO₂.

Результаты модельных расчетов, представленные далее в этом докладе, показывают, что использование УХУ в сочетании с дру-

гими мерами может существенным образом снизить стоимость обеспечения стабилизации и расширит рамки действий, связанных с достижением этих сокращений. Интерес к этой технологии объясняется наличием в настоящее время значительной зависимости во всем мире от ископаемого топлива (приблизительно 80 % общего потребления энергии), потенциалом УХУ для сокращения выбросов CO₂ в течение следующего столетия, а также совместимостью систем УХУ с существующими энергетическими инфраструктурами.

Основные вопросы для этой оценки

Имеется ряд вопросов, которые необходимо рассмотреть, для того чтобы попытаться понять ту роль, которую системы УХУ

могут играть для смягчения воздействий на изменение климата. Вопросы, которые возникают и анализируются в разных разделах этого Технического резюме, включают следующие:

- Каков настоящий статус технологии УХУ?
- Каков потенциал для улавливания и хранения CO_2 ?
- Какова стоимость осуществления?
- Как долго следует хранить CO_2 для достижения существенного смягчения воздействий на изменение климата?
- Каковы риски, связанные с УХУ, для здоровья, безопасности и окружающей среды?
- Что можно сказать по поводу общественного восприятия УХУ?
- Каковы правовые вопросы, связанные с осуществлением хранения CO_2 ?
- Каковы последствия для кадастров и учета выбросов?
- Каков потенциал для распространения и передачи технологии УХУ?

При проведении анализа УХУ как варианта смягчения воздействий на изменение климата исключительно важно, чтобы итоговые выбросы из данной системы, особенно выбросы CO_2 , определялись и оценивались транспарентным образом. Поэтому подчеркивается важное значение «системного» подхода к УХУ, поскольку выбор надлежащей системной границы является существенным для проведения правильного анализа. Учитывая энергетические потребности, связанные с вариантами улавливания и определенными вариантами хранения и использования, а также возможность утечки из резервуаров-хранилищ, жизненно важное значение играет оценка технологической цепочки УХУ в целом.

С точки зрения как атмосферной стабилизации, так и долгосрочного устойчивого развития, хранение CO_2 должно продолжаться в течение временных периодов, которые являются достаточно продолжительными для внесения существенного вклада в смягчение воздействий на изменение климата. В этом докладе продолжительность хранения CO_2 выражается в виде «удерживаемой доли», которая определяется в качестве доли кумулятивной закачанной массы CO_2 , сохраняющейся в резервуаре-хранилище в течение определенного периода времени. Далее приводятся оценки подобных долей для разных временных периодов и вариантов хранения. Вопросы возникают не только по поводу того, как долго CO_2 останется в состоянии хранения, но также и о том, что является приемлемыми количествами медленной, постоянной утечки⁴ из хранилища. В разделе 8 рассматриваются разные подходы к этому вопросу.

УХУ явилось бы вариантом для стран со значительными источниками CO_2 , подходящими для осуществления улавливания, у которых имеется доступ к местам хранения и опыт операций с нефтью или газом и которые нуждаются в удовлетворении своих связанных с развитием потребностей в области создания окружающей среды с ограниченным содержанием углерода. В литературе, оценка которой дается в Специальном докладе МГЭИК

«Методологические и технологические аспекты передачи технологий», указывается, что имеются многочисленные потенциальные барьеры, которые могут помешать применению в развивающихся странах даже тех технологий, которые являются совершенными в промышленно развитых странах. Основным вопросом, касающимся принятия систем УХУ во всем мире, является ликвидация этих барьеров и создание условий, которые будут способствовать распространению данной технологии в развивающихся странах.

2. Источники CO_2

В этом разделе содержится описание основных существующих в настоящее время антропогенных источников выбросов CO_2 и их связи с потенциальными местами хранения. Как отмечалось выше, выбросы CO_2 в результате деятельности человека осуществляются из ряда разных источников, главным образом в результате сжигания ископаемого топлива, используемого при производстве энергии, перевозках, в промышленных процессах, а также жилых и коммерческих зданиях. CO_2 также выбрасывается в ходе определенных промышленных процессов, таких как производство цемента или водорода, и при сжигании биомассы. В этом разделе рассматриваются также будущие выбросы.

Современные источники и характеристики CO_2

С целью оценки потенциала УХУ как варианта сокращения глобальных выбросов CO_2 рассматривалось существующее глобальное географическое распределение крупных стационарных источников выбросов CO_2 и их близость к потенциальным местам хранения. Выбросы CO_2 в жилом, коммерческом и транспортном секторах не рассматривались в этом анализе, поскольку эти источники выбросов являются отдельными, незначительными и зачастую мобильными источниками, и поэтому не подходят для целей улавливания и хранения. Вопросы, рассматриваемые в данном разделе, включают также анализ потенциальных будущих источников CO_2 на основе нескольких сценариев будущего глобального использования энергии и выбросов в течение последующего столетия.

В глобальном плане выбросы CO_2 в результате использования ископаемого топлива составили в 2000 г. в общей сложности около 23,5 Гт CO_2 ·год⁻¹ (6 ГтС·год⁻¹). Из этого количества почти 60 % приходилось на долю крупных (>0,1 Мт CO_2 ·год⁻¹) стационарных источников выбросов (см. таблицу ТР.2). Однако не все эти источники подходят для улавливания CO_2 . Хотя прошедшие оценку источники распределены по всему миру, база данных показывает четыре особых района концентрации выбросов: Северная Америка (среднезападная и восточная части США), Европа (северо-западный регион), Восточная Азия (восточное побережье Китая) и Южная Азия (Индийский субконтинент). Крупномасштабные источники биомассы, напротив, гораздо меньше по количеству и распределены менее глобальным образом.

⁴ В отношении хранения CO_2 , утечка определяется как просачивание закачанной жидкости из хранилища. Таково самое общее значение, используемое в этом Резюме. При использовании в контексте торговли сокращениями выбросов двуокси углерода оно может означать изменение в антропогенных выбросах из источников или абсорбцию поглотителями, которые происходят за пределами границы проекта.

Таблица ТР.2. Характеристики по виду процесса или промышленной деятельности мировых крупных стационарных источников CO₂, выбросы которых превышают 0,1 МтCO₂ в год.

Процесс	Количество источников	Выбросы (МтCO ₂ ·год ⁻¹)
Ископаемое топливо		
Энергетика	4 942	10 539
Производство цемента	1 175	932
Нефтеочистительные заводы	638	798
Сталелитейная промышленность	269	646
Нефтехимическая промышленность	470	379
Переработка нефти и газа	Данные отсутствуют	50
Другие источники	90	33
Биомасса		
Биоэтанол и биоэнергетика	303	91
Итого	7 887	13 468

В настоящее время огромное большинство крупных источников выбросов характеризуется концентрациями CO₂ менее 15 % (в некоторых случаях значительно меньше). В то же время небольшая часть (менее 2 %) промышленных источников на ископаемом топливе имеет концентрации CO₂, превышающие 95 %. Источники с высокими показателями концентрации являются потенциальными кандидатами для раннего осуществления УХУ, поскольку на этапе улавливания потребуются только дегидратация и компрессия (см. раздел 3). Анализ этих источников с высокой чистотой, которые находятся в пределах 50 км от формаций хранения и которые обладают потенциалом для получения дохода (благодаря использованию CO₂ для расширенного производства углеводорода посредством ПИУМ или ПИН), показывает, что из

подобных источников в настоящее время выбрасывается приблизительно 360 МтCO₂ в год. Некоторые источники биомассы, такие как производство биоэтанола, также являются источниками CO₂ с высокой концентрацией, которые могли бы также использоваться в аналогичных применениях.

Расстояние между местом выброса и местом хранения может иметь существенное значение с точки зрения того, может ли УХУ играть важную роль в сокращении выбросов CO₂. На рисунке ТР.2а показаны основные источники выбросов CO₂ (обозначенные точками), а на рисунке ТР.2b — седиментационные бассейны, перспективные с точки зрения геологического хранения (показаны разными оттенками серого цвета). В общем плане эти рисунки показывают, что имеется потенциал для хорошего коррелирования

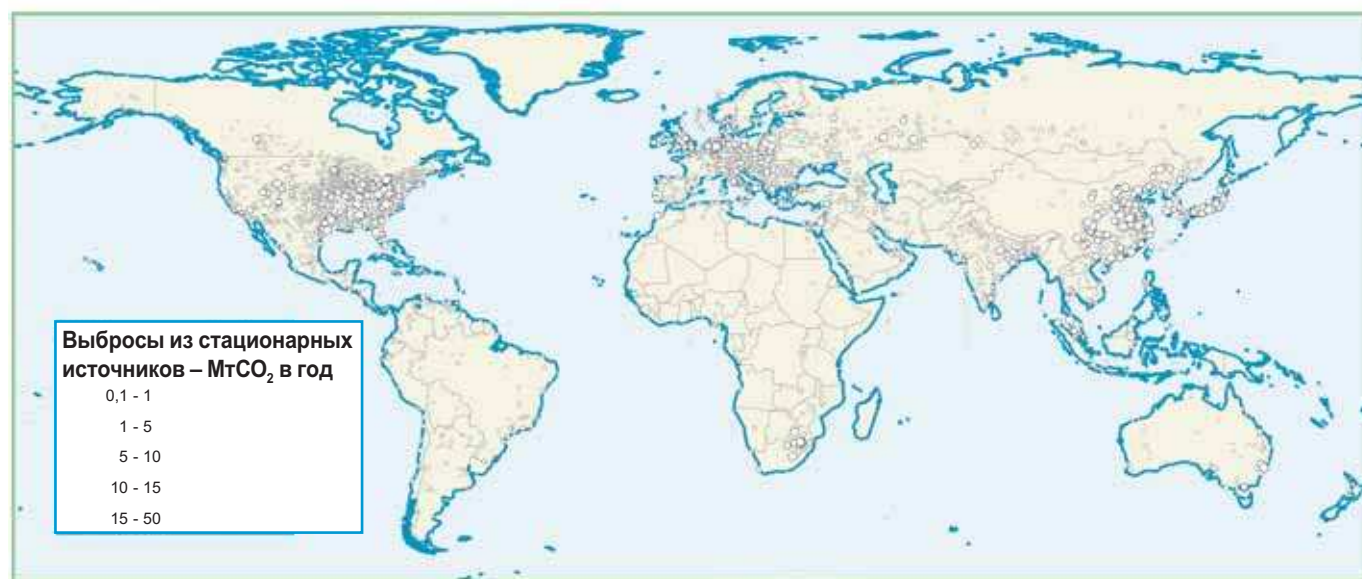


Рисунок ТР.2а. Глобальное распределение крупных стационарных источников CO₂ (на основе компиляции открытой информации о глобальных источниках выбросов, МЭА, ПГ, 2002 г.)

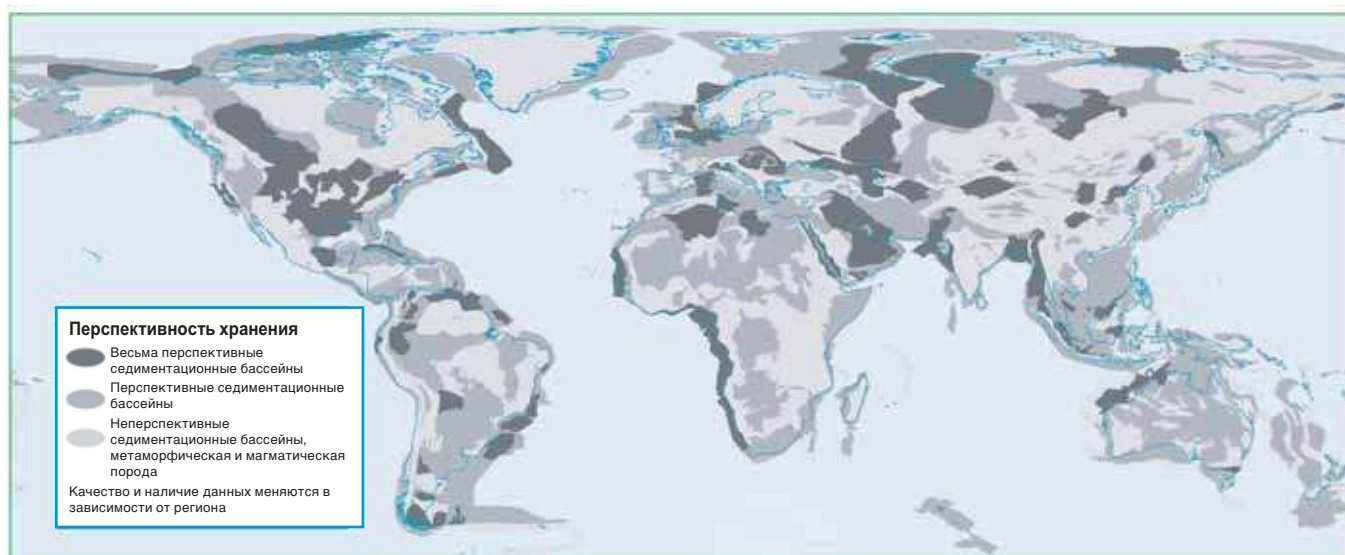


Рисунок ТР.2b. Перспективные районы в седиментационных бассейнах, в которых могут быть найдены подходящие соленосные образования, нефтяные или газовые месторождения или угольные пласты. Места для хранения в угольных пластах включены только частично. Перспективность — это качественная оценка вероятности наличия подходящего для хранения места в данном районе на основе имеющейся информации. Этот рисунок следует рассматривать лишь в качестве руководства, поскольку он основан на частичных данных, качество которых может меняться в зависимости от региона и которые могут меняться со временем и с получением новой информации. (С разрешения «Геосайенс Остралия».)

между основными источниками и перспективными седиментационными бассейнами, при этом многие источники находятся либо непосредственно сверху, либо в пределах разумных расстояний (менее 300 км) от районов с потенциалом для геологического хранения. Бассейны, показанные на рисунке ТР.2b, не были идентифицированы или оценены в качестве подходящих резервуаров для хранения; для подтверждения пригодности этих потенциальных мест хранения требуется проведение более подробного геологического анализа на региональном уровне.

Будущие источники выбросов

В Специальном докладе МГЭИК о сценариях выбросов (СДСВ) будущие выбросы CO_2 прогнозируются на основе шести иллюстративных сценариев, в которых глобальные выбросы CO_2 находятся в диапазоне 29–44 Гт CO_2 (8–12 ГтС) в год в 2020 г. и 23–84 Гт CO_2 (6–23 ГтС) в год в 2050 г. Прогнозируется, что количество источников выбросов CO_2 из сектора производства электроэнергии и промышленного сектора существенно увеличится до 2050 г., главным образом в Южной и Восточной Азии. Напротив, в Европе количество подобных источников несколько уменьшится. Пропорция источников с высоким и низким содержанием CO_2 будет являться функцией от размера и показателя внедрения установок, работающих на основе газификации или сжижения ископаемого топлива, для производства водорода или других жидких и газообразных продуктов. Чем больше будет количество подобных установок, тем больше будет количество источников с высокими концентрациями CO_2 , которые технически подходят для улавливания.

Прогнозируемый потенциал улавливания CO_2 , связанный с вышеуказанными диапазонами выбросов, оценивается на уровне

годового показателя в 2,6–4,9 Гт CO_2 к 2020 г. (0,7–1,3 ГтС) и 4,7–37,5 Гт CO_2 к 2050 г. (1,3–10 ГтС). Эти цифры соответствуют 9–12 % и 21–45 % глобальных выбросов CO_2 в 2020 и 2050 гг. соответственно. Диапазоны выбросов и улавливания отражают характерные неопределенности анализов на основе сценариев и моделирования, а также технические ограничения применения УХУ. В этих сценариях учитывается только улавливание CO_2 в результате использования ископаемого топлива, а не из источников биомассы. В то же время, выбросы из крупных установок по преобразованию биомассы могли бы также быть технически пригодными для улавливания.

Потенциальное развитие энергоносителей с низким содержанием углерода связано с будущим количеством и размером крупных, стационарных источников с высокими концентрациями CO_2 . В сценариях также предполагается, что крупномасштабное производство энергоносителей с низким содержанием углерода, таких как электричество или водород, может в пределах нескольких десятилетий начать вытеснять ископаемые виды топлива, которые используются в настоящее время небольшими, распределенными источниками в жилых и коммерческих зданиях и в транспортном секторе (см. раздел 8). Эти энергоносители можно получать из ископаемых видов топлива и/или биомассы в крупных установках, которые будут являться крупными точечными источниками CO_2 (энергоустановки или установки, аналогичные современным установкам для производства водорода и природного газа). Эти источники будут подходить для улавливания CO_2 . Подобные применения УХУ могут сократить разбросанные выбросы CO_2 из транспортного сектора и распределенных систем энергоснабжения. В настоящее время, однако, трудно прогнозировать вероятное количество, размер или географическое распределение источников, связанных с подобными разработками.

3. Улавливание CO₂

В этом разделе рассматривается технология улавливания УХУ. Как показано в разделе 2, энергоустановки и другие крупномасштабные промышленные процессы являются первыми кандидатами для улавливания и главной темой этого раздела.

Варианты и применения технологии улавливания

Цель улавливания CO₂ заключается в создании концентрированного потока CO₂ высокого давления, который можно легко транспортировать к месту хранения. Хотя, в принципе, весь газовый поток, содержащий низкие концентрации CO₂, можно транспортировать и закачивать под землю, расходы на энергию и другие связанные с этим расходы, как правило, делают подобный подход непрактичным. Поэтому для целей транспортировки и хранения необходимо создавать почти чистый поток CO₂. Сегодня уже функционируют применения для сепарации CO₂ в крупных промышленных установках, включая установки для переработки природного газа и производства аммиака. В настоящее время CO₂, как правило, абсорбируется для очистки других потоков промышленных газов. Абсорбция используется для целей хранения лишь в нескольких случаях; чаще всего CO₂ выбрасывается в атмосферу. Процессы улавливания всегда применялись для получения коммерчески выгодных количеств CO₂ из потоков дымовых газов, образующихся в результате сжигания угля или природного газа. Сегодня, однако, на крупных энергоустановках (например 500 МВт) отсутствуют какие-либо применения для улавливания CO₂.

В зависимости от указанного процесса или применения энергоустановки существуют три основные концепции улавливания CO₂, образующегося из первичного ископаемого топлива (уголь, природный газ или нефть), биомассы или смеси этих видов топлива.

Системы улавливания *после сжигания* отделяют CO₂ от дымовых газов, образующихся в воздухе в результате сжигания первичного топлива. В этих системах обычно используется жидкий растворитель для захвата небольшой доли CO₂ (обычно 3–15 % по объему), присутствующего в потоке дымового газа, в котором главной составляющей является азот (из воздуха). В современной энергоустановке, работающей на угольной пыли (УП) или энергоустановке с комбинированным циклом природного газа (КЦПГ), в существующих в настоящее время системах улавливания после сжигания обычно применяется органический растворитель, такой как моноэтаноламин (MEA).

В системах улавливания *до сжигания* осуществляется обработка первичного топлива в реакторе с потоком, насыщенным воздухом или кислородом, для создания смеси, состоящей главным образом из окиси углерода и водорода («синтетический газ»). Дополнительный водород наряду с CO₂ образуется в результате реакции окиси углерода с потоком во вторичном реакторе («смещенный реактор»). После этого получившаяся смесь водорода и CO₂ может быть разделена на газовый поток CO₂ и поток водорода. Если CO₂ подлежит хранению, водород является безуглеродным энергоносителем, который может сжигаться для получения электроэнергии и/или теп-

ла. Хотя первоначальные этапы преобразования топлива являются более сложными и дорогостоящими по сравнению с системами, действующими после сжигания, образующиеся при помощи смещенного реактора высокие концентрации CO₂ (обычно 15–60 % по объему на сухой основе) и высокое давление, весьма характерные для этих применений, создают более благоприятные условия для сепарации CO₂. Улавливание до сжигания будет использоваться в энергоустановках, в которых применяется технология комбинированного цикла комплексной газификации (КЦКГ).

В системах *сжигания с обогащением топлива кислородом* вместо воздуха для сжигания первичного топлива используется кислород для получения дымового газа, который состоит главным образом из водяного пара и CO₂. Благодаря этому дымовой газ характеризуется высокими концентрациями CO₂ (более 80 % по объему). Затем водяной пар удалится посредством охлаждения и компрессии газового потока. Сжигание топлива с обогащением кислородом требует сепарации кислорода от воздуха в начале технологической цепочки, при этом в большинстве современных конструкций предполагается использование кислорода с чистотой в 95–99 %. Перед отправкой CO₂ на хранение может потребоваться дополнительная обработка дымового газа для удаления загрязнителей воздуха и несжиженных газов (таких как азот) из дымового газа. В качестве метода улавливания CO₂ в бойлерах, системы сжигания с обогащением топлива кислородом находятся на демонстрационном этапе (см. таблицу ТР.1). Проводятся исследования по применению систем с обогащенным кислородом топливом в газотурбинных системах, однако концептуальные разработки подобных применений находятся пока на стадии исследований.

На рисунке ТР.3 приводится схематическая диаграмма основных процессов и систем улавливания. Все они требуют наличия этапа сепарации CO₂, H₂ или O₂ от основного газового потока (такого как дымовой газ, синтетический газ, воздушный или неочищенный природный газ). Эти этапы сепарации могут быть осуществлены при помощи физических или химических растворителей, мембран, твердых сорбентов или криогенного разделения. Выбор конкретной технологии улавливания определяется главным образом условиями процесса, в которых она должна действовать. Современные системы улавливания после или до сжигания, предназначенные для энергоустановок, могут улавливать 85–95 % образующегося CO₂. Возможна более высокая эффективность улавливания, хотя сепараторы становятся значительно большими по размеру, более энергоемкими и более дорогостоящими. Для улавливания и компрессии требуется больше энергии приблизительно на 10–40 % по сравнению с аналогичной установкой без улавливания, в зависимости от типа данной системы. Ввиду сопутствующих выбросов CO₂ чистый объем захваченного CO₂ составляет приблизительно 80–90 %. Системы сжигания топлива с обогащением кислородом в принципе могут улавливать почти весь образующийся CO₂. В то же время, из-за необходимости в дополнительных системах обработки газа для удаления таких загрязнителей, как окись серы и азота, уровень улавливания CO₂ снижается и составляет чуть более 90 %.

Как отмечалось в разделе 1, улавливание CO₂ уже используется в нескольких промышленных применениях (см. рисунок ТР.4).

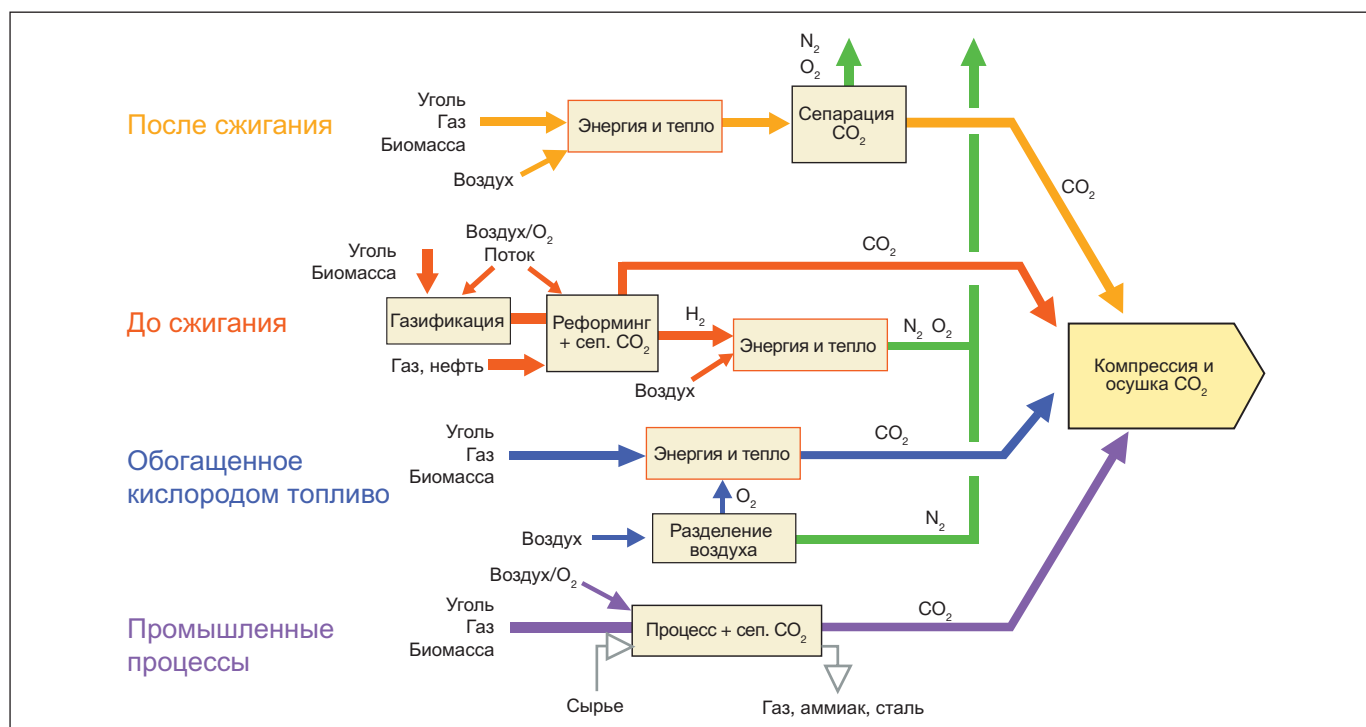


Рисунок ТР.3. Обзор процессов и систем улавливания CO₂



Рисунок ТР.4. (а) Улавливание CO₂ после сжигания топлива на установке в Малайзии. В этой установке применяется процесс химической абсорбции для отделения 0,2 МтCO₂ в год от потока дымового газа энергоустановки для производства мочевины, работающей на сжигании газа (с разрешения «Мицубиши хэви индастриз»); (b) улавливание CO₂ до сжигания на установке газификации угля в Северной Дакоте, США. В этой установке применяется процесс на основе физического растворителя для отделения 3,3 МтCO₂ в год из газового потока для производства синтетического природного газа. Часть захваченного CO₂ используется для проекта ПИН в Канаде.

Те же технологии, которые будут использоваться для улавливания до сжигания, применяются при крупномасштабном производстве водорода (который используется главным образом для получения аммиака и удобрений, а также на нефтеочистительных предприятиях). Отделение CO_2 от неочищенного природного газа (который обычно содержит значительное количество CO_2) также практикуется в крупном масштабе с использованием технологий, аналогичных технологиям, применяемым для улавливания после сжигания. Несмотря на наличие также коммерческих систем для отделения водорода в крупных масштабах, сжигание топлива в обогащенной кислородом среде для улавливания CO_2 находится в настоящее время на демонстрационной стадии. Кроме того, проводятся исследования для достижения более высоких уровней системной интеграции, повышения эффективности и снижения стоимости всех типов систем улавливания.

Улавливание CO_2 : риски, энергия и окружающая среда

Мониторинг, риск и правовые последствия применения систем улавливания CO_2 не представляют, по-видимому, совершенно новых проблем, поскольку они являются элементами регулярной практики контроля здоровья, безопасности и состояния окружающей среды в промышленности. Однако для работы систем улавливания CO_2 требуется большое количество энергии. Это снижает общий КПД электростанций, и поэтому они требуют больше топлива для получения каждого киловатта выработанной электроэнергии. Согласно данным обзора литературы, увеличение потребления топлива в расчете на кВт·ч для установок, улавливающих 90 % CO_2 , с применением самой совершенной современной технологии, находится в пределах 24–40 % для новых сверхкритических установок на угольной пыли, 11–22 % — для установок с КЦПГ и 14–25 % — для систем КЦКГ на угле по сравнению с аналогичными установками без УХУ. Результатом повышенного потребления топлива является увеличение объема большинства других выбросов в окружающую среду в расчете на кВт·ч, которые происходят по сравнению с новыми современными установками без улавливания CO_2 , а в случае использования угля — пропорционально более крупные объемы твердых отходов. Кроме того, возрастает потребление таких химических веществ, как аммиак и известняк, которые используются в установках на угольной пыли для контроля за выбросами окиси азота и двуокиси серы. Конструкции установок по последнему слову техники, которые еще больше снижают потребности в энергии для УХУ, также смягчают общие последствия для окружающей среды и снижают стоимость. По сравнению со многими более старыми существующими установками, более эффективные новые или модернизированные установки с УХУ могут фактически обеспечить чистые сокращения выбросов в окружающую среду на уровне установки.

Стоимость улавливания CO_2

Оценочная стоимость улавливания CO_2 на крупных электростанциях определяется по результатам исследований технологий, при-

меняющихся сегодня в коммерческом масштабе, с точки зрения инженерной конструкции (хотя нередко в разных применениях и/или в меньших масштабах по сравнению с теми, которые предполагаются в литературе), а также по результатам исследований конструктивных особенностей применительно к концепциям, которые в настоящее время находятся на стадии исследований и опытно-конструкторских разработок (НИОКР). В таблице ТР.3 обобщаются результаты работы новых сверхкритических установок с использованием УП, КЦПГ и КЦКГ, основанных на современной технологии с улавливанием CO_2 или без него. Системы улавливания для всех трех типов конструкций снижают выбросы CO_2 в расчете на кВт·ч приблизительно на 80–90 % с учетом потребления энергии, необходимой для улавливания. Все данные по установкам с использованием УП и КЦКГ, приведенные в таблице ТР.3, относятся только к битуминозным углям. Стоимость улавливания включает стоимость компрессии CO_2 (обычно до порядка 11–14 МПа), но не включает дополнительные расходы на транспортировку и хранение CO_2 (см. разделы 4–7).

Диапазон стоимости каждой из этих трех систем отражает различия в технических, экономических и функциональных предположениях, использованных в разных исследованиях. Хотя некоторые различия в указанной стоимости могут объясняться различиями в конструкции систем улавливания CO_2 , главными источниками разброса стоимости являются различия в предполагаемой конструкции, функционировании и финансировании исходной установки, в которой применяется технология улавливания (такие факторы, как размер установки, местоположение, КПД, тип горючего, стоимость горючего, коэффициент нагрузки и стоимость капитала). Ни один единый набор предположений не применяется в отношении всех ситуаций или всех частей мира, поэтому приводится диапазон стоимости.

Для исследований, перечисленных в таблице ТР.3, улавливание CO_2 повышает стоимость производства электроэнергии⁵ на 35–70 % (0,01–0,02 долл. США/кВт·ч) для установки с КЦПГ, 40–85 % (0,02–0,03 долл. США/кВт·ч) для сверхкритической установки на УП и 20–55 % (0,01–0,02 долл. США/кВт·ч) для установки с КЦКГ. В целом стоимость производства электроэнергии для электростанций на ископаемом топливе, оборудованных системой улавливания (исключая расходы на транспортировку и хранение CO_2), находится в диапазоне 0,04–0,09 долл. США/кВт·ч по сравнению с 0,03–0,06 долл. США/кВт·ч для аналогичных электростанций без системы улавливания. Согласно данным последних проведенных до настоящего времени исследований системы с КЦПГ, как правило, характеризуются более низкой стоимостью производства электроэнергии по сравнению с новыми установками на основе УП и КЦКГ (с улавливанием или без него) в случае крупных электростанций с базисной нагрузкой при высоких коэффициентах нагрузки (75 % или более) и ценах на природный газ от 2,6 до 4,4 долл. США/ГДж¹ за период службы данной установки. В то же время в случае более высоких цен на газ и/или более низких коэффициентов использования установки с КЦПГ нередко характеризуются более высокой стоимостью производства электроэнергии по сравнению с

⁵ Стоимость производства электроэнергии не следует смешивать с ценой электричества для потребителей.

Таблица ТР.3. Резюме стоимости улавливания CO₂ для новых энергоустановок, основанных на современной технологии. Поскольку эта стоимость не включает расходы (или кредиты) на транспортировку и хранение CO₂, эту таблицу не следует использовать для оценки или сравнения общей стоимости установки с разными системами улавливания. Полная стоимость установок с УХУ приводится в разделе 8.

Рабочие и стоимостные характеристики	Новая установка с КЦПГ			Новая установка на УП			Новая установка с КЦКГ		
	Диапазон		Реп. величина	Диапазон		Реп. величина	Диапазон		Реп. величина
	нижний	верхний		нижний	верхний		нижний	верхний	
Коэффициент выбросов без улавливания (кг CO ₂ /кВт*ч)	0,344	0,379	0,367	0,736	0,811	0,762	0,682	0,846	0,773
Коэффициент выбросов с улавливанием (кг CO ₂ /кВт*ч)	0,040	0,066	0,052	0,092	0,145	0,112	0,065	0,152	0,108
Процентная доля сокращения CO ₂ на кВт*ч (%)	83	88	86	81	88	85	81	91	86
КПД установки с улавливанием, на основе НЗТ (%)	47	50	48	30	35	33	31	40	35
Расход электроэнергии для улавливания (увеличение исходного компонента кВт*ч в %)	11	22	16	24	40	31	14	25	19
Требуемый объем капитала для установки без системы улавливания (долл. США/кВт)	515	724	568	1161	1486	1286	1169	1565	1326
Общий требуемый капитал для установки с системой улавливания (долл. США/кВт)	909	1261	998	1894	2578	2096	1414	2270	1825
Процентное увеличение капитальных затрат на систему улавливания (%)	64	100	76	44	74	63	19	66	37
СПЭ без системы улавливания (долл. США/кВт*ч)	0,031	0,050	0,037	0,043	0,052	0,046	0,041	0,061	0,047
СПЭ только с системой улавливания (долл. США/кВт*ч)	0,043	0,072	0,054	0,062	0,086	0,073	0,054	0,079	0,062
Увеличение СПЭ с системой улавливания (долл. США/кВт*ч)	0,012	0,024	0,017	0,018	0,034	0,027	0,009	0,022	0,016
Процентное увеличение СПЭ с системой улавливания (%)	37	69	46	42	66	57	20	55	33
Стоимость чистого захваченного CO ₂ (долл. США/тCO ₂)	37	74	53	29	51	41	13	37	23
Степень достоверности стоимости улавливания (см. таблицу 3.6)	средняя			средняя			средняя		

Сокращения: Репрезентативная величина основана на среднем значении величин, указанных в разных исследованиях; СПЭ = стоимость производства электроэнергии; НЗТ = нижнее значение теплоты. См. раздел 3.6.1 для расчета расхода энергии применительно к установкам с системой улавливания.

Примечания: Диапазоны и репрезентативные величины основаны на данных из таблиц 3.7, 3.9 и 3.10 Специального доклада. Все данные об установках на УП и с КЦКГ приводятся только для битуминозных углей при стоимости 1,0–1,5 долл. США·ГДж⁻¹ (НЗТ); все установки на УП являются сверхкритическими единицами. Данные о КЦПГ основаны на стоимости природного газа в размере 2,8–4,4 долл. США·ГДж⁻¹ (на основе НЗТ). Стоимость приводится в постоянных ценах в долл. США за 2002 г. Мощность энергоустановок находится в диапазоне приблизительно 400–800 МВт без улавливания и 300–700 МВт с улавливанием. Коэффициенты нагрузки колеблются в диапазоне 65–85 % для установок на угле и 50–95 % для газовых установок (среднее значение для каждой = 80 %). Коэффициенты постоянных затрат колеблются в диапазоне 11–16 %. Полная стоимость включает компрессию CO₂, но без дополнительных расходов на транспортировку и хранение CO₂.

электростанциями, работающими на угле и оборудованными системой улавливания или без нее. Последние исследования показывают также, что электростанции с КЦКГ были несколько более дорогостоящими без системы улавливания и несколько менее дорогостоящими при наличии системы улавливания по сравнению с электростанциями на УП аналогичного размера. В то же время разница в стоимости между энергоустановками на УП и энергоустановками с КЦКГ с системой улавливания CO₂ или без нее может меняться в значительных пределах в зависимости от типа угля и других местных факторов, таких как стоимость капитала для каждого типа установки. Поскольку еще не изготовлены полномасштабные системы с УХУ, работающие на основе КЦПГ, УП и КЦКГ, в настоящее время невозможно определить с высокой степенью достоверности абсолютную или относительную стоимость этих систем.

Не было проведено широких исследований вопроса о стоимости

модернизации существующих энергоустановок посредством оборудования их системами улавливания CO₂. В нескольких докладах указывается, что снабжение существующей установки аминовым скруббером приводит к большему снижению КПД и более высоким расходам по сравнению с теми, которые показаны в таблице ТР.3. Проведенные ограниченные исследования также свидетельствуют о том, что более экономически эффективный вариант заключается в сочетании модернизации посредством установки систем улавливания с реконструкцией бойлера и турбины для повышения эффективности и производительности установки. В отношении некоторых существующих установок, исследования показывают, что аналогичные выгоды можно получить благодаря переходу на новый электропривод с системой КЦКГ, которая включает технологию улавливания CO₂. Практическая осуществимость и стоимость всех этих вариантов в значительной мере определяется конкретными для данного места

факторами, в том числе размером, возрастом и КПД данной электростанции, а также наличием дополнительного пространства.

В таблице ТР.4 показана стоимость улавливания CO_2 при производстве водорода. В данном случае стоимость улавливания CO_2 определяется главным образом стоимостью высушивания и компрессии CO_2 , поскольку сепарация CO_2 уже осуществлена в качестве части процесса производства водорода. Стоимость улавливания CO_2 увеличивает приблизительно на 5–30 % стоимость производства водорода.

УХУ может также применяться в системах, использующих топливо на основе биомассы или исходное сырье как таковое или в сочетании с ископаемым топливом. В нескольких исследованиях анализировалась стоимость подобных систем, сочетающих улавливание, транспортировку и хранение. Улавливание $0,19 \text{ МтCO}_2 \cdot \text{год}^{-1}$ установкой на биомассе с КЦКГ в 24 МВт оценивается применительно к чистому захваченному CO_2 приблизительно в 80 долл. США/т CO_2 (300 долл. США/тС), что соответствует повышению стоимости производства электроэнергии почти на 0,08 долл. США/кВт·ч. Проведено сравнительно мало исследований улавливания CO_2 для других промышленных процессов с использованием ископаемого топлива, и они обычно ограничиваются стоимостью улавливания, указываемой только в качестве стоимости тонны захваченных или предотвращенных выбросов CO_2 . В целом CO_2 , полученный в результате разных процессов, значительно отличается показателями давления и концентрации (см. раздел 2). В результате этого стоимость улавливания в разных процессах (цементные и сталелитейные предприятия,

нефтеочистительные заводы) отличается существенным образом и составляет применительно к чистому захваченному CO_2 порядка 25–115 долл. США/т CO_2 . Стоимость единицы улавливания обычно ниже для процессов, в ходе которых получается относительно чистый поток CO_2 (например, переработка природного газа, производство водорода и производство аммиака), как это видно по установкам для производства водорода в таблице ТР.4, когда стоимость чистого захваченного CO_2 колеблется в пределах 2–56 долл. США/т CO_2 .

Новые или усовершенствованные методы улавливания CO_2 , используемые в сочетании с современными энергосистемами и технологиями промышленных процессов, могут снизить стоимость улавливания CO_2 и расход энергии. Хотя расходы на первые в своем роде коммерческие установки нередко превышают первоначальные оценки стоимости, стоимость последующих установок, как правило, снижается в результате получения практических знаний и других факторов. Несмотря на наличие значительной неопределенности в отношении величины и сроков сокращений будущих расходов, из литературы следует, что при условии продолжения деятельности в области НИОКР, усовершенствования в области коммерческих технологий могут привести к уменьшению текущих расходов на улавливание CO_2 по меньшей мере на 20–30 % в последующие приблизительно 10 лет, при этом новые разрабатываемые технологии могут обеспечить более существенное снижение стоимости. Будущее уменьшение стоимости будет зависеть от введения в действие и принятия рынком коммерческих технологий, а также стабильных НИОКР.

Таблица ТР.4. Резюме стоимости улавливания CO_2 для новых установок по производству водорода, действующих на основе современной технологии.

Рабочие и стоимостные характеристики	Новая установка для производства водорода			
	Диапазон			Репрезентативная величина
	нижний		верхний	
Коэффициент выбросов без улавливания (кгСО ₂ •ГДж ⁻¹)	78	-	174	137
Коэффициент выбросов с улавливанием (кгСО ₂ •ГДж ⁻¹)	7	-	28	17
Процентная доля снижения СО ₂ на ГДж (%)	72	-	96	86
КПД установки с системой улавливания, на основе НЗТ (%)	52	-	68	60
Расход энергии на улавливание (большой исходный компонент в %•ГДж ⁻¹)	4	-	22	8
Стоимость водорода без улавливания (долл. США•ГДж ⁻¹)	6,5	-	10,0	7,8
Стоимость водорода с улавливанием (долл. США•ГДж ⁻¹)	7,5	-	13,3	9,1
Повышение стоимости Н ₂ с улавливанием (долл. США•ГДж ⁻¹)	0,3	-	3,3	1,3
Процентное увеличение стоимости Н ₂ с улавливанием (%)	5	-	33	15
Стоимость чистого захваченного СО ₂ (долл. США/тСО ₂)	2	-	56	15
Уровень достоверности стоимости улавливания	средний—высокий			

Примечания: Диапазоны и репрезентативные величины основаны на данных из таблицы 3.11. Все расходы, приведенные в этой таблице, относятся только к улавливанию и не включают расходы на транспортировку и хранение CO_2 . Стоимость приводится в постоянных ценах в долл. США в 2002 г. Исходным сырьем для установок по производству водорода являются природный газ (4,7–5,3 долл. США·ГДж $^{-1}$) или уголь (0,9–1,3 долл. США·ГДж $^{-1}$); некоторые установки, указанные в наборе данных, помимо водорода вырабатывают электроэнергию. Коэффициенты постоянных затрат колеблются в пределах 13–20 %. Полная стоимость включает компрессию CO_2 , но без дополнительных расходов на транспортировку и хранение CO_2 (см. раздел 8 для полной стоимости УХУ).

4. Транспортировка CO₂

За исключением случаев, когда установки находятся непосредственно над местом геологического хранения, захваченный CO₂ должен быть доставлен из точки улавливания к месту хранения. В этом разделе рассматриваются основные способы транспортировки CO₂ и оцениваются аспекты, связанные со здоровьем, безопасностью и окружающей средой, а также расходы.

Способы транспортировки CO₂

Трубопроводы функционируют сегодня в качестве совершенной рыночной технологии и являются наиболее распространенным способом транспортировки CO₂. Газообразный CO₂ обычно сжимают до давления более 8 МПа, с тем чтобы предотвратить двухфазовые режимы потока и повысить плотность CO₂, благодаря чему он становится более легким и менее дорогостоящим для транспортировки. CO₂ может также перевозиться в виде жидкости судами, автодорожным или железнодорожным транспортом, при этом перевозка CO₂ осуществляется в изолированных цистернах при температуре, которая значительно ниже температуры окружающей среды, и при гораздо более низком давлении.

Первый трубопровод большой протяженности для доставки CO₂ вступил в действие в начале 1970-х годов. В США по трубопроводу протяженностью свыше 2 500 км доставляется более 40 МтCO₂ в год из естественных и антропогенных источников, главным образом в такие места в Техасе, где CO₂ используется для ПИН. Эти трубопроводы действуют в режиме «плотной фазы» (в котором происходит постоянная прогрессия из газа в жидкость без явно выраженного изменения фазы), и при температуре окружающей среды и высоком давлении. В большинстве этих трубопроводов поток приводится в движение посредством компрессоров на верхнем конце потока, хотя у некоторых трубопроводов имеются промежуточные (вспомогательные) компрессорные станции.

В некоторых ситуациях или местах транспортировка CO₂ судами может оказаться экономически более выгодной, особенно когда CO₂ необходимо перевозить на большие расстояния или через море. Сжиженные нефтяные газы (СНГ, главным образом пропан и бутан) перевозятся в крупном коммерческом объеме морскими танкерами. CO₂ может перевозиться судами в значительной мере таким же способом (обычно при давлении 0,7 МПа), однако подобная перевозка осуществляется в настоящее время в небольшом объеме ввиду ограниченного спроса. Характеристики сжиженного CO₂ аналогичны характеристикам СНГ, и масштабы использования данной технологии могут быть увеличены до размера крупных перевозчиков CO₂, если потребуется удовлетворение спроса на подобные системы.

Перевозка авто- и железнодорожными цистернами также является технически осуществимым вариантом. Эти системы перевозят CO₂ при температуре -20 °C и давлении 2 МПа. Однако они являются неэкономичными по сравнению с трубопроводами и судами, за исключением очень малых объемов, и вряд ли подходят для УХУ в крупном масштабе.

Аспекты, связанные с окружающей средой, безопасностью и рисками

Точно так же, как существуют стандарты для природного газа применительно к трубопроводам, следует разработать минимальные стандарты для CO₂ «трубопроводного качества», поскольку происходит дальнейшее развитие инфраструктуры трубопроводов для CO₂. Современные стандарты, разработанные главным образом в контексте применений ПИН, не обязательно являются идентичными тому, что потребуется для УХУ. Важное значение для ПИН имеет низкое содержание азота, однако это не будет столь существенным для УХУ. В то же время, для трубопровода с CO₂, проходящего через населенные районы, может потребоваться, вероятно, более низкое, конкретно определенное максимальное содержание H₂S. Кроме того, для доставки CO₂ по трубопроводу через населенные районы требуется выбор подробного маршрута, наличие защиты от чрезмерного давления, системы обнаружения утечки и другие конструктивные особенности. Однако не предполагается каких-либо серьезных препятствий для конструкции трубопровода для УХУ.

Утечка CO₂ в атмосферу может происходить во время транспортировки, хотя потери из трубопроводов в результате утечки являются весьма незначительными. Сухой (не содержащий влаги) CO₂ не является коррозионно-агрессивным для марганцево-углеродистых видов стали, которые обычно используются для трубопроводов, даже если CO₂ содержит такие загрязнители, как кислород, а также окиси серы или азота. С другой стороны, насыщенный влагой CO₂ является весьма коррозионно-агрессивным, и поэтому трубопровод для CO₂ в данном случае необходимо изготавливать из коррозионностойкого сплава или он должен быть покрыт изнутри сплавом или иметь сплошное полимерное покрытие. Некоторые трубопроводы изготавливаются из коррозионностойких сплавов, хотя стоимость материалов в несколько раз превышает стоимость марганцево-углеродистых видов стали. У судов общая потеря в связи с выбросом в атмосферу составляет 3–4 % на 1 000 км, учитывая при этом как потери от испарения, так и выхлопные газы судовых двигателей. Испарение можно уменьшить посредством улавливания и сжижения, а повторное улавливание приведет к снижению потерь до 1–2 % на 1 000 км.

Могут также произойти аварии. В случае существующих трубопроводов CO₂, которые находятся главным образом в районах с низкой плотностью населения, происходит менее одного регистрируемого инцидента в год (0,0003 на км–год) без каких-либо телесных повреждений или смертельных исходов. Это соответствует опыту работы с трубопроводами для углеводородов, и последствия не будут, вероятно, более серьезными, нежели последствия аварий, связанных с природным газом. При морской транспортировке потенциальную опасность представляют танкеры для углеводородных газов, однако признание данной опасности привело к установлению стандартов в отношении проектирования, строительства и функционирования, и серьезные инциденты являются редкими.

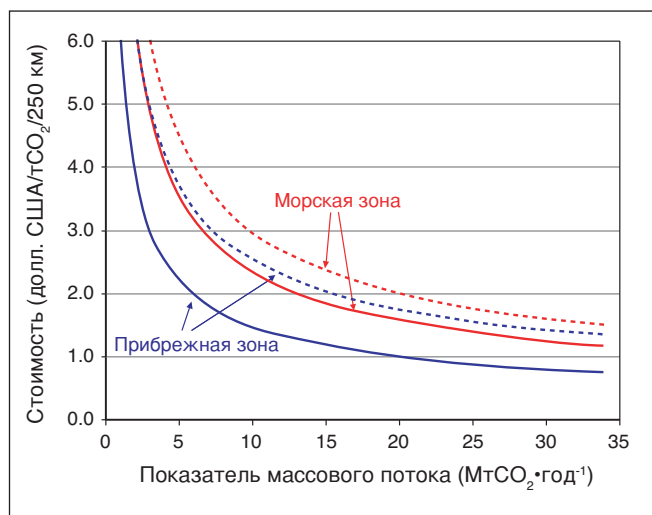


Рисунок ТР.5. Транспортные расходы на береговые и морские трубопроводы, в долл. США/тCO₂/250 км в виде функции показателя массового расхода CO₂. График показывает высокие оценки (точечные линии) и низкие оценки (сплошные линии).

Стоимость транспортировки CO₂

Оценка стоимости была проведена как для транспортировки CO₂ по трубопроводу, так и морским путем. В каждом случае стоимость в значительной мере зависит от расстояния и транспортируемого количества. При использовании трубопроводов стоимость зависит от того, проходит ли трубопровод по береговой или морской зоне, является ли данный район перегруженным, а также имеются ли на маршруте горы, широкие реки или замерзший грунт. Все эти факторы могут удвоить стоимость в расчете на единицу длины, при еще большей стоимости для трубопро-

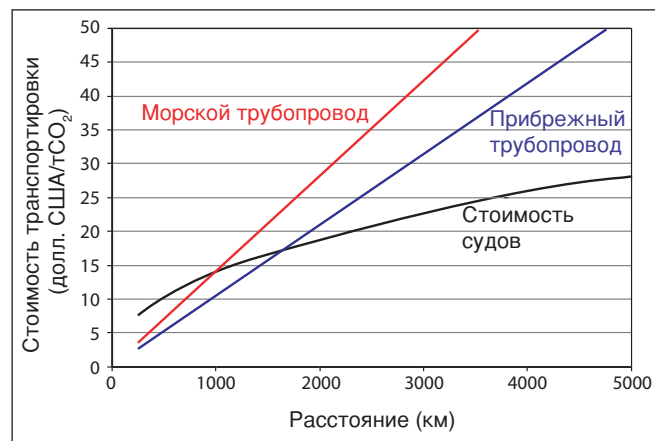


Рисунок ТР.6. Расходы показаны на диаграмме в виде долл. США/тCO₂ при транспортировке в зависимости от расстояния для береговых трубопроводов, морских трубопроводов и перевозки судами. Расходы, связанные с трубопроводами, приводятся для массового потока в 6 MtCO₂·год⁻¹. Стоимость перевозки судами включает промежуточное складирование, портовые сборы, стоимость горючего и погрузочно-разгрузочные работы. Стоимость включает также дополнительные расходы на сжижение по сравнению с компрессией.

водов, пролегающих в населенных районах. Любые дополнительные расходы на повторную компрессию (вспомогательные насосные станции), которые могут оказаться необходимыми для трубопроводов большей протяженности, будут учитываться в качестве транспортных расходов. Подобные расходы являются относительно небольшими и не включены в представленные в настоящем документе оценки.

На рисунке ТР.5 показана стоимость транспортировки по трубопроводу на номинальное расстояние в 250 км. Она обычно составляет 1–8 долл. США/тCO₂ (4–30 долл. США/тC). На рисунке показана также зависимость стоимости трубопровода от показателя массового расхода CO₂. Стоимость стали составляет значительную долю стоимости трубопровода, поэтому колебания такой стоимости (такие как удваивание за период с 2003 по 2005 гг.) могут сказаться на общей стоимости трубопровода.

При перевозке судами определенными ключевыми факторами, определяющими общие транспортные расходы, являются емкость танкера и характеристики систем погрузки и разгрузки. Расходы, связанные с компрессией и сжижением CO₂, учитываются в рамках представленной ранее стоимости улавливания. На рисунке ТР.6 дается сравнение стоимости транспортировки по трубопроводу и по морю, а также показано безубыточное расстояние. При наличии морского варианта он, как правило, является более дешевым по сравнению с трубопроводами при расстояниях, превышающих приблизительно 1 000 км, и при объемах менее нескольких миллионов тонн CO₂ в год. В случае хранения в океане наиболее подходящая система транспортировки зависит от способа закачивания, а именно со стационарного плавающего контейнера, передвигающегося судна или трубопровода с берега.

5. Геологическое хранение

В этом разделе рассматриваются три типа геологических формаций, которым было уделено большое внимание в качестве варианта геологического хранения CO₂: резервуары нефти и газа, глубоко залегающие соленосные формации и не имеющие промышленного значения угольные пласты (рисунок ТР.7). В каждом случае геологическое хранение CO₂ сопровождается его закачиванием в плотном состоянии в формацию породы, находящуюся ниже земной поверхности. Потенциальными кандидатами для хранения CO₂ являются пористые формации породы, которые удерживают или (как в случае выработанных нефтяных и газовых пластов) ранее удерживали жидкости, такие как природный газ, нефть или соляные растворы. Подходящие для хранения формации могут находиться как в береговых, так и морских седиментационных бассейнах (естественные крупные углубления в земной коре, заполненные осадками). Угольные пласты могут также использоваться для хранения CO₂ (см. рисунок ТР.7), когда отсутствует вероятность того, что уголь будет впоследствии разрабатываться, и при наличии достаточной непроницаемости. Вариант хранения CO₂ в угольных пластах и повышение добычи метана находится пока на демонстрационном этапе (см. таблицу ТР.1).

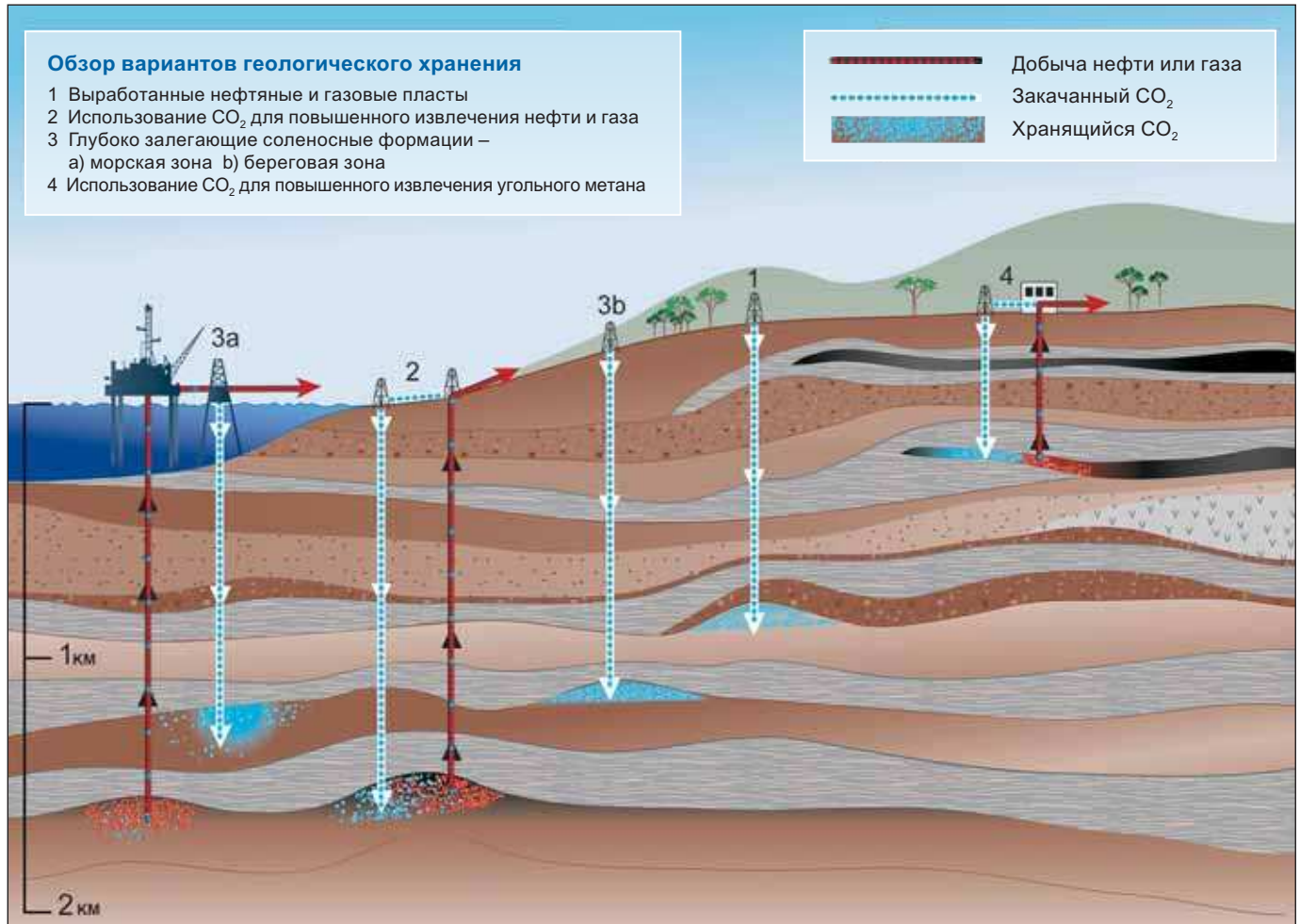


Рисунок ТР.7. Методы хранения CO_2 в глубинных подземных геологических формациях. С рекуперацией углеводородов могут сочетаться два метода: ПИН (2) и ПИУМ (4). См. текст для объяснения этих методов. (С разрешения ОЦИТПГ.)

Существующие проекты хранения CO_2

Геологическое хранение CO_2 осуществляется в рамках трех проектов промышленного масштаба (проекты порядка $1 \text{ MtCO}_2 \cdot \text{год}^{-1}$ или более): проект Слейпнера в Северном море, проект Уэйберна в Канаде и проект Ин-Салаха в Алжире. Порядка $3\text{--}4 \text{ MtCO}_2$, который в противном случае был бы выброшен в атмосферу, улавливается и хранится ежегодно в геологических формациях. Дополнительные проекты перечислены в таблице ТР.5.

Помимо осуществляемых в настоящее время проектов УХУ, ежегодно для целей ПИН закачивается 30 MtCO_2 , главным образом в Техасе, США, где ПИН началось в начале 1970-х годов. Большую часть этого CO_2 получают из естественных залежей CO_2 , обнаруженных в западных регионах США, и его определенная часть поступает из антропогенных источников, таких как переработка природного газа. Значительное количество CO_2 , закачанного для ПИН, добывается вместе с нефтью, от которой он отделяется и затем вновь закачивается. После извлечения нефти

CO_2 может сохраняться в целях смягчения воздействия на изменение климата, вместо того чтобы выбрасываться в атмосферу. Эта операция планируется в рамках проекта Уэйберна.

Технология и механизмы хранения

Для закачивания CO_2 в глубинные геологические формации применяются во многом те же самые технологии, которые были разработаны отраслью по разведке и добыче нефти и газа. При проектировании и осуществлении геологического хранения дальнейшее развитие получили технология бурения скважин, технология закачивания, компьютерная имитация динамических характеристик резервуара хранения и методы мониторинга существующих применений. Другие виды практики закачивания под землю также дают необходимый опыт работы. В частности, хранение природного газа, закачивание жидких отходов на большую глубину и удаление кислого газа (смеси CO_2 и H_2S) осуществлялись в Канаде и США с 1990 г., также в мегатонном масштабе.

Таблица ТР.5. Места, где хранение CO₂ было осуществлено, осуществляется в настоящее время или планируется — от небольших экспериментальных проектов до крупномасштабных коммерческих применений.

Название проекта	Страна	Начало закачивания (год)	Приблизительный среднесуточный показатель закачивания (тCO ₂ •сутки ⁻¹)	Общий (планируемый) объем хранения (тCO ₂)	Тип резервуара для хранения
Уэйберн	Канада	2000	3 000–5 000	20 000 000	ПИН
Ин-Салах	Алжир	2004	3 000–4 000	17 000 000	Газовое месторождение
Слейпнер	Норвегия	1996	3 000	20 000 000	Соленосная формация
K12B	Нидерланды	2004	100 (1 000 планируется на 2006+)	8 000 000	Повышенное извлечение газа
Фрио	США	2004	177	1 600	Соленосная формация
Фенн Биг Веллей	Канада	1998	50	200	ПИУМ
Бассейн Циньшуй	Китай	2003	30	150	ПИУМ
Юбари	Япония	2004	10	200	ПИУМ
Рекопол	Польша	2003	1	10	ПИУМ
Горгон (планируется)	Австралия	~2009	10 000	Неизвестен	Соленосная формация
Снохвит (планируется)	Норвегия	2006	2 000	Неизвестен	Соленосная формация

Предполагается, что хранение CO₂ в резервуарах углеводорода или глубоко залегающих соленосных формациях обычно осуществляется на глубинах более 800 м, где в результате давления и температуры окружающей среды CO₂ находится в жидком или сверхкритическом состоянии. При этих условиях плотность CO₂ будет находиться в пределах 50–80 % от плотности воды. Это близко к плотности некоторых видов сырой нефти, и при этом возникают выталкивающие силы, которые стремятся направить CO₂ в верхнем направлении. Поэтому для обеспечения того, чтобы CO₂ оставался замкнутым под землей, важно наличие хорошо герметизирующей перекрывающей породы над избранным для хранения резервуаром. При закачивании под землю CO₂ сжимается и заполняет пористое пространство в результате частичного вытеснения уже имеющихся в нем жидкостей («жидкости в точке»). В нефтяных и газовых пластах вытеснение жидкости в точке закачиваемым CO₂ может привести к освобождению большей части пористого объема для хранения CO₂. В соленосных формациях оценки потенциального объема хранения являются более низкими и находятся в пределах от порядка нескольких процентов до более 30 % от общего объема породы.

После закачивания в формацию-хранилище удерживаемая часть зависит от сочетания физических и геохимических механизмов удерживания. Физическое удерживание с целью предотвращения миграции CO₂ в верхнем направлении обеспечивается благодаря слою глинистого сланца или глинистой породы над формацией-хранилищем. Этот непроницаемый слой известен как «перекрывающая порода». Дополнительная физическая ловушка может создаваться капиллярными силами, которые удерживают CO₂ в пористых пространствах формации. Однако во многих случаях одна или несколько сторон формации остаются открытыми, из-за чего становится возможной боковая миграция CO₂ ниже перекрывающей породы. В подобных случаях важное значение для долгосрочного хранения в ловушке закачанного CO₂ имеют дополнительные механизмы.

Механизм, известный как геохимическая ловушка, начинает действовать по мере вступления CO₂ в реакцию с жидкостями в точке и вмещающей породой. В первую очередь CO₂ растворяется в воде в точке. Как только это происходит (в течение сроков в сотни–тысячи лет), насыщенная CO₂ вода становится более плотной и погружается на дно формации (вместо того чтобы подниматься на поверхность). Затем в результате химических реакций между растворенным CO₂ и минералами породы образуются разновидности ионов, вследствие чего доля закачанного CO₂ превратится за миллионы лет в твердые карбонатные минералы.

Кроме того, происходит еще один тип улавливания, когда CO₂ избирательно адсорбируется на уголь или сланцы с большим содержанием органического вещества, вытесняя такие газы, как метан. В подобных случаях CO₂ остается в ловушке до тех пор, пока сохраняется постоянство давления и температуры. Эти процессы будут, как правило, происходить на меньших глубинах по сравнению с хранением CO₂ в резервуарах углеводорода и соленосных формациях.

Географическое распределение и емкость мест хранения

Как показано выше в разделе 2 (рисунок ТР.2b), регионы с седиментационными бассейнами, которые являются потенциально пригодными для хранения CO₂, имеются во всем мире как в береговой, так и морской зонах. В настоящем докладе основное внимание уделяется залежам нефти и газа, глубоко залегающим соленосным формациям и не имеющим промышленного значения угольным пластам. Другие возможные геологические формации или структуры (такие как базальты, нефтяные или газовые сланцы, соляные каверны и заброшенные шахты) создают благоприятные возможности или были недостаточно изучены в настоящее время для оценки их потенциала.

Таблица ТР.6. Емкость хранения для нескольких вариантов геологического хранения. Емкость хранения включает варианты хранения, которые не являются экономичными.

Тип резервуара	Нижняя оценка емкости хранилища (ГтCO ₂)	Верхняя оценка емкости хранилища (ГтCO ₂)
Нефтяные и газовые месторождения	675 ^a	900 ^a
Угольные пласты, не имеющие промышленного значения (ПИУМ)	3-15	200
Глубоко залегающие соленосные формации	1,000	Не ясно, но возможно 10 ⁴

^a Эти цифры увеличились бы на 25 %, если бы в эту оценку были включены «неоткрытые» нефтяные и газовые месторождения.

В таблице ТР.6 дается резюме оценок технического потенциала⁶ для разных вариантов геологического хранения. Оценки и уровни достоверности основаны на анализе литературы, а также как региональных оценок по восходящему принципу, так и глобальных оценок по нисходящему принципу. В литературе отсутствует какой-либо вероятностный подход к определению емкостных оценок, и это будет необходимо для количественного определения неопределенности надежным образом. Общие оценки, особенно верхнего предела потенциала, характеризуются широким разбросом и высокой степенью неопределенности, отражая противоречивые методологии в литературе и тот факт, что наши знания о соленосных формациях являются весьма ограниченными в большинстве частей мира. По залежам нефти и газа имеются более совершенные оценки, основанные на замещении объемов углеводорода объемами CO₂. Следует отметить, что, за исключением ПИН, эти резервуары не будут готовы для хранения CO₂ до тех пор, пока не произойдет истощение углеводородов, и что изменения давления и геомеханические воздействия, вызванные образованием углеводорода в резервуаре, могут снизить существующую емкость.

Другим способом анализа потенциала хранения является, однако, постановка вопроса о том, существует ли вероятность того, что он является адекватным для тех объемов выбросов CO₂, которые необходимо будет предотвратить на основе использования УХУ в рамках разных сценариев стабилизации парниковых газов и предположения о применении других вариантов смягчения воздействий. Как говорится далее в разделе 8, оценочный диапазон экономического потенциала⁷ для УХУ в последующее столетие составляет приблизительно 200–2 000 ГтCO₂. Низкие пределы, приведенные в таблице ТР.6, показывают, что на мировом уровне практически ясно⁸, что существующая емкость для геологического хранения составляет 200 ГтCO₂, и вероятно⁹, что имеется по меньшей мере около 2 000 ГтCO₂.

Критерии и методы выбора места

Исключительно важное значение для успешного геологического хранения имеют описание и выбор места, а также прогнозирование его

характеристик. Перед выбором места должны быть описаны геологические условия с целью определения того, обеспечит ли перекрывающая порода эффективную герметизацию, имеется ли достаточно объемная и проницаемая формация для хранения и не нарушат ли целостность герметизации заброшенные или действующие скважины.

Методики, разработанные для разведки нефтяных и газовых пластов, мест хранения природного газа и мест для удаления жидких отходов, подходят для описания мест геологического хранения CO₂. К числу примеров относится метод сейсмического изображения, испытание на закачивание для оценки формаций и уплотнений в месте хранения, а также каротаж целостности цементирующего слоя. Для содействия описанию места и отборочной работы используются компьютерные программы, которые моделируют подземное движение CO₂. Первоначально эти программы были разработаны для таких применений, как разработка нефтяных и газовых пластов и исследования ресурсов грунтовых вод. Хотя они включают многочисленные физические, химические и геомеханические процессы, необходимые для прогнозирования как краткосрочных, так и долгосрочных характеристик хранения CO₂, требуется дополнительный опыт для обретения уверенности в их эффективности с точки зрения прогнозирования долгосрочных характеристик в случае их адаптации к задачам, связанным с хранением CO₂. Кроме того, весьма важным для надежности моделей является наличие достоверных данных с описанием места.

Оценка рисков и воздействие на окружающую среду

Риски, связанные с утечкой в результате хранения CO₂ в геологических резервуарах, делятся на две широкие категории: риски на глобальном и риски на локальном уровнях. Риски на глобальном уровне связаны с выбросом CO₂, который может существенным образом способствовать изменению климата, если происходит утечка в атмосферу определенной доли газа из формации-хранилища. Кроме того, в случае утечки CO₂ из формации-хранилища может быть создана опасность на местном уровне для людей, экосистем и грунтовых вод. Это является рисками на локальном уровне.

⁶ Технический потенциал — это объем, на который можно сократить выбросы парниковых газов путем применения технологии или практики, которые уже были продемонстрированы.

⁷ Экономический потенциал — это объем сокращений выбросов парниковых газов в результате конкретного варианта, который может быть обеспечен экономически эффективным образом с учетом доминирующих обстоятельств (цена сокращений выбросов CO₂ и стоимость других вариантов).

⁸ «Практически ясно» — это вероятность в 99 % или больше.

⁹ «Вероятно» — это вероятность в 66–90 %.

В отношении рисков на глобальном уровне, согласно результатам наблюдений и анализа существующих в настоящее время мест хранения CO_2 , природных систем, инженерных систем и моделей, доля газа, сохраняющаяся в должным образом выбранных и контролируемых резервуарах, должна, весьма вероятно¹⁰, превысить 99 % через 100 лет и, вероятно, превысить 99 % через 1 000 лет. Аналогичные доли газа сохраняются, вероятно, в течение даже более продолжительных периодов времени, поскольку предполагается, что риск утечки будет снижаться со временем благодаря тому, что другие механизмы выступают в качестве дополнительной ловушки. В разделе 8 рассматривается вопрос о том, будут ли эти сохраняемые доли достаточными для того, чтобы непостоянное хранение имело значение для смягчения воздействий на изменение климата.

В отношении рисков на локальном уровне, имеются два типа сценариев, по которым может происходить утечка. В первом случае разрушения закачивающей скважины и утечка вверх по заброшенным скважинам могут привести к неожиданному и быстрому выбросу CO_2 . Этот тип выброса будет, вероятно, быстро обнаружен и прекращен при помощи методов, существующих сегодня для удерживания выбросов из скважин. Опасности, связанные с этим типом выбросов, затрагивают в первую очередь рабочих, находящихся рядом с местом выброса в тот момент, когда он происходит, или лиц, вызванных для прекращения выброса. Концентрация CO_2 в воздухе более 7–10 % создаст непосредственную опасность для жизни и здоровья человека. Меры по удерживанию этих видов выбросов могут осуществляться в течение часов–дней, а общий объем выброшенного CO_2 будет, вероятно, весьма небольшим по сравнению с общим количеством закачанного газа. Эти типы опасностей эффективно контролируются на регулярной основе в нефтегазовой промышленности при помощи мер инженерного и административного контроля.

Согласно второму сценарию утечка может произойти в результате необнаруженных дефектов, разрывов или через дающие утечку скважины, и при этом выброс на поверхность является более постепенным и разбросанным. В этом случае опасность создается в первую очередь для горизонтов питьевой воды и экосистем, в которых CO_2 накапливается в зоне между поверхностью и верхней частью водного зеркала. Грунтовые воды могут пострадать в результате как утечки CO_2 непосредственно в водоносный горизонт, так и попадания соляных растворов в водоносный горизонт в результате их вытеснения CO_2 в процессе его закачивания. По этому сценарию может также происходить кислотообразование почв и замещение кислорода в почве. Кроме того, если утечка в атмосферу происходит в низко расположенных районах при слабом ветре или в отстойниках и подвальных помещениях, расположенных над этими разбросанными утечками, людям и животным будет причинен ущерб, если утечка пройдет незамеченной. Люди пострадают меньше в результате утечки из мест морского хранения по сравнению с утечкой из мест хранения в береговой зоне. Маршруты утечки могут быть установлены при помощи нескольких методов и благодаря знанию характеристик резервуара. На рисунке TP.8 показаны некоторые потенциальные пути утечки из соленосной формации. Если потенциальные

маршруты утечки известны, для ее ликвидации может быть адаптирована стратегия мониторинга и восстановительных мер.

Эффективными способами уменьшения опасности, связанной с разбросанной утечкой, являются тщательное проектирование и выбор места для системы хранения, а также методы раннего обнаружения утечки (желательно задолго до того, как CO_2 достигнет поверхности земли). Имеющиеся методы мониторинга являются перспективными, однако необходим больший опыт для определения уровней обнаружения и разрешения проблемы. Как только утечки обнаружены, для их прекращения или контроля применяются определенные методы восстановления. В зависимости от типа утечки эти методы могут включать стандартные методы ремонта скважины или извлечение CO_2 путем отсечения его утечки в неглубокий горизонт подземных вод (см. рисунок TP.8). Имеются также методы удаления CO_2 из почв и подземных вод, однако их применение является, вероятно, дорогостоящим. Необходимо приобретение опыта, связанного с демонстрацией эффективности и установления стоимости применения этих методов при хранении CO_2 .

Мониторинг и проверка

Мониторинг является весьма важной частью общей стратегии управления в условиях риска в рамках проектов геологического хранения. Стандартные процедуры или протоколы пока не разработаны, однако, как ожидается, их разработка будет осуществляться по мере усовершенствования технологии и определяться местными рисками и правилами. В то же время предполагается, что измерение таких определенных параметров, как скорость закачивания и давление в закачивающей скважине, будут проводиться обычным образом. Повторная сейсмическая разведка зарекомендовала себя в качестве эффективного способа для отслеживания подземной миграции CO_2 . Полезными могут также оказаться такие новые методы, как гравитационные и электрические измерения. Полезным для непосредственного обнаружения утечки CO_2 может быть взятие проб грунтовых вод и почвы между поверхностью и водным зеркалом. В закачивающие скважины могут устанавливаться датчики CO_2 с сигнализаторами для обеспечения безопасности рабочих и обнаружения утечки. Для обнаружения и определения объема наземных выбросов могут также применяться методы, используемые на уровне поверхности. Наличие высококачественных исходных данных повышает надежность и разрешающую способность всех измерений и будет иметь существенное значение для обнаружения незначительных утечек.

Поскольку все эти методы мониторинга были адаптированы на основе других применений, необходимо провести их испытания и оценку в контексте геологического хранения с точки зрения надежности, разрешения проблем и чувствительности. В рамках всех существующих проектов промышленного значения и экспериментальных проектов имеются программы по разработке и испытанию этих и других методов мониторинга. В соответствии с требованиями РКК ООН о представлении информации о выбросах и мониторинге, необходимыми или желательными могут

¹⁰ «Весьма вероятно» — это вероятность в 90–99 %.

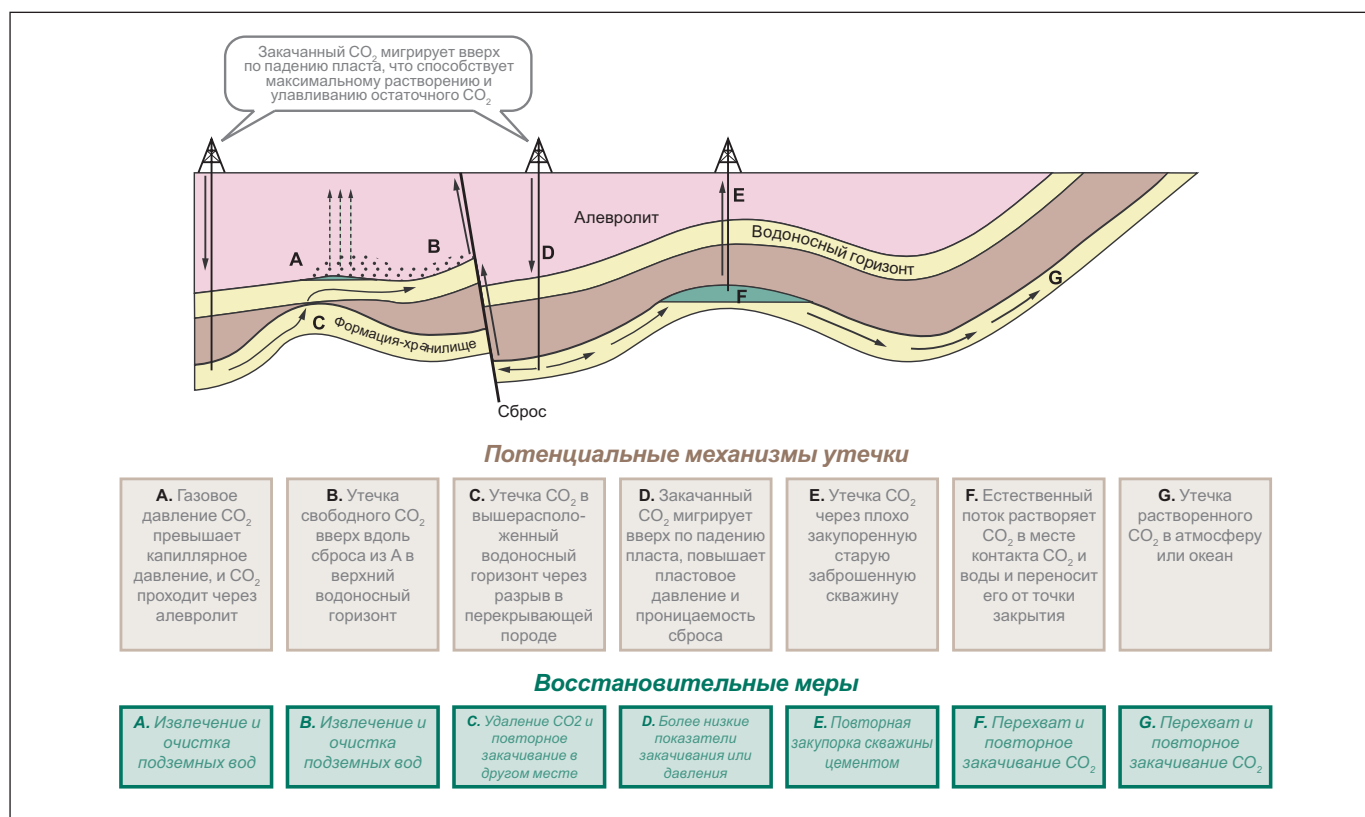


Рисунок ТР.8. Потенциальные маршруты утечки и восстановительные методы для CO_2 , закачанного в соленосные формации. Восстановительная методика будет зависеть от потенциальных маршрутов утечки, обнаруженных в резервуаре. (С разрешения ОЦИТПГ.)

также быть методы мониторинга объема хранящегося под землей CO_2 (см. раздел 9). Учитывая долгосрочный характер хранения CO_2 , может потребоваться проведение мониторинга места хранения в течение длительных периодов времени.

Правовые вопросы

В настоящее время правовая и нормативная основы для хранения CO_2 в прибрежной зоне созданы специально не во многих странах. Соответствующее законодательство включает законодательство о нефти, законодательство о питьевой воде и нормативные акты о горнодобывающей промышленности. Во многих случаях имеются законы, действие которых распространяется на некоторые, или почти все вопросы, касающиеся хранения CO_2 . Пока конкретно не рассматривались вопросы о долгосрочной ответственности, такие как глобальные вопросы, связанные с утечкой CO_2 в атмосферу, а также местные проблемы, связанные с последствиями для окружающей среды. Режимы мониторинга и проверки и риски утечки могут играть важную роль при определении ответственности, и наоборот. Имеются также такие факторы, как долговечность институтов, текущий мониторинг и возможность передачи институциональных знаний. Существенное значение для правовой основы

в области УХУ имеет долгосрочная перспектива, поскольку сроки хранения охватывают многие поколения, равно как и проблема изменения климата. В некоторых странах, особенно США, права собственности всех затронутых лиц должны учитываться с правовой точки зрения, поскольку пористое пространство принадлежит владельцам наземной собственности.

Согласно общим принципам обычного международного права, государства могут осуществлять свой суверенитет на своих территориях и могут поэтому заниматься такими видами деятельности, как хранение CO_2 (как геологическое, так и в океане) в тех районах, которые находятся в их юрисдикции. Если, однако, хранение имеет трансграничные последствия, государства несут ответственность за обеспечение того, чтобы деятельность в рамках их юрисдикции или контроля не причиняла ущерб окружающей среде других государств или районам, выходящим за пределы национальной юрисдикции.

В настоящее время имеется несколько договоров (в первую очередь Конвенция ООН по морскому праву, а также Лондонская конвенция¹¹ и Конвенция ОСПАР¹²), которые могут применяться в отношении закачивания CO_2 в морскую окружающую среду (как в океан, так и в геологические структуры подстилающей поверхности придонного слоя). Все эти договоры были подготовлены

¹¹ Конвенция по предотвращению загрязнения моря сбросами отходов и других материалов (1972 г.) и ее Лондонский протокол (1996 г.), который еще не вступил в силу.

¹² Конвенция по защите морской среды северо-восточной части Атлантического океана, которая была принята в Париже (1992 г.). ОСПАР — это сокращение от Осло-Париж.

без конкретного учета хранения CO_2 . Оценка, подготовленная группой юристов и лингвистов Конвенции ОСПАР (относительно северо-восточной части Атлантического океана), например, содержит вывод о том, что в зависимости от метода и цели закачивания, закачивание CO_2 в геологические структуры подстилающей поверхности придонного слоя и в океан может быть сопоставимо с положениями договора в некоторых случаях, таких как случай транспортировки CO_2 по трубопроводу с суши. Аналогичная оценка проводится сейчас Сторонами Лондонской конвенции. Кроме того, в документах специалистов по толкованию правовых норм делается вывод о том, что CO_2 , улавливание которого было осуществлено при добыче нефти или природного газа и который хранится в морской геологической формации (подобно проекту Слейпнера), не будет рассматриваться в качестве «сброса» и поэтому не будет запрещаться Лондонской конвенцией.

Общественное восприятие

Оценка общественного восприятия УХУ является проблемной из-за относительно технического и «отдаленного» характера этого вопроса в настоящее время. Результаты весьма немногочисленных исследований, проведенных на сегодняшний день по вопросу общественного восприятия УХУ, показывают, что общественность, как правило, плохо информирована о УХУ. Если информация сообщается вместе с информацией о других вариантах смягчения воздействий на изменение климата, то, согласно немногим исследованиям, проведенным до настоящего времени, УХУ, как правило, считается менее благоприятным вариантом по сравнению с другими вариантами, такими как повышение энергетического КПД и использование источников энергии иных, нежели ископаемое топливо. Одобрение УХУ, если оно имеет место, происходит скорее «неохотно», а не с «энтузиазмом». В некоторых случаях это является следствием мнения о том, что УХУ может потребоваться из-за неспособности сократить выбросы CO_2 иными способами. Имеются свидетельства того, что геологическое хранение может восприниматься положительным образом, если оно осуществляется совместно с другими более желательными мерами. Хотя общественное восприятие изменится, вероятно, в будущем, данные ограниченных исследований на сегодняшний день показывают, что необходимо будет, вероятно, выполнить как минимум два условия, для того чтобы общественность считала улавливание и хранение CO_2 надежной технологией наряду с другими более хорошо известными вариантами: 1) глобальное изменение климата в результате деятельности человека должно рассматриваться в качестве относительно серьезной проблемы; 2) должна признаваться необходимость значительных сокращений выбросов CO_2 для уменьшения опасности глобального изменения климата.

Стоимость геологического хранения

Технологии и оборудование, используемые для геологического хранения, широко применяются в нефтегазовой промышленности, поэтому оценки стоимости этого варианта характеризуются

относительно высокой степенью достоверности в отношении емкости хранения в нижнем пределе технического потенциала. В то же время имеется значительный диапазон и изменчивость стоимости ввиду действия таких конкретных для данного места факторов, как береговая зона по сравнению с морской, глубина пласта и геологические характеристики формации-хранилища (например, проницаемость и толщина формации).

Репрезентативные оценки стоимости хранения закачанного CO_2 в соленосных формациях и выработанных нефтяных и газовых месторождениях находятся, как правило, в пределах 0,5–8 долл. США/т CO_2 . Расходы на мониторинг в размере 0,1–0,3 долл. США/т CO_2 являются дополнительными. Самой низкой стоимостью хранения характеризуются береговые, неглубокие резервуары с высокой проницаемостью и/или места хранения, в которых возможно повторное использование скважин и инфраструктур действующих нефтяных и газовых месторождений.

Если хранение сопровождается ПИН, ПИУМ или (потенциально) повышенным извлечением газа (ПИГ), то экономическая стоимость CO_2 может снизить общую стоимость УХУ. Исходя из данных и цен на нефть в период до 2003 г., повышенная добыча нефти для ПИН в береговой зоне с хранением CO_2 может дать чистую прибыль в размере 10–16 долл. США/т CO_2 (37–59 долл. США/тС) (включая стоимость геологического хранения). По ПИН и ПИУМ, которые находятся пока в стадии разработки, отсутствует какая-либо достоверная информация о стоимости, основанная на фактическом опыте. В любом случае, однако, экономическая выгода от повышенного производства в значительной мере зависит от цен на нефть и газ. В этом отношении в литературе, послужившей основой для этого доклада, не учитывается повышение мировых цен на нефть и газ с 2003 г. и предполагается, что цены на нефть равны 15–20 долл. США за баррель. В случае повышения цен в течение срока действия проекта УХУ, экономическая стоимость CO_2 может оказаться более высокой по сравнению с той, которая сообщается в настоящем документе.

6. Хранение в океане

Потенциальным вариантом хранения CO_2 является закачивание CO_2 после его улавливания непосредственно в глубинную часть океана (на глубины более 1 000 м), где большая его часть будет изолирована от атмосферы в течение столетий. Это может быть достигнуто посредством транспортировки CO_2 по трубопроводам или судами к месту хранения в океане, где он закачивается в водяной столб океана или на морское дно. После этого растворенный или распыленный CO_2 станет частью глобального цикла водорода. На рисунке ТР9 показаны некоторые основные методы, которые могут применяться. Хранение в океане еще не применялось и не демонстрировалось на экспериментальном уровне и до сих пор находится на этапе исследований. Тем не менее, проведены эксперименты на местах небольшого масштаба, и в течение 25 лет проводились теоретические, лабораторные и модельные исследования целевого хранения CO_2 в океане.

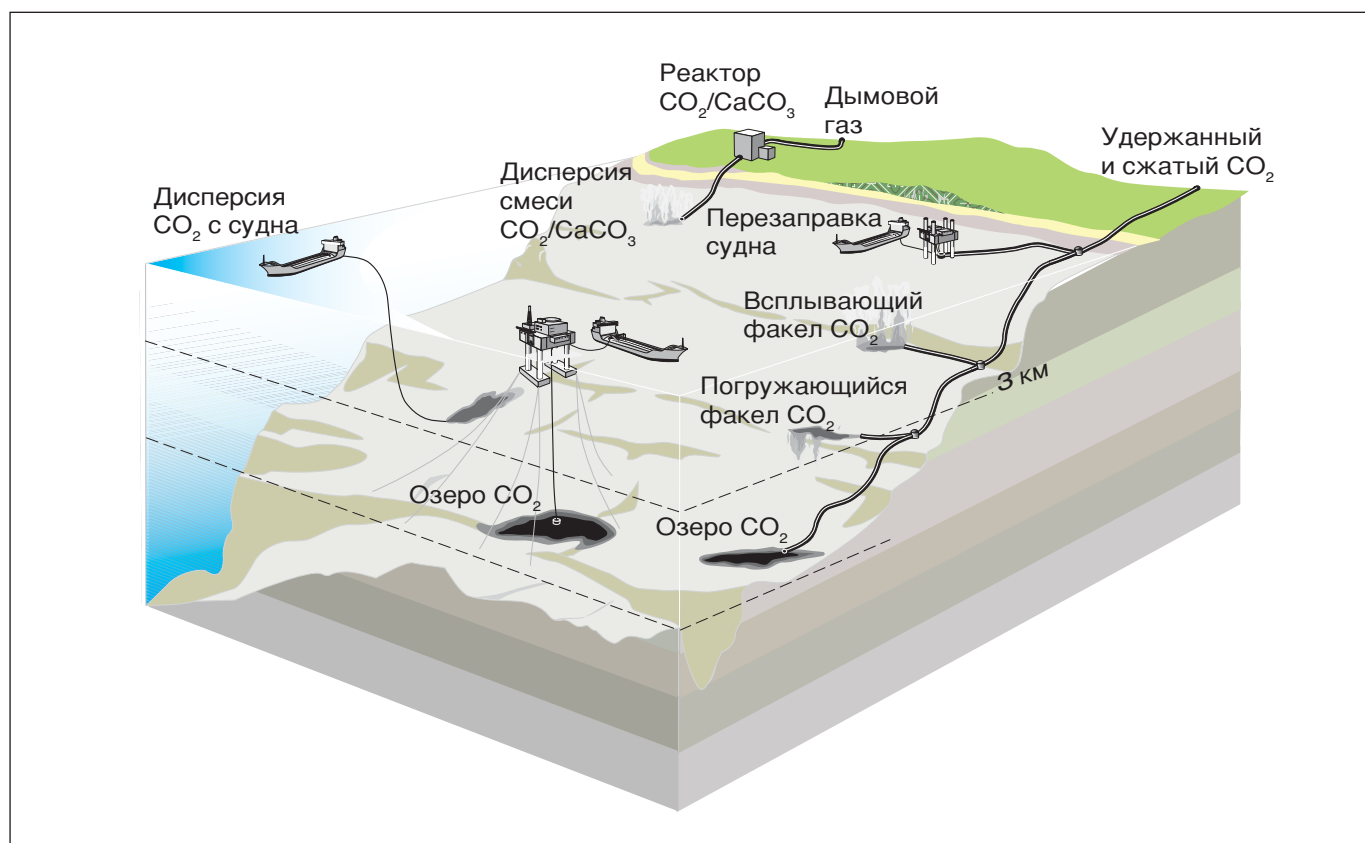


Рисунок ТР.9. Методы хранения в океане.

Механизмы и технология хранения

Океаны покрывают более 70 % поверхности Земли, а их средняя глубина составляет 3 800 м. Поскольку двуокись углерода может растворяться в воде, происходят естественные обмены CO_2 между атмосферой и водой на уровне поверхности океана, которые продолжаются до достижения равновесия. В случае повышения атмосферной концентрации CO_2 , дополнительный CO_2 постепенно поглощается океаном. Таким образом океанами было поглощено около 500 Гт CO_2 (140 ГтС) из общего количества антропогенных выбросов в 1 300 Гт CO_2 (350 ГтС), выброшенных в атмосферу за последние 200 лет. Из-за повышения атмосферных концентраций CO_2 в результате деятельности человека по сравнению с доиндустриальными уровнями океаны поглощают в настоящее время CO_2 в объеме порядка 7 Гт $\text{CO}_2 \cdot \text{год}^{-1}$ (2 ГтС $\cdot \text{год}^{-1}$).

Большая часть этой двуокиси углерода остается сейчас в верхних слоях океана и привела к настоящему времени к уменьшению pH на уровне порядка 0,1 на поверхности океана благодаря кислотному характеру действия CO_2 в воде. Сегодня, однако, не отмечается практически никаких изменений pH в океанских глубинах. Согласно прогнозам моделей за последующие несколько столетий океаны поглотят в конечном итоге большую часть CO_2 , выброшенного в атмосферу, поскольку CO_2 растворяется на уровне поверхности океана и затем перемешивается с глубинными водами океана.

Нет практически никакого физического предела тому объему антропогенного CO_2 , который может храниться в океане. В то же время в масштабе тысячелетия объем хранящегося газа будет зависеть от равновесия между океаном и атмосферой. Стабилизация атмосферных концентраций CO_2 в пределах 350–1 000 ppmv будет означать, что от 2 000 до 12 000 Гт CO_2 будет в конечном итоге оставаться в океане, если не будет проводиться какого-либо специального закачивания CO_2 . Этот диапазон представляет поэтому верхний предел емкости хранения CO_2 в океане посредством активного закачивания. На эту емкость будут также воздействовать факторы окружающей среды, такие как максимально допустимое изменение pH.

Как анализ результатов наблюдений за океаном, так и модели показывают, что закачиваемый CO_2 будет изолирован от атмосферы на протяжении по меньшей мере нескольких сотен лет, и что та доля, которая сохраняется, будет увеличиваться по мере увеличения глубины закачивания (см. таблицу ТР.7). Идеи, связанные с увеличением сохраняемой доли, включают образование твердых гидратов CO_2 и/или жидких озер CO_2 на морском дне, а также растворение таких щелочных минералов, как известняк, для нейтрализации кислотного CO_2 . Растворение природных карбонатов, если оно является практически возможным, может увеличить сроки хранения до приблизительно 10 000 лет, при этом сводятся к минимуму изменения в pH в океане и парциальном давлении CO_2 . Однако подобный подход потребует

Таблица ТР.7. Доля CO₂, удерживаемого при хранении в океане, полученная путем имитации с использованием семи моделей, связанных с океаном, для 100-летнего срока постоянного закачивания на трех разных глубинах начиная с 2000 г.

Год	Глубина закачивания		
	800 м	1 500 м	3 000 м
2100	0,78 ± 0,06	0,91 ± 0,05	0,99 ± 0,01
2200	0,50 ± 0,06	0,74 ± 0,07	0,94 ± 0,06
2300	0,36 ± 0,06	0,60 ± 0,08	0,87 ± 0,10
2400	0,28 ± 0,07	0,49 ± 0,09	0,79 ± 0,12
2500	0,23 ± 0,07	0,42 ± 0,09	0,71 ± 0,14

больших количеств известняка и энергии для переработки материалов (приблизительно такой же порядок величины, что и количество на тонну закачиваемого CO₂, которые необходимы для карбонизации минералов; см. раздел 7).

Последствия и риски для экологии и окружающей среды

Закачивание нескольких ГтCO₂ приведет к существенному изменению химии океана в районе закачивания, а закачивание сотен ГтCO₂ вызовет еще большие изменения в районе закачивания и в конечном итоге явится причиной существенных изменений по всему объему океана. Имитации при помощи моделей, предполагающие выброс из семи мест на глубине 3 000 м и хранение в океане при условии осуществления 10 % мер по смягчению воздействия с целью стабилизации CO₂ на уровне 550 ppmv, прогнозировали изменения кислотности (изменения pH) более чем на 0,4 в приблизительно 1 % объема океана. По сравнению с этим в случае стабилизации на уровне 550 ppmv без хранения в океане изменение pH на поверхности океана оценивалось показателем, превышающим 0,25, вследствие равновесия с повышенными концентрациями CO₂ в атмосфере. В любом случае изменение pH в пределах 0,2–0,4 является значительно большим по сравнению с доиндустриальными изменениями кислотности океана. За столетия перемешивание в океане приведет к утрате изоляции закачанного CO₂. По мере выхода к поверхностным водам океана все больших количеств CO₂ обширные районы океана будут постепенно становиться источниками выбросов в атмосферу. Отсутствуют данные о каких-либо механизмах неожиданного или катастрофического выброса закачанного CO₂ из океана в атмосферу.

Данные экспериментов свидетельствуют о том, что добавление CO₂ может причинить ущерб морским организмам. Воздействия повышенных уровней CO₂ изучались главным образом во временных масштабах до нескольких месяцев применительно к отдельным организмам, которые живут у поверхности океана. Наблюдаемые явления включают снижение темпов кальцификации, воспроизводства, роста, снабжения циркулярным водородом и мобильности, а также постепенного увеличения смертности. В некоторых организмах эти воздействия считаются ответной реакцией на небольшие добавки CO₂. Наступление немедленной смерти предполагается недалеко от точек закачивания или озер CO₂. Еще не изучены хронические последствия прямого

закачивания CO₂ в океан для океанских организмов или экосистем в крупных океанских регионах и на протяжении больших сроков.

В глубинных частях океана не проводилось никаких контролируемых экспериментов с экосистемами, поэтому может быть дана лишь предварительная оценка потенциальных последствий для экосистем. Ожидается, что эти последствия будут усиливаться по мере увеличения концентраций CO₂ и уменьшения pH, однако характер подобных последствий является непонятным в настоящее время, и пока не определены какие-либо критерии, касающиеся окружающей среды, с целью предотвращения пагубного воздействия. В настоящее время не ясно также, каким образом виды и экосистемы адаптируются к устойчивым химическим изменениям и смогут ли они сделать это.

Стоимость хранения в океане

Несмотря на отсутствие какого-либо опыта в области хранения в океане, были предприняты определенные попытки с целью оценки стоимости проектов хранения CO₂, в соответствии с которыми выброс CO₂ осуществляется на морском дне или в океанских глубинах. Стоимость улавливания и транспортировки CO₂ к береговой линии (например по трубопроводам) не включается в стоимость хранения в океане. В то же время в стоимость хранения в океане включены расходы на морские трубопроводы или суда, плюс любые дополнительные расходы на энергию. Резюме стоимости хранения в океане дается в таблице ТР.8. Эти цифры показывают, что при коротких расстояниях более дешевым будет вариант стационарного трубопровода. Для более значительных расстояний привлекательнее будет вариант движущегося судна или транспортировка судном до платформы с последующим закачиванием.

Правовые аспекты и общественное восприятие

Глобальные и региональные договоры по морскому праву и морской окружающей среде, такие как ОСПАР и Лондонская конвенция, рассмотренные ранее в разделе 5 применительно к местам геологического хранения, также влияют на хранение в океане, поскольку они касаются «морской зоны». В обеих конвенциях проводится различие между применяемым методом хранения и целью хранения для установления правового статуса хранения CO₂

Таблица ТР.8. Стоимость хранения в океане на глубинах более 3 000 м.

Способ хранения в океане	Стоимость чистого закачанного CO ₂ (долл. США/тCO ₂)	
	100 км от берега	500 км от берега
Стационарный трубопровод	6	31
Движущееся судно/платформа ^а	12–14	13–16

^а Стоимость варианта с движущимся судном приводится для глубин закачивания в 2 000–2 500 м.

в океане. Пока, однако, не принято никакого решения относительно правового статуса целевого хранения в океане.

Весьма небольшое количество исследований общественного восприятия, в которых рассматривался вопрос о хранении CO₂ в океане, свидетельствует о весьма плохой информированности общественности на эту тему или ее знания. В то же время, по данным немногих проведенных до настоящего времени исследований, общественность высказывает больше оговорок в отношении хранения в океане по сравнению с геологическим хранением. Эти свидетельства показывают также, что отношение к хранению в океане менялось по мере получения большего количества информации; в одном из исследований это привело к большему признанию хранения в океане, а в другом исследовании результатом явилось его меньшее признание. В литературе также отмечается, что возникла «значительная оппозиция» в отношении предлагаемого эксперимента по выбросу CO₂ в Тихом океане.

7. Карбонизация минералов и промышленное использование

В этом разделе рассматриваются два довольно разных варианта хранения CO₂. Первым является карбонизация минералов, при которой благодаря использованию химических реакций CO₂ преобразуется в твердые неорганические карбонаты. Вторым вариантом является промышленное использование CO₂ либо непосредственным образом, либо в качестве исходного сырья для производства различных углеродосодержащих химических веществ.

*Карбонизация минералов:
технология, последствия и стоимость*

Карбонизация минералов означает фиксацию CO₂ с использованием щелочных и щелочноземельных оксидов, таких как оксид магния (MgO) и оксид кальция (CaO), которые присутствуют в силикатных породах естественного происхождения, таких как серпентин и оливин. В результате химических реакций между этими веществами и CO₂ получают такие соединения, как карбонат магния (MgCO₃) и карбонат кальция (CaCO₃, обычно известный как известняк). Количество оксидов металлов в силикатных породах, которые могут быть найдены в земной коре, превышает количества, необходимые для фиксации всего CO₂, который будет произведен в результате сжигания всех имеющихся запасов ископаемого топлива. Эти оксиды также присутствуют в малых количествах

в некоторых промышленных отходах, таких как шлак и зола нержавеющей стали. Карбонизация минералов дает кремнезем и карбонаты, которые характеризуются стабильностью в течение продолжительных периодов времени и которые могут поэтому удаляться в такие места, как силикатные шахты, или повторно использоваться для строительных целей (см. рисунок ТР.10), хотя подобное повторное использование будет, вероятно, незначительным по сравнению с произведенными количествами. После карбонизации CO₂ не будет выбрасываться в атмосферу. Благодаря этому вряд ли потребуются мониторинг свалок, а связанные с этим риски будут весьма низкими. На этом раннем этапе разработки трудно оценить потенциал хранения. Он будет ограничен долей силикатных запасов, которые могут технически эксплуатироваться, проблемами, связанными с окружающей средой, такими как объем отходов продукции, а также правовыми и социальными ограничениями по месту хранения.

Процесс карбонизации минералов происходит естественным путем и известен как «выветривание». В природе этот процесс происходит весьма медленно; поэтому он должен быть значительно ускорен, для того чтобы быть практически осуществимым методом хранения CO₂, который улавливается из антропогенных источников. В этой связи исследования в области карбонизации минералов сосредоточены на поиске технологических способов, благодаря которым могут быть достигнуты скорости реакции, практически применимые для промышленных целей, а сама реакция станет более эффективной в плане потребления энергии. Технология карбонизации минералов с использованием природных силикатов находится на исследовательском этапе, однако некоторые процессы, в которых применяются промышленные отходы, находятся на демонстрационном этапе.

Коммерческий процесс потребует добычи, дробления и обогащения минералосодержащих руд и их транспортировки на перерабатывающие предприятия, получающие концентрированный поток CO₂ из улавливающей установки (см. рисунок ТР.10). Расход энергии в процессе карбонизации составит 30–50 % мощности улавливающей установки. С учетом дополнительных энергетических потребностей для улавливания CO₂ система УХУ с карбонизацией минералов потребует исходной энергии на 60–180 % больше в расчете на киловатт-час по сравнению со стандартной энергетической установкой без улавливания или карбонизации минералов. Эти энергетические потребности значительно повышают стоимость в расчете на тонну предотвращенных выбросов CO₂ для системы в целом (см. раздел 8). Самым лучшим

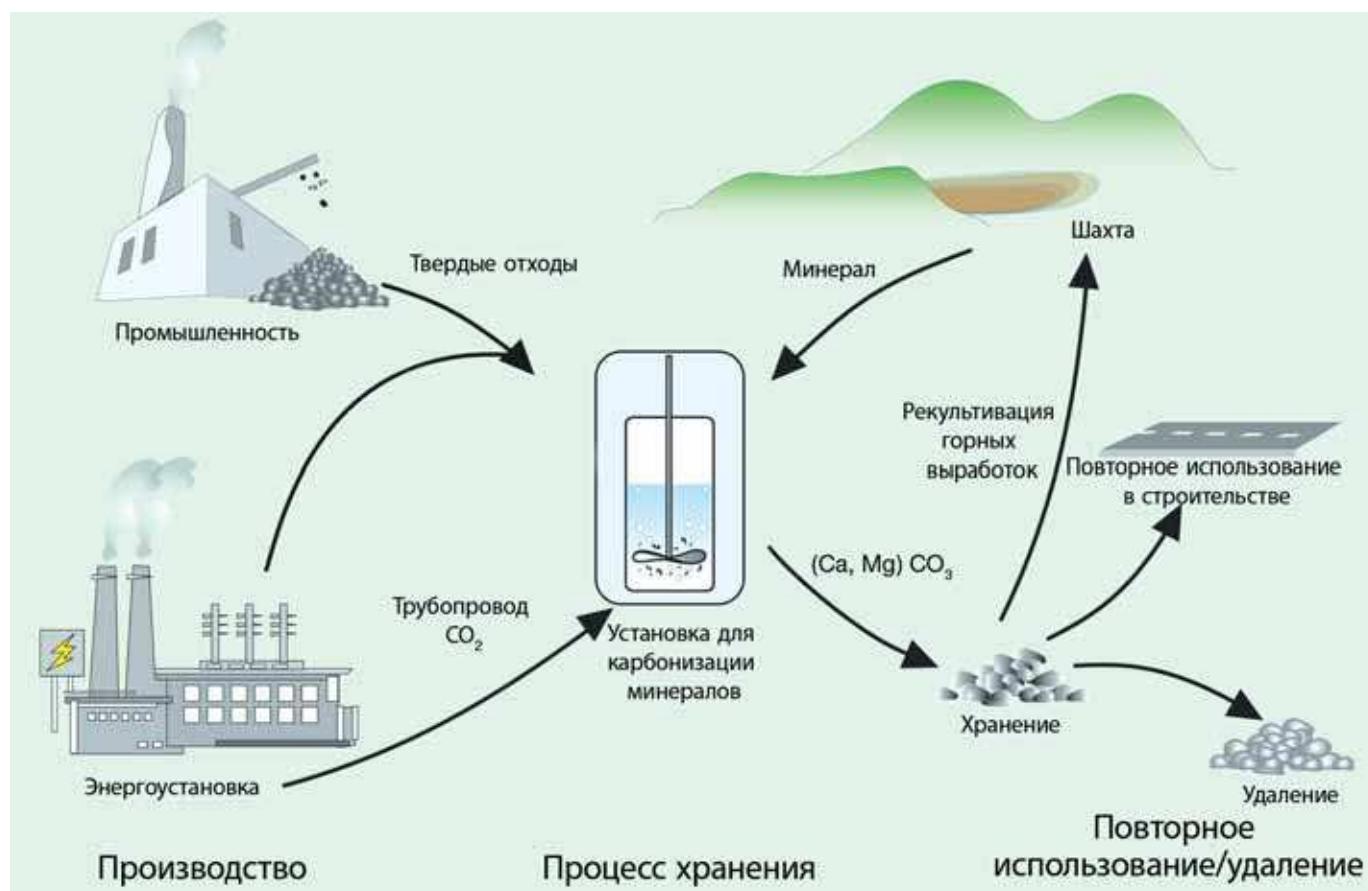


Рисунок ТР.10. Этапы процесса, связанные с карбонизацией минералов из силикатных пород или промышленными остатками. (С разрешения Европейской сети по вопросам конкуренции.)

примером, изученным до настоящего времени, является влажная карбонизация природного силикатного оливина. Оценочная стоимость этого процесса равна приблизительно 50–100 долл. США/чистая минерализованная tCO_2 (дополнительно к стоимости улавливания и транспортировки CO_2 , а также с учетом дополнительных энергетических потребностей). Процесс карбонизации минералов потребует 1,6–3,7 тонны силикатов на тонну подлежащего захоронению CO_2 и дает 2,6–4,7 тонны минералов на тонну CO_2 для хранения, которые должны быть удалены в качестве карбонатов. Поэтому это явится крупной операцией с воздействием на окружающую среду, аналогичным воздействию современных крупномасштабных наземных разработок. Серпентин также часто содержит хризотил, являющийся природной разновидностью асбеста. Его присутствие потребует поэтому таких мер по мониторингу и смягчению последствий, которые применяются в горнодобывающей промышленности. С другой стороны, продукция карбонизации минералов не содержит хризотила, поскольку он является наиболее химически активным компонентом породы и соответственно первым веществом, которое преобразуется в карбонаты.

Прояснения все еще требует ряд вопросов, перед тем как можно будет давать какие-либо оценки потенциала хранения при карбонизации минералов. Эти вопросы включают оценки техни-

ческой осуществимости и соответствующих энергетических потребностей в крупных масштабах, а также в той части силикатных запасов, которые могут технически и экономически эксплуатироваться для хранения CO_2 . Воздействие на окружающую среду горнодобывающей деятельности, удаление отходов и хранение продукции также могут ограничить потенциал. В настоящее время невозможно определить то, в какой степени может быть использована карбонизация минералов, поскольку это зависит от неизвестного количества запасов силикатов, которые невозможно разрабатывать с технической точки зрения, а также вопросов, связанных с окружающей средой, таких как отмеченные выше.

Промышленные виды использования

Промышленные виды использования CO_2 включают химические и биологические процессы, в которых CO_2 выступает в качестве реагента, такие как процессы, применяемые при производстве мочевины и метанола, а также различные технологические применения с непосредственным использованием CO_2 , например в садоводстве, холодильном оборудовании, при упаковке пищевых продуктов, сварке, в напитках и огнетушителях. В настоящее время CO_2 используется во всем мире в количестве

приблизительно 120 МтСО₂ в год (30 МтС·год⁻¹), исключая использование для ПИН (рассматривается в разделе 5). Большая его часть (2/3 общего количества) используется для производства мочевины, которая применяется в производстве удобрений и другой продукции. Определенное количество СО₂ добывают из природных скважин, и часть образуется из промышленных источников — главным образом высококонцентрированных источников, таких как установки для производства аммиака и водорода, — в которых СО₂ улавливается в качестве одного из элементов производственного процесса.

Промышленные виды использования СО₂ могут, в принципе, способствовать тому, чтобы СО₂ не попадал в атмосферу, посредством его хранения в «химическом пуле углерода» (т. е. запас углеродосодержащей промышленной продукции). В то же время в качестве меры по смягчению воздействий на изменение климата этот вариант имеет смысл только в том случае, если количество и срок хранения СО₂ являются значительными, а также если происходит реальное итоговое сокращение выбросов СО₂. Характерный срок жизни большей части СО₂, который используется в настоящее время в промышленных процессах, связан со сроками хранения от нескольких дней до месяцев. После этого хранящийся углерод окисляется и превращается в СО₂ и вновь выбрасывается в атмосферу. Подобные короткие сроки не имеют существенного значения для смягчения воздействия на изменение климата. Кроме того, общая цифра промышленного использования в 120 МтСО₂·год⁻¹ является незначительной по сравнению с выбросами из основных антропогенных источников (см. таблицу ТР2). Хотя некоторые промышленные процессы обеспечивают хранение небольшой доли СО₂ (в общей сложности приблизительно 20 МтСО₂·год⁻¹) на срок до нескольких десятилетий, общее количество долгосрочного хранения (в масштабе веков) составляет сейчас порядка 1 МтСО₂·год⁻¹ или меньше без каких-либо перспектив значительного увеличения этого объема.

Еще одним важным вопросом является вопрос о том, могут ли промышленные виды использования СО₂ привести к общему итоговому сокращению выбросов СО₂ посредством их замены другими промышленными процессами или продукцией. Правильная оценка этого может быть дана только посредством рассмотрения границ определенной системы с точки зрения энергетических и материальных балансов процессов с использованием СО₂, а также проведением подробного анализа цикла жизни предлагаемого вида использования СО₂. Литература в этой области является ограниченной, однако из нее следует, что оценка точных цифр является трудной и что во многих случаях промышленные виды использования могут привести скорее к увеличению общего объема выбросов, а не к итоговому сокращению. Ввиду небольшой доли удерживаемого СО₂ небольшие объемы использования и возможность того, что замена может привести к возрастанию выбросов СО₂, можно сделать вывод о том, что вклад промышленных видов использования СО₂ после его улавливания в смягчении воздействий на изменение климата будет, как предполагается, небольшим.

8. Стоимость и экономический потенциал

Применение технологий УХУ в будущем в сравнении с другими вариантами смягчения воздействий парниковых газов будет в значительной мере определяться строгостью будущих требований в отношении контроля выбросов парниковых газов и предполагаемой стоимостью систем УХУ. В этом разделе в первую очередь дается резюме общей стоимости УХУ для основных вариантов и технологических применений, рассмотренных в предыдущих разделах. Термин «стоимость», используемый в этом резюме и докладе, означает только рыночные цены, но не включает такую внешнюю стоимость, как наносимый окружающей среде ущерб и более широкие социальные расходы, которые могут быть связаны с использованием УХУ. До настоящего времени почти ничего не делалось для оценки и количественного определения такой внешней стоимости. Затем УХУ рассматривается в контексте альтернативных вариантов для глобальных сокращений парниковых газов.

Стоимость систем УХУ

Как отмечалось ранее, имеется сравнительно небольшой опыт в области сочетания улавливания, транспортировки и хранения СО₂ в рамках полностью интегрированной системы УХУ. И хотя некоторые компоненты УХУ уже применяются для определенных промышленных применений в странах с развитым рынком, УХУ пока не используется в крупных энергоустановках (применение с наибольшим потенциалом).

В литературе приводится весьма широкий диапазон стоимости компонентов УХУ (см. разделы 3–7). Этот диапазон объясняется главным образом изменчивостью факторов, характерных для определенных мест, особенно характеристик конструкций, функционирования и финансирования энергоустановок или промышленных предприятий, на которых используется УХУ; типом и стоимостью используемого горючего; необходимыми расстояниями, местностью и количествами, связанными с перевозкой СО₂; а также типом и характеристиками хранения СО₂. Кроме того, до сих пор остаются неопределенности в отношении рабочих характеристик и стоимости нынешних и будущих компонентов технологии УХУ и комплексных систем. В литературе говорится, однако, о широко распространенной уверенности в том, что стоимость монтажа и функционирования систем улавливания СО₂ будет со временем снижаться в результате получения знаний из практического опыта (в результате применения технологии) и постоянных НИОКР. Исторический опыт также свидетельствует о том, что стоимость первых улавливающих установок подобного рода может превышать существующие оценки до последующего снижения стоимости. В большинстве систем УХУ стоимость улавливания (включая компрессию) является самым значительным компонентом стоимости. Стоимость электроэнергии и топлива колеблется в широком диапазоне в зависимости от страны, и эти факторы также влияют на экономическую жизнеспособность вариантов УХУ.

В таблице ТР9 дается резюме стоимости улавливания, транспортировки и хранения СО₂, данные о которой приводились в

Таблица ТР.9 Стоимость компонентов системы УХУ в ценах 2002 г. меняется в зависимости от данного типа энергоустановки или промышленного источника. Стоимость отдельных компонентов невозможно просто суммировать для расчета стоимости системы УХУ в целом с учетом предотвращенных выбросов CO₂ в долл. США. Все цифры представляют стоимость для крупных, новых установок при ценах на природный газ в предполагаемом диапазоне 2,8–4,4 долл. США·ГДж⁻¹ и цен на уголь 1–1,5 долл. США·ГДж⁻¹.

Компоненты системы УХУ	Диапазон стоимости	Замечания
Улавливание из энергоустановки на угле или газе	15–75 долл. США/ чистая захваченная тCO ₂	Чистая стоимость захваченного CO ₂ по сравнению с такой же установкой без улавливания
Улавливание из установки для производства водорода и аммиака или переработки газа	5–55 долл. США/ чистая захваченная тCO ₂	Применяется к источникам высокой чистоты, требующим простого высушивания и компрессии
Улавливание из других промышленных источников	25–115 долл. США/ чистая захваченная тCO ₂	Диапазон отражает использование разных технологий и видов топлива
Транспортировка	1–8 долл. США/ транспортируемая тCO ₂	На 250 км трубопровода или перевозки судами для массового расхода в 5 (верхний конец) — 40 (нижний конец) МтCO ₂ ·год ⁻¹
Геологическое хранение ^a	0,5–8 долл. США/ чистая закачанная тCO ₂	Исключая потенциальные прибыли от ПИН или ПИУМ
Геологическое хранение: мониторинг и проверка	0,1–0,3 долл. США/закачанная тCO ₂	Это включает мониторинг до закачивания, в процессе закачивания и после закачивания и зависит от нормативных требований
Хранение в океане	5–30 долл. США/ чистая закачанная тCO ₂	Включая морскую транспортировку на расстояние в 100–500 км, без учета мониторинга и проверки
Карбонизация минералов	50–100 долл. США/чистая минерализованная тCO ₂	Диапазон для изученного наиболее показательного случая. Включает использование дополнительной энергии для карбонизации

^a Через длительный период времени могут появиться дополнительные расходы, связанные с восстановительными мерами и обязательствами.

разделах 3–7. Также отражена стоимость мониторинга. В таблице ТР.10 составляющие элементы стоимости сведены воедино, чтобы показать общую стоимость УХУ и производства электроэнергии для трех энергетических систем с транспортировкой по трубопроводу и двух вариантов геологического хранения.

Для установок с геологическим хранением и без положительного значения ПИН стоимость УХУ находится в диапазоне 0,02–0,05 долл. США/кВт·ч для установок, работающих на УП, и 0,01–0,03 долл. США/кВт·ч для установок с КЦПГ (и в тех и других применяется улавливание после сжигания). Для установок с КЦКГ (использующих улавливание до сжигания) диапазон стоимости УХУ находится в пределах 0,01–0,03 долл. США/кВт·ч по сравнению с аналогичной установкой без УХУ. Для всех систем электроснабжения стоимость УХУ может быть снижена почти на 0,01–0,02 долл. США/кВт·ч при использовании ПИН с хранением CO₂, поскольку прибыли от ПИН частично компенсируют стоимость УХУ. Самыми крупными сокращениями стоимости характеризуются установки на угле, в которых происходит улавливание самых больших количеств CO₂. В нескольких случаях нижний предел стоимости УХУ может иметь отрицательное значение, что свидетельствует о том, что предполагаемый кредит для ПИН за период срока службы установки превышает самую низкую зарегистрированную стоимость улавливания CO₂ для этой системы. Это также может относиться, вероятно, к нескольким случаям дешевого улавливания CO₂, образующегося в результате промышленных процессов.

Помимо процессов преобразования энергии на основе ископаемого топлива CO₂ может также улавливаться в энергоустановках с использованием биомассы в качестве топлива или установках, рабо-

тающих на совместном сжигании ископаемого топлива и биомассы. В настоящее время установки на биомассе характеризуются небольшой мощностью (менее 100 МВт_э). Это означает, что итоговая стоимость производства с или без УХУ является относительно высокой по сравнению с альтернативными вариантами на ископаемом топливе. Полная стоимость УХУ для биомассы может достигать 110 долл. США за тонну предотвращенных выбросов CO₂. Применение УХУ в установках для преобразования энергии на биомассе в качестве топлива или установках с совместным сжиганием приведет к более низким или негативным¹³ выбросам CO₂, что может снизить стоимость этого варианта в зависимости от рыночной стоимости снижений выбросов CO₂. Кроме того, CO₂ может улавливаться в установках для H₂, работающих на биомассе в качестве топлива. Сообщаемая стоимость предотвращенных выбросов составляет 22–25 долл. США/тCO₂ (80–92 долл. США/тC) в установке производительностью 1 млн Nm³/H₂ в сутки и соответствует повышению производственной стоимости H₂ на порядка 2,7 долл. США·ГДж⁻¹. Значительно более крупные установки на биомассе могут в перспективе получить выгоду в результате экономии, обусловленной ростом масштабов производства, снизив стоимость систем УХУ до уровней, в значительной мере аналогичных установкам на угле. Однако в настоящее время имеется мало опыта работы с крупными установками на биомассе, и поэтому их практическая ценность еще не получила подтверждения, а стоимость и потенциал с трудом поддаются оценке.

Для неэнергетических применений стоимость УХУ столь подробным образом не изучалась. Поскольку эти источники характеризуются значительным разнообразием с точки зрения концентрации CO₂ и давления газового потока, имеющиеся данные

¹³ Если, например, сбор биомассы характеризуется нестабильным показателем (т. е. быстрее ежегодного повторного роста), чистые выбросы CO₂ результате данной деятельности не могут быть отрицательными.

Таблица ТР.10. Диапазон общей стоимости улавливания, транспортировки и геологического хранения CO₂ на основе современной технологии для новых энергоустановок, использующих битуминозный уголь или природный газ.

Рабочие и стоимостные параметры энергоустановки ^a	Энергоустановка на угольной пыли	Энергоустановка с комбинированным циклом природного газа	Энергоустановка с комбинированным циклом комплексной газификации угля
Стандартная установка без УХУ			
Стоимость электроэнергии (долл. США/кВт·ч)	0,043–0,052	0,031–0,050	0,041–0,061
Энергоустановка с улавливанием			
Повышенный расход топлива (%)	24–40	11–22	14–25
Захваченный CO ₂ (кг/кВт·ч)	0,82–0,97	0,36–0,41	0,67–0,94
Предотвращенные выбросы CO ₂ (кг/кВт·ч)	0,62–0,70	0,30–0,32	0,59–0,73
% предотвращенных выбросов CO ₂	81–88	83–88	81–91
Энергоустановка с улавливанием и геологическим хранением^b			
Стоимость электроэнергии (долл. США/кВт·ч)	0,063–0,099	0,043–0,077	0,055–0,091
Стоимость УХУ (долл. США/кВт·ч)	0,019–0,047	0,012–0,029	0,010–0,032
% повышения стоимости электроэнергии	43–91	37–85	21–78
Стоимость смягчения воздействия (долл. США/тCO ₂ предотвращенных выбросов)	30–71	38–91	14–53
(долл. США/тC предотвращенных выбросов)	110–260	140–330	51–200
Энергоустановка с улавливанием и повышенным извлечением нефти^c			
Стоимость электроэнергии (долл. США/кВт·ч)	0,049–0,081	0,037–0,070	0,040–0,075
Стоимость УХУ (долл. США/кВт·ч)	0,005–0,029	0,006–0,022	(–0,005)–0,019
% повышения стоимости электроэнергии	12–57	19–63	(–10)–46
Стоимость смягчения воздействия (долл. США/тCO ₂ предотвращенных выбросов)	9–44	19–68	(–7)–31
(долл. США/тC предотвращенных выбросов)	31–160	71–250	(–25)–120

^a Все изменения относятся к аналогичной (стандартной) установке без УХУ. Подробности предположений, лежащих в основе изложенных диапазонов стоимости, смотри в таблице ТР.3.

^b Стоимость улавливания, основанная на диапазонах, указанных в таблице ТР.3; диапазон стоимости транспортировки 0–5 долл. США/тCO₂; диапазон стоимости геологического хранения: 0,6–8,3 долл. США/тCO₂.

^c Стоимость улавливания и транспортировки аналогична указанной выше; чистая стоимость хранения при диапазоне ПИН от -10 до -16 долл. США/тCO₂ (на основе цен на нефть до 2003 г. в размере 15–20 долл. США/баррель).

проведенных исследований показывают весьма широкий разброс. Самая низкая стоимость была выявлена для процессов, при которых отделение CO₂ уже осуществляется в качестве части производственного процесса, таких как производство водорода (стоимость улавливания при производстве водорода указывалась ранее в таблице ТР.4). Полная стоимость УХУ, включая транспортировку и хранение, повышает стоимость производства водорода, исходя из тех же предположений в отношении стоимости, что и для таблицы ТР.10, на 0,4–4,4 долл. США·ГДж в случае геологического хранения, и на –2,0–2,8 долл. США·ГДж¹ в случае ПИН.

Стоимость предотвращения выбросов CO₂

В таблице ТР.10 показаны также пределы стоимости «предотвращения выбросов CO₂». Энергетические потребности УХУ повышают количество исходного топлива (и соответственно

выбросы CO₂) в расчете на единицу конечной произведенной энергии. В результате этого количество CO₂, образовавшегося в расчете на единицу продукции (кВт·ч электроэнергии), больше у энергоустановки с УХУ по сравнению со стандартной установкой, как показано на рисунке ТР.11. Для определения сокращений выбросов CO₂, которые можно объяснить действием системы УХУ, необходимо сравнить выбросы CO₂ в расчете на кВт·ч установки с улавливанием с соответствующими показателями стандартной установки без улавливания. Разница называется «предотвращенными выбросами».

Оборудование энергоустановок системой УХУ может повлиять на принятие решения относительно типа монтируемой установки и вида используемого топлива. Поэтому в некоторых ситуациях полезным может оказаться расчет стоимости на тонну предотвращенных выбросов CO₂ на основе стандартной установки, отличной от установки с УХУ. В таблице ТР.10 показаны

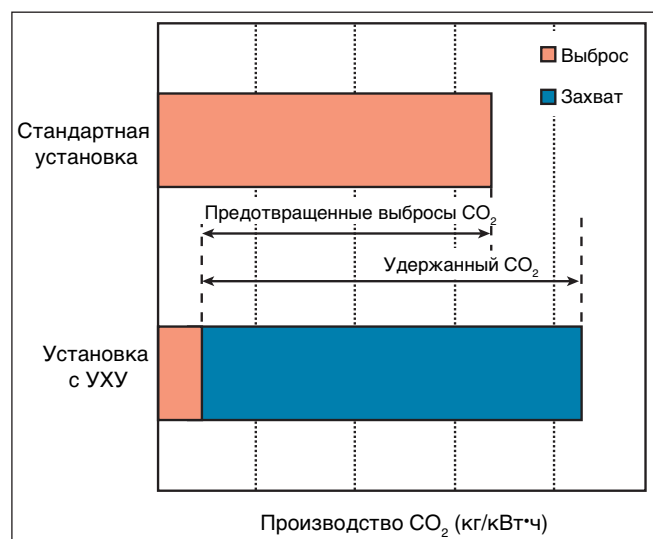


Рисунок ТР.11. Улавливание и хранение CO₂ из энергоустановок. Повышенное производство CO₂ в результате снижения общего КПД энергоустановки вследствие дополнительного расхода энергии на улавливание, транспортировку и хранение, а также любая утечка во время перевозки приводят к увеличению количества «CO₂, произведенного на единицу продукции» (нижняя черта) по сравнению со стандартной установкой (верхняя черта) без улавливания.

коэффициенты стоимости и выбросов для трех стандартных установок и соответствующих установок с УХУ для случая геологического хранения. В таблице ТР.11 дается резюме пределов оценочной стоимости для различных комбинаций установок с УХУ

Таблица ТР.11. Стоимость мер по смягчению воздействия меняется для разных комбинаций стандартных установок и установок с УХУ, основанных на современной технологии для новых энергоустановок. В настоящее время во многих регионах общей практикой будет либо установка на УП, либо установка с КЦПГ¹⁴. Расчет преимуществ ПИН основан на ценах на нефть в размере 15–20 долл. США за баррель. Цены на газ предполагаются в размере 2,8–4,4 долл. США/ГДж, а цены на уголь предполагаются в размере 1–1,5 долл. США/ГДж¹ (на основе таблицы 8.3а).

Тип энергоустановки с УХУ	Стандартная установка с КЦПГ Предотвращение выбросов в долл. США/тCO ₂ (долл. США/тC)	Стандартная установка на УП Предотвращение выбросов в долл. США/тCO ₂ (долл. США/тC)
Энергоустановка с улавливанием и геологическим хранением		
КЦПГ	40 – 90 (140 – 330)	20 – 60 (80 – 220)
УП	70 – 270 (260 – 980)	30 – 70 (110 – 260)
КЦКГ	40 – 220 (150 – 790)	20 – 70 (80 – 260)
Энергоустановка с улавливанием и ПИН		
КЦПГ	20 – 70 (70 – 250)	0 – 30 (0 – 120)
УП	50 – 240 (180 – 890)	10 – 40 (30 – 160)
КЦКГ	20 – 190 (80 – 710)	0 – 40 (0 – 160)

и самых дешевых стандартных установок, представляющих потенциальный интерес. В ней показано, например, что если первоначально планируется установка на УП, то применение системы УХУ в этой установке может привести к более высокой стоимости предотвращения выбросов CO₂ по сравнению с выбором установки с КЦПГ, оборудованной системой УХУ, при условии наличия природного газа. Еще одним вариантом с более низкой стоимостью предотвращения выбросов могло бы явиться строительство установки с КЦКГ и системой улавливания вместо оборудования этой системой установки, работающей на УП.

Экономический потенциал УХУ для смягчения воздействий на изменение климата

Оценки экономического потенциала УХУ основываются на энергетических и экономических моделях, которые изучают вопросы будущего применения, и стоимости УХУ в контексте сценариев, в которых предусматриваются экономически эффективные и самые дешевые варианты стабилизации атмосферных концентраций CO₂.

Хотя количественные результаты этих моделей характеризуются значительными неопределенностями (см. обсуждение ниже), все модели показывают, что системы УХУ вряд ли будут применяться в широких масштабах при отсутствии четко сформулированной политики, благодаря которой существенно ограничиваются выбросы парниковых газов в атмосферу. Многими комплексными оценками предусматривается, что в случае установления пределов выбросов парниковых газов применение систем УХУ будет

¹⁴ КЦКГ не включен в качестве стандартной установки, которая будет построена сегодня, поскольку эта технология не получила еще широкого применения в секторе электроэнергетики и обычно является несколько более дорогостоящей по сравнению с установкой на УП.

осуществляться в широких масштабах в течение нескольких десятилетий с начала введения любого строгого режима в отношении смягчения воздействий на изменение климата. Энергетические и экономические модели показывают, что системы УХУ вряд ли внесут значительный вклад в смягчение воздействий на изменение климата, если они не будут применяться в энергетическом секторе. Для того чтобы это произошло, стоимость сокращений выбросов двуоксида углерода должна превысить 25–30 долл. США/тCO₂ или должен быть санкционирован эквивалентный предел выбросов CO₂. Литература и современный промышленный опыт показывают, что при отсутствии мер по ограничению выбросов CO₂ имеются лишь незначительные благоприятные возможности для применения технологий УХУ. Эти исходные возможности включают улавливание CO₂ из источников с высокой чистотой и низкой стоимостью, транспортировку CO₂ на расстояния менее 50 км наряду с сохранением CO₂ в применении с добавленной стоимостью, таком как ПИН. Потенциал таких благоприятных вариантов составляет около 360 МтCO₂ в год (см. раздел 2).

Модели также показывают, что системы УХУ будут конкурентоспособными с другими вариантами крупномасштабного смягчения воздействий, такими как атомная энергия и технологии возобновляемой энергии. Эти исследования свидетельствуют о том, что включение УХУ в портфель мер по смягчению воздействий могло бы привести к снижению стоимости стабилизации концентрации CO₂ на 30 % или более. Один из аспектов стоимостной конкурентоспособности технологий УХУ заключается в их совместимости с самыми современными энергетическими инфраструктурами.

В большинстве сценариев сокращение выбросов постепенно становится со временем все более сложным. Большинство анализов свидетельствуют о том, что несмотря на значительное распространение систем УХУ к 2050 г., основная работа по развертыванию систем УХУ будет происходить во второй половине этого столетия. Самый ранний ввод в действие систем УХУ обычно предусматривается в промышленно развитых странах, и в конечном итоге их развертывание охватит весь мир. Несмотря на расхождение результатов в разных сценариях и моделях (часто существенным образом) в том, что касается конкретных сочетаний и количества разных мер, необходимых для достижения конкретного сдерживания выбросов (см. рисунок ТР.12), согласно общему мнению, изложенному в литературе, УХУ может явиться важным компонентом обширного портфеля энергетических технологий и концепций сокращения выбросов.

Фактическое использование УХУ будет, вероятно, меньше, чем оценки экономического потенциала, вытекающие из этих энергетических и экономических моделей. Как отмечалось выше, результаты, как правило, основаны на оптимизированном анализе наименьшей стоимости, который неадекватно учитывает существующие в реальном мире барьеры на пути разработки и введения в действие технологии, такие как воздействие на окружающую среду, отсутствие четкой правовой или нормативной основы, предполагаемые инвестиционные риски разных технологий и неопределенность в отношении того, как быстро стоимость УХУ будет снижена

благодаря НИОКР и приобретению знаний на основе практического опыта. В моделях обычно применяются упрощенные предположения относительно стоимости УХУ для разных применений и темпов, которыми будут снижаться будущие расходы.

Согласно сценариям стабилизации CO₂ на уровне 450–750 ppmv, опубликованные оценки совокупного количества CO₂, который потенциально хранится в глобальном масштабе в течение этого века (в геологических формациях и/или в океане), характеризуется широким диапазоном от весьма малых количеств до тысяч гигатонн CO₂. В значительной мере этот широкий диапазон объясняется неопределенностью долгосрочных социально-экономических, демографических и особенно технологических изменений, которые являются основными определяющими факторами будущих выбросов CO₂. Важно отметить, однако, что большинство результатов, согласно сценариям стабилизации на уровне 450–750 ppmv CO₂, характеризуются тенденцией группирования в диапазоне 220–2 200 ГтCO₂ (60–600 ГтC) в случае совокупного введения в действие систем УХУ. Для того чтобы системы УХУ достигли этого экономического потенциала, потребуются несколько сотен или тысяч этих систем во всем мире в течение следующего столетия, при этом объем улавливания каждой из них составляет порядка 1–5 МтCO₂ в год. Как показано в разделе 5, одного только технического потенциала для геологического хранения достаточно, вероятно, для охвата верхнего предела диапазона экономического потенциала для УХУ.

Перспективы утечки CO₂ из мест хранения

Политические последствия медленной утечки из мест хранения зависят от предположений в рамках анализа. Исследования, проведенные для рассмотрения вопроса о том, каким образом обеспечить временное хранение, основаны на разных подходах: стоимость задержки выбросов, минимизация стоимости конкретного сценария смягчения воздействий или допустимые будущие выбросы в контексте предполагаемой стабилизации атмосферных концентраций парниковых газов. В некоторых из этих исследований допускается компенсация будущих выбросов за счет дополнительных сокращений выбросов; результаты зависят от предположений в отношении будущей стоимости сокращений, учетных ставок, объема хранящегося CO₂ и предполагаемого уровня стабилизации для атмосферных концентраций. В других исследованиях компенсация не рассматривается в качестве варианта вследствие политических и институциональных неопределенностей, и анализ сосредоточен на ограничениях, вызванных предполагаемым уровнем стабилизации и объема хранения.

Несмотря на различия между конкретными результатами ряда исследований в зависимости от методов и сделанных предположений, итоговые результаты показывают, что доля, сохраняющаяся в размере порядка 90–99 % в течение 100 лет или 60–95 % в течение 500 лет, может, тем не менее, обеспечить целесообразность применения подобного временного хранения для смягчения воздействий на изменение климата. Все исследования предполагают, что если УХУ будет принято в

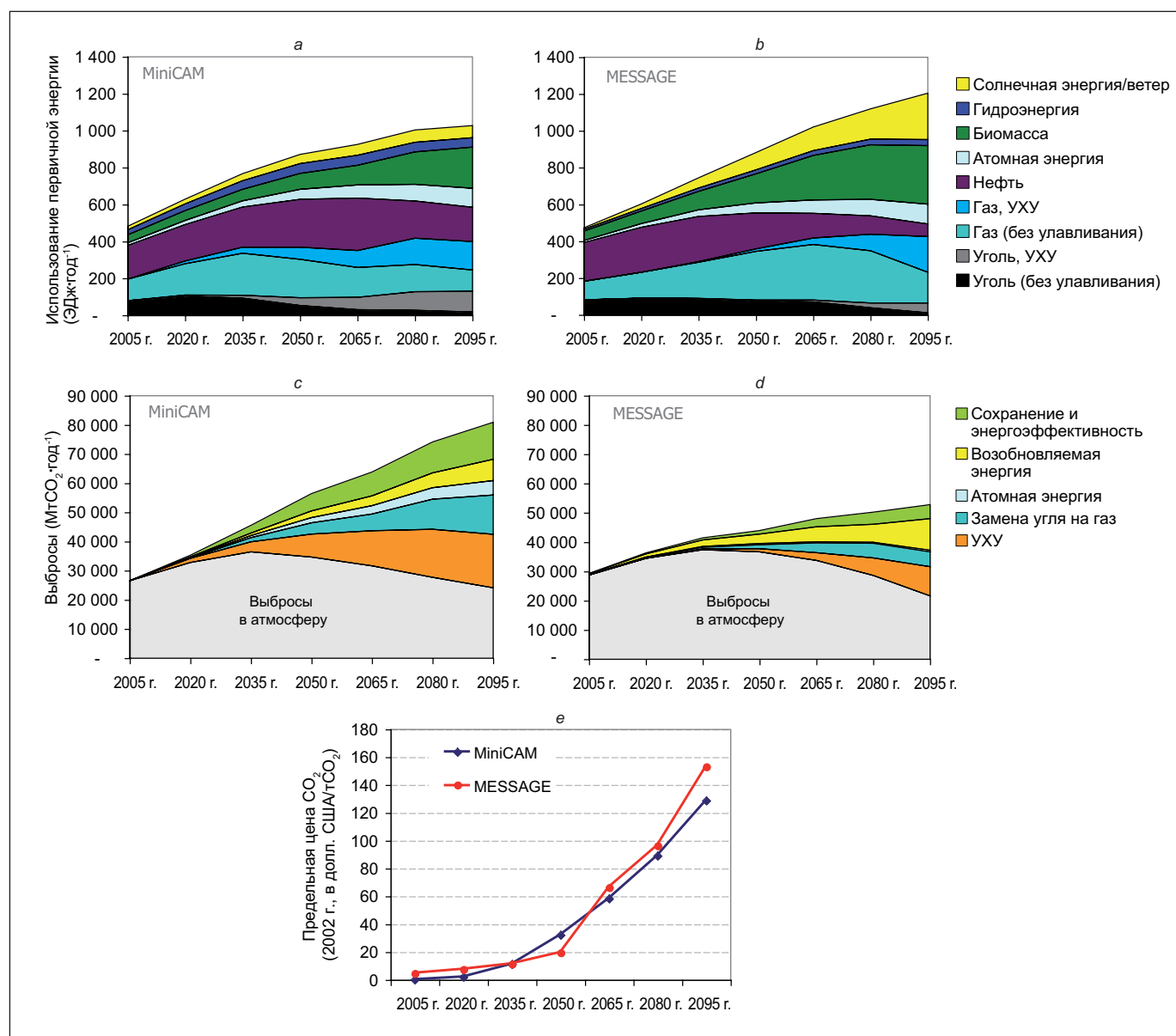


Рисунок ТР.12. Эти рисунки являются иллюстративным примером глобального потенциального вклада УХУ как части портфеля мер по смягчению воздействий. Они основаны на двух альтернативных комплексных моделях оценки (MESSAGE и MiniCAM), содержащих одинаковые предположения в отношении главных движущих факторов выбросов. Результаты будут значительно различаться на региональных уровнях. Этот пример основан на едином сценарии и поэтому не показывает полного диапазона неопределенностей. Разделы а и б показывают глобальное использование первичной энергии, включая ввод в действие систем УХУ. Разделы с и д показывают серым цветом глобальные выбросы CO₂ и разными цветами соответствующие вклады основных мер по сокращению выбросов. Раздел е показывает расчетную предельную стоимость сокращений выбросов CO₂.

качестве меры для смягчения воздействий, должен быть более высокий предел объема утечки, которая может иметь место.

9. Кадастры и учет выбросов

Важным аспектом улавливания и хранения CO₂ является разработка и применение методов для оценки и представления

информации о количествах, в которых выбросы CO₂ (и связанные с ними выбросы метана или окиси азота) сокращаются, нейтрализуются или удаляются из атмосферы. В данном случае присутствуют два элемента: 1) фактическая оценка и представление информации о выбросах для национальных кадастров парниковых газов; и 2) учет УХУ в соответствии с международными соглашениями для ограничения чистых выбросов¹⁵.

¹⁵ В этом контексте «оценка» означает процесс расчета выбросов парниковых газов, а «представление информации» — это процесс сообщения оценок РКК ООН. «Учет» означает правила сравнения выбросов и абсорбции, о которых сообщается в соответствии с обязательствами (МГЭИК, 2003 г.).

Современная основа

В соответствии с РКИК ООН в национальных кадастрах выбросов парниковых газов традиционно представляется информация о выбросах за конкретный год, и они готовились на ежегодной или иной периодической основе. В Руководящих принципах МГЭИК (МГЭИК, 1996 г.) и Докладах о Руководящих указаниях по эффективной практике (МГЭИК, 2000 г.; 2003 г.) дается описание подробных концепций подготовки национальных кадастров, которые являются полными, транспарентными, документированными, оцененными с точки зрения неопределенностей, согласованными во времени и сопоставимыми для разных стран. Используемые в настоящее время документы МГЭИК не содержат конкретной информации о вариантах улавливания и хранения CO_2 . В то же время Руководящие принципы МГЭИК пересматриваются в настоящее время, и их обновленный вариант при опубликовании в 2006 г. будет содержать определенные руководящие принципы. Основа, которая уже была принята, может применяться к системам УХУ, хотя некоторые вопросы необходимо, вероятно, пересмотреть или расширить.

Вопросы, касающиеся учета и представления информации

Ввиду отсутствия доминирующих международных соглашений неясным остается вопрос о том, будут ли различные формы улавливания и хранения CO_2 рассматриваться в качестве сокращения выбросов или абсорбции из атмосферы. И в том и в другом случае результатами УХУ являются новые пулы CO_2 , из которых через некоторое время в будущем может происходить физическая утечка. В настоящее время в системе РКИК ООН отсутствуют какие-либо методы мониторинга, измерения или учета физической утечки из мест хранения. В то же время утечка из хорошо контролируемых мест геологического хранения является, вероятно, незначительной по величине и может произойти в отдаленном будущем.

Можно рассмотреть вопрос о создании специальной категории для УХУ в рамках представления информации о выбросах, но это не является строго необходимым, поскольку количества CO_2 , который улавливается и хранится, могут быть отражены в том секторе, в котором был образован CO_2 . Хранение CO_2 в данном месте может включать CO_2 из многих разных категорий источников и даже из источников во многих разных странах. Неорганизованные выбросы в результате улавливания, транспортировки и закачивания CO_2 для его хранения могут в значительной степени оцениваться в рамках существующих методов представления информации, а выбросы, связанные с дополнительным расходом энергии для функционирования систем УХУ, могут измеряться и сообщаться в рамках существующих кадастров. Может также потребоваться рассмотрение конкретного вопроса о применении УХУ к системам биомассы, поскольку результатом этого применения явится представление информации об отрицательных выбросах, что в настоящее время ни коим образом не предусматривается в рамках системы отчетности.

Вопросы, касающиеся международных соглашений

Обязательства по количественному ограничению выбросов парниковых газов и использованию торговли выбросами, совместное осуществление (СО) и механизм чистого развития (МЧР) требуют наличия четких правил и методов для учета выбросов и абсорбции. Поскольку системы УХУ обладают способностью переноса CO_2 через традиционные границы учета (например, CO_2 может улавливаться в одной стране и храниться в другой, или улавливаться в один год и частично выбрасываться из места хранения в последующий год), правила и методы учета могут отличаться от тех, которые используются в традиционных кадастрах выбросов.

В настоящее время научные, технические и политические обсуждения вопроса учета хранящегося CO_2 в большинстве своем сосредоточены на вопросе поглощения в земной биосфере. История этих обсуждений может послужить определенным руководством для разработки методов учета для УХУ. Признавая потенциально непостоянный характер хранения CO_2 в земной биосфере, РКИК ООН согласилась с идеей о том, что чистые выбросы могут быть сокращены при помощи биологических поглотителей, однако установила сложные правила для подобного учета. УХУ явным образом отличается по многим аспектам от поглощения CO_2 в земной биосфере (см. таблицу ТР.12), а разные формы УХУ явно отличаются друг от друга. В то же время главная цель учета состоит в обеспечении того, чтобы благодаря деятельности в области УХУ осуществлялись реальные и количественно определяемые сокращения чистых выбросов. Одна тонна постоянно хранящегося CO_2 приносит такую же пользу с точки зрения атмосферных концентраций CO_2 , что и одна тонна невыброшенного CO_2 , однако одна тонна временно хранящегося CO_2 приносит меньшую выгоду. Согласно всеобщему признанию, это различие следует отразить в любой системе учета сокращений чистых выбросов парниковых газов.

Руководящие принципы МГЭИК (МГЭИК, 1996 г.) и Доклады о Руководящих указаниях по эффективной практике (МГЭИК, 2000 г.; 2003 г.) также содержат руководящие принципы мониторинга выбросов парниковых газов. Неизвестным остается вопрос о том, можно ли соблюсти пересмотренные Руководящие принципы МГЭИК для УХУ посредством использования методов мониторинга, особенно в случае геологического хранения и хранения в океане. Имеется несколько методов мониторинга и проверки выбросов CO_2 в результате геологического хранения, однако они отличаются с точки зрения применимости, пределов обнаружения и неопределенностей. В настоящее время мониторинг количественных параметров при геологическом хранении может осуществляться во время закачивания, а мониторинг качественных параметров — посредством измерения поверхностных потоков CO_2 . Мониторинг хранения в океане может проводиться путем обнаружения факела выброса CO_2 , но не посредством измерения выброса с поверхности океана в атмосферу. Опыт мониторинга существующих проектов УХУ является до сих пор слишком малым для того, чтобы использовать его в

Таблица ТР.12. Различия в формах УХУ и биологических поглотителях, которые могут повлиять на метод проведения учета.

Характеристика	Земная биосфера	Глубоководные участки океана	Геологические резервуары
Изолированный или хранящийся CO ₂	Изменения запаса могут контролироваться с течением времени.	Можно измерять количество закачанного углерода.	Можно изменять количество закачанного углерода.
Владение	Запасы будут находиться в скрытом месте, а личность их владельца может быть установлена.	Запасы будут характеризоваться мобильностью и могут находиться в международных водах.	Запасы могут находиться в резервуарах, которые пересекают национальные границы или границы владения, и границы отличаются от поверхностных границ.
Управленческие решения	Вопрос о хранении будет определяться на основе постоянных решений относительно приоритетов землепользования.	Люди не принимают каких-либо последующих решений относительно обслуживания после того, как было произведено закачивание.	После того, как было произведено закачивание, принимаемые людьми решения относительно постоянного хранения связаны с минимальным обслуживанием, если хранение не влияет на извлечение ресурсов.
Мониторинг	Может осуществляться мониторинг изменений в запасах.	Изменения в запасах будут моделироваться.	Выброс CO ₂ может быть обнаружен посредством физического мониторинга.
Предполагаемое время удержания	Десятилетия — в зависимости от управленческих решений.	Века — в зависимости от глубины и места закачивания.	В основном постоянное, с принятием мер для предотвращения физического разрушения резервуара.
Физическая утечка	Потери могут произойти в результате возмущения, изменения климата или принятия решений в отношении землепользования.	Потери будут, безусловно, происходить вследствие последующего воздействия циркуляции морской воды и установления равновесия с атмосферой.	Потери вряд ли будут иметь место, за исключением случая разрушения резервуара или наличия изначально необнаруженных путей утечки.
Ответственность	Может быть установлен отдельный землевладелец, имеющий запас изолированного углерода.	Многие стороны могут вносить вклад в один и тот же запас хранящегося CO ₂ , и CO ₂ может находиться в международных водах.	Многие стороны могут вносить вклад в тот же самый запас хранящегося CO ₂ , который может находиться под поверхностью многих стран.

качестве основы для выводов о показателях физической утечки и связанных с ними неопределенностей.

Киотским протоколом устанавливаются различные единицы учета выбросов парниковых газов, сокращений выбросов, а также выбросов, которые улавливаются в рамках различных соответствующих механизмов. «Единицы установленного количества» (ЕУК) определяют обязательства по выбросам и применяются к торговле выбросами, «сертифицированные сокращения выбросов» (ССВ) используются в рамках МЧР, а «единицы сокращения выбросов» (ЕСВ) применяются в рамках СО. На сегодняшний день в результате международных переговоров выработаны незначительные руководящие указания относительно методов расчета и учета, связанных с проектами по сокращению выбросов CO₂ из систем УХУ (только ССВ или ЕСВ), и поэтому неясным остается вопрос о том, каким образом подобные сокращения будут учитываться в соответствии с Киотским протоколом. Некоторые руководящие указания могут быть даны при помощи методологий, касающихся правил в отношении биологических поглотителей. Кроме того, в действующих соглашениях не рассматриваются трансграничные проекты в области УХУ. Это имеет особенно важное значение при рассмотрении трансграничных проектов, связанных с улавливанием CO₂ в стране, включенной в «приложение В», которая является Стороной Киотского протокола,

но хранением CO₂ в стране, которая не включена в приложение В или не несет обязательств согласно Протоколу.

Хотя имеющиеся в настоящее время методы для национальных кадастров выбросов могут либо включать системы УХУ либо быть пересмотрены для подобного включения, учет хранящегося CO₂ вызывает вопросы относительно признания и передачи ответственности за выбросы хранящегося CO₂. Подобные вопросы могут быть рассмотрены в рамках национальных и международных политических процедур.

10. Пробелы в знаниях

Это резюме пробелов в знаниях охватывает аспекты УХУ, касающиеся ситуаций, когда повышение уровня знаний, приобретение опыта и уменьшение неопределенностей будут иметь важное значение для оказания содействия процессу принятия решений относительно введения в действие УХУ в крупных масштабах.

Технологии улавливания и хранения

Технологии для улавливания CO₂ являются относительно хорошо понятными сегодня благодаря наличию промышленного опыта по целому ряду применений. Кроме того, отсутствуют какие-либо серьезные технические или научные препятствия для применения

транспортировки по трубопроводу или геологического хранения CO_2 после улавливания. В то же время необходимо объединение элементов улавливания, транспортировки и хранения в рамках полномасштабных проектов для получения знаний и опыта, которые требуются для более широкого введения в действие технологий УХУ. Необходимы также НИОКР, с тем чтобы лучше знать появляющиеся концепции и содействовать применению технологии для улавливания CO_2 , которые характеризуются наличием потенциала для существенного уменьшения стоимости улавливания для новых и существующих установок. Если говорить более конкретно, то существуют пробелы в знаниях о энергоустановках с улавливанием CO_2 , работающих на угле и природном газе, мощность которых составляет порядка нескольких сотен мегаватт (или нескольких MtCO_2). Необходима демонстрация улавливания CO_2 в этом масштабе для определения надежности и поведения в окружающей среде разных типов энергосистем с улавливанием, уменьшения стоимости УХУ и повышения доверия к оценкам стоимости. Кроме того, требуется крупномасштабное осуществление для получения более качественных оценок стоимости и рабочих характеристик УХУ в промышленных процессах, таких как отрасли по производству цемента и стали, которые являются крупными источниками CO_2 , однако имеют незначительный или нулевой опыт в области улавливания CO_2 .

В отношении технологии карбонизации минералов, главный вопрос заключается в том, каким образом использовать получаемое в процессе реакции тепло в практических конструкциях, которые могут уменьшить стоимость и чистый расход энергии. Для заполнения этих пробелов требуются экспериментальные установки для проведения испытаний.

В отношении промышленных видов использования захваченного CO_2 , дальнейшее исследование чистого энергетического баланса и баланса CO_2 промышленных процессов, в ходе которых используется захваченный CO_2 , могло бы способствовать получению более полного представления о потенциале этого варианта.

Географическое распределение источников и возможных мест хранения CO_2

Получение более ясного представления о близости крупных источников CO_2 к подходящим местам хранения (всех типов), а также определение кривых стоимости для улавливания, транспортировки и хранения CO_2 будут способствовать процессу принятия решений относительно введения в действие УХУ в крупных масштабах. В этом контексте необходимы подробные оценки на региональном уровне для определения того, насколько хорошо крупные источники выбросов CO_2 (как действующие, так и будущие) соответствуют подходящим вариантам хранения, которые могут быть использованы для требуемых объемов.

Емкость и эффективность геологического хранения

Существует необходимость в более точных оценках емкости хранения на глобальном, региональном и местном уровнях, а

также лучшего понимания процессов долгосрочного хранения, миграции и утечки. Рассмотрение последнего вопроса потребует обеспечения более широких возможностей для мониторинга и проверки поведения CO_2 при геологическом хранении. Важное значение для лучшего понимания нами этих вопросов будет иметь осуществление большего количества проектов по экспериментальному и демонстрационному хранению в разнообразных геологических, географических и экономических условиях.

Последствия хранения в океане

Основные пробелы в знаниях, которые должны быть ликвидированы, до того как может быть проведена оценка рисков и потенциала для хранения в океане, связаны с экологическим воздействием CO_2 в глубоководных участках океана. Необходимы исследования реакции биологических систем в морских глубинах на добавленный CO_2 , включая исследования большей продолжительности и больших масштабов по сравнению с теми, которые осуществлялись до настоящего времени. Кроме того, требуется также разработка методов и датчиков для обнаружения и мониторинга факелов выбросов CO_2 и их биологических и геохимических последствий.

Правовые и нормативные вопросы

Все еще недостаточными являются имеющиеся в настоящее время знания о правовых и нормативных требованиях для осуществления УХУ в более крупных масштабах. Отсутствует какая-либо надлежащая основа для упрощения осуществления геологического хранения и учета связанных с ним долгосрочных обязательств. Разъяснения требуют вопросы, касающиеся потенциальных правовых ограничений хранения в морской окружающей среде (хранения в океане и геологических структурах подстилающей поверхности придонного слоя). Другие основные пробелы в знаниях связаны с методологиями для кадастров и учета выбросов.

Глобальный вклад УХУ в смягчение воздействий на изменение климата

Имеется несколько других вопросов, которые будут способствовать будущему процессу принятия решений в отношении УХУ благодаря дальнейшему улучшению нашего понимания потенциала вклада УХУ в долгосрочное глобальное смягчение воздействий и стабилизацию концентраций парниковых газов. Это включает потенциал для передачи и распространения технологий УХУ, в том числе возможности для развивающихся стран эксплуатировать УХУ, их применение к источникам образования CO_2 из биомассы и потенциальное взаимодействие между инвестированием в УХУ и другими вариантами смягчения воздействий. Требуется дальнейшее исследование вопроса о том, как долго будет необходимо хранить CO_2 . Этот вопрос связан с методами стабилизации и аспектами значимости для разных поколений.

Приложение I: Глоссарий, акронимы и сокращения

Определения, содержащиеся в этом глоссарии, относятся к использованию терминов в контексте Резюме для лиц, определяющих политику, Специального доклада об улавливании и хранении двуокиси углерода.

Адсорбция

Поглощение молекул поверхностным слоем твердого тела или жидкости.

Амин

Органическое химическое соединение, содержащее один или несколько атомов азота в группах $-NH_2$, $-NH$ или $-N$.

Антропогенный источник

Источник, который является результатом деятельности человека в отличие от природного источника.

Базальт

Разновидность основной магматической породы, которая обычно извергается из вулкана.

Биомасса

Вещество, получаемое в последнее время из биосферы.

Битуминозный уголь

Промежуточная разновидность угля, находящаяся между крайними пределами от торфяного угля до антрацита, ближе к антрациту.

Верхний слой океана

Океан до глубины в 1 000 м.

Вода формации

Вода, которая естественным образом образуется в порых формаций пород.

Водоносный горизонт

Географическая структура, которая содержит воду и характеризуется значительной водопроницаемостью, обеспечивающей поток; ограничивается уплотнениями породы.

Возобновляемые источники

Источники энергии, которые по своей сути являются возобновляемыми, такие как солнечная энергия, гидроэнергетика, ветер и биомасса.

Восстановительные меры

Процедура устранения любого источника аварии.

Восходящая модель

Модель, при которой в анализ включаются технологические и инженерные детали.

Выброс

Означает катастрофический разрыв скважины, при котором происходит неконтролируемый выброс на поверхность нефтяной жидкости или водяного потока.

Выработанный

Относится к пласту: пласт, характеризующийся значительным сокращением добычи.

Газификация

Процесс, в ходе которого углеродосодержащее твердое топливо преобразуется в углеродо- и водородосодержащее газообразное топливо в результате реакции с воздухом или кислородом и паром.

Газовая турбина

Машина, в которой топливо сжигается вместе со сжатым воздухом или кислородом, и механическая работа совершается благодаря расширению нагретых продуктов.

Геохимическое улавливание

Задержка закачанного CO_2 в результате геохимических реакций.

Гидрат

Похожее на лед соединение, образующееся в результате реакции воды с CO_2 , CH_4 или похожими газами.

Глубоко залегающая соленосная формация

Глубоко залегающая подземная формация породы из проницаемых материалов и содержащая жидкости с высоким содержанием соли.

Глубоководные участки моря

Море глубиной более 1 000 м.

Граница

В системе учета ПГ — разделение между учетными единицами, независимо от того, являются ли они национальными, организационными, оперативными, бизнес-единицами или секторами.

Демонстрационный этап

Технология разработана и действует на уровне экспериментальной установки, однако требуется дальнейшая разработка, для того чтобы данная технология была готова для проектирования и создания полноценной системы.

Дымовой газ

Газы, образующиеся в результате сжигания топлива, которые обычно выбрасываются в атмосферу.

Естественный аналог

Естественное событие, которое отражает в наиболее существенных элементах предполагаемую или фактическую деятельность человека.

Закачивание

Процесс использования давления для принудительной подачи жидкостей в скважины.

Закачивающая скважина

Скважина, в которую жидкости закачиваются, а не из которой они добываются.

Известняк

Осадочная порода, состоящая главным образом из минерального кальцита (карбонат кальция), обычно образующаяся из раковин мертвых организмов.

Источник

Любой процесс, деятельность или механизм, который является источником выброса в атмосферу парникового газа, аэрозоля или их предшественника.

Исходное сырье

Материал, который используется в качестве исходного в определенном процессе.

Исходные условия

Данная исходная величина, по отношению к которой измеряется изменение.

Карбонат

Природные минералы, состоящие из различных анионов, присоединенных к катиону CO_3^{2-} (например, кальцит, доломит, сидерит, известняк).

Киотский протокол

Протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата, который был принят в Киото 11 декабря 1997 г.

Кислый газ

Любая газовая смесь, которая превращается в кислоту при растворении в воде (обычно относится к $\text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2$ из высокосернистого нефтяного газа).

КПД улавливания

Доля CO_2 , отделенного от газового потока источника.

Кредит углерода

Механизм, характеризующийся элементами конвертируемости и передачи, который позволяет организации получить финансовую выгоду в результате сокращения выбросов.

Криогенный

Относящийся к низким температурам, обычно ниже -100°C .

КЦКГ

Комбинированный цикл комплексной газификации: производство энергии, при котором происходит газификация углеводородов или угля, а газ используется в качестве топлива для приведения в движение как газовой, так и паровой турбины.

КЦПГ

Комбинированный цикл природного газа: энергетическая установка с газовой и паровой турбинами, работающая на сжигании природного газа.

Ловушка

Геологическая структура, физически удерживающая жидкости, которые являются более легкими по сравнению с находящимися ниже жидкостями, например перевернутая чаша.

Лондонская конвенция

Конвенция по предотвращению загрязнения моря сбросами отходов и других материалов, которая была принята в Лондоне, Мехико, Москве и Вашингтоне 29 декабря 1972 г.

Лондонский протокол

Протокол к Конвенции, принятый в Лондоне 2 ноября 1996 г., но который не вступил в силу во время написания.

МВт·ч

Мегаватт-час

МЕА

Моноэтаноламин

Мембрана

Пленка или пластина, которая выборочно разделяет компоненты жидкой смеси.

Миграция

Перемещение жидкостей в породах-коллекторах.

Модернизация

Модификация существующего оборудования с целью его обновления и включения новых элементов после установки.

Мониторинг

Процесс измерения количества хранящейся двуокиси углерода и ее местонахождения.

МЧР

Механизм чистого развития: механизм Киотского протокола, предназначенный для оказания помощи странам, не включенным в приложение I, в достижении целей Протокола, а также странам, включенным в приложение I, для выполнения их обязательств.

Национальный кадастр парниковых газов

Кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, подготовленный Сторонами РКИК ООН.

Не имеющий промышленного значения

Почти полное отсутствие вероятности промышленной разработки при нынешних или прогнозируемых экономических условиях.

Нейтрализация карбоната

Метод хранения углерода в океане, основанный на реакции CO_2 с природным карбонатом, таким как известняк, для получения анионов бикарбоната и растворимых катионов.

Неорганизованный выброс

Любые выбросы газов или пара в результате антропогенной деятельности, такой как переработка или транспортировка газа или нефти.

Нисходящая модель

Модель, основанная на применении макроэкономической теории и эконометрической методики к историческим данным о потреблении, ценах и т. д.

НТС

Низшая теплота сгорания: энергия, полученная в результате сжигания топлива, за исключением остаточной теплоты воды.

Обязательство по сокращению

Обязательство Стороны Киотского протокола соблюдать свой установленный количественный предел выбросов.

ОСПАР

Конвенция по защите морской среды северо-восточной части Атлантического океана, которая была принята в Париже 22 сентября 1992 г.

Оценка риска

Часть системы управления в условиях риска.

Парциальное давление

Давление, которое оказывал бы определенный газ в газовой смеси, если бы он занимал объем всей смеси.

Перекрывающая порода

Порода с очень низкой проницаемостью, которая действует в качестве верхнего уплотнителя, не позволяющего жидкости вытекать из резервуара.

Перспективность

Качественная оценка вероятности наличия подходящего места для хранения в данном районе, основанная на имеющейся информации.

ПИГ

Повышенное извлечение газа: извлечение газа, помимо добываемого естественным образом, в результате закачивания жидкости или применения других средств.

ПИН

Повышенное извлечение нефти: извлечение нефти, помимо добываемой естественным образом, в результате закачивания жидкости или применения других средств.

ПИУМ

Повышенное извлечение угольного метана; использование CO_2 для повышения извлечения метана, присутствующего в не имеющих промышленного значения угольных пластах, посредством избирательной адсорбции CO_2 на угле.

Плавучесть

Тенденция жидкого или твердого тела всплывать в жидкости с более высокой плотностью.

Плотная фаза

Газ, сжатый до плотности, приближающейся к плотности жидкости.

Повышенное извлечение газа

См. ПИГ

Повышенное извлечение нефти

См. ПИН

Поглотитель

Естественный поглотитель CO_2 из атмосферы, который обычно содержится в почвах, лесах или океанах.

Поглощение

Химическое или физическое поглощение молекул основной массой твердого или жидкого вещества, в результате которого образуется либо раствор, либо соединение.

Пористое пространство

Пространство между зернами породы или отложений, которое может содержать жидкости.

Придонный слой

Пограничная линия между свободной водой и верхней частью донного седимента.

Предотвращенные выбросы CO₂

Разница между количеством выбросов CO₂ из системы без УХУ и количеством итоговых выбросов CO₂ из аналогичной системы с УХУ.

Проверка

Доказательство результатов мониторинга по отношению к стандарту, который еще предстоит установить. В контексте МЧР — независимый обзор назначенным оперативным органом контролируемых сокращений антропогенных выбросов.

Проницаемость

Способность протекать или пропускать жидкости через пористый твердый материал, такой как порода.

Разлом

Любой излом в породе, вдоль которого не наблюдается какого-либо значительного перемещения.

Резервуар

Приповерхностная масса породы с достаточной пористостью и проницаемостью для хранения и пропускания жидкостей.

Репрезентативная величина

Репрезентативная величина основывается на средних значениях, полученных в ходе различных исследований.

РКИК ООН

Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата, которая была принята в Нью-Йорке 9 мая 1992 г.

Сброс

В геологии – поверхность, на которой пласт не является более неизменным и характеризуется смещением.

Сверхкритический

При температуре и давлении выше критической температуры и давления соответствующего вещества.

СДСВ

Специальный доклад о сценариях выбросов; используется в качестве основы для перспективных оценок климата в ТДО.

Седиментационный бассейн

Естественное углубление большого размера на поверхности Земли, заполненное седиментами.

Сейсмический метод

Измерение свойств пород при помощи скорости звуковых волн, создаваемых искусственным или естественным путем.

Сжигание обогащенного кислородом топлива

Сжигание топлива с добавлением чистого кислорода или смеси кислорода, воды и двуокиси углерода.

Скважина

Пробуренное антропогенное отверстие в земле для добычи жидкостей или газов или закачивания жидкостей.

Скруббер

Устройство для очистки газов или извлечения газообразного компонента посредством контакта между газом и жидкостью.

Смягчение воздействия

Процесс снижения воздействия любого нарушения.

СО

Совместное осуществление: согласно Киотскому протоколу оно дает возможность Стороне с установленной цифрой выбросов ПГ получать кредиты от других Сторон, включенных в приложение I.

Совместное сжигание

Одновременное использование нескольких видов топлива в энергетической установке или промышленном процессе.

Сокращение

Сокращение степени или интенсивности выбросов или других загрязнителей.

Соленосная формация

Осадочные породы, насыщенные водами формации с высокими концентрациями растворенных солей.

Стабилизация

Означает стабилизацию атмосферных концентраций парниковых газов.

Стабильная геологическая формация

Формация, целостность которой в последнее время не нарушалась в результате тектонического движения.

Сценарий

Вероятное описание будущего на основе внутренне согласованного набора предположений относительно ключевых взаимоотношений и движущих сил.

ТДО

Третий доклад об оценках Межправительственной группы экспертов по изменению климата.

Технический потенциал

Объем, в котором можно сократить выбросы парниковых газов путем применения технологии или практики, которая достигла демонстрационного этапа.

Топливный элемент

Электрохимическое устройство, в котором топливо окисляется контролируемым образом для непосредственного получения электрического тока и тепла.

Торговля выбросами

Схема торговли, которая предусматривает выдачу разрешений на выброс определенного количества тонн загрязнителя, которые продаются и покупаются.

Точечный источник

Источник выбросов, который ограничивается одним небольшим местом.

Улавливание до сжигания

Улавливание двуокиси углерода в результате обработки топлива перед сжиганием.

Улавливание после сжигания

Улавливание двуокиси углерода после сжигания топлива.

УП

Угольная пыль: обычно используется в бойлерах, работающих на мелкоизмельченном угле.

Уплотнение

Водонепроницаемая порода, которая образует барьер сверху и вокруг породы-коллектора таким образом, что жидкости остаются в породе-коллекторе.

Устойчивый

Относится к развитию, которое является устойчивым в экологической, социальной и экономической областях.

Утечка

В отношении торговли углеродом — изменение выбросов из антропогенных источников или абсорбции поглотителями, которое происходит за пределами границы проекта.

Утечка

В отношении хранения углерода — утечка закачанной жидкости из хранилища.

УХУ

Улавливание и хранение двуокиси углерода.

УХУ на основе биомассы

Улавливание и хранение углерода, когда биомасса является исходным сырьем.

Фактор выбросов

Стандартизованная мера выбросов ПГ с точки зрения активности, например, тонны ПГ, выброшенные в расчете на тонну потребленного топлива.

Фиксация

Иммобилизация CO_2 в результате его реакции с другим веществом для получения стабильного соединения.

Формация

Магматическое тело значительной протяженности с явно выраженными характеристиками, которые позволяют геологам нанести его на карту, описать и дать ему название.

Хранение

Процесс удерживания захваченного CO_2 , с тем чтобы он не достиг атмосферы.

Экономически осуществимый при определенных условиях

Технология является хорошо понятой и используется в отдельных коммерческих применениях, например в условиях благоприятного налогового режима или особо благоприятного рынка, при переработке не менее $0,1 \text{ MtCO}_2 \cdot \text{год}^{-1}$ и небольшом количестве (менее 5) повторений данной технологии.

Экономический потенциал

Объем сокращений выбросов парниковых газов согласно конкретному варианту, который может быть осуществлен экономически эффективным образом с учетом доминирующих обстоятельств (т. е. рыночная стоимость сокращений выбросов CO_2 и стоимость других вариантов).

Энергоноситель с низким содержанием углерода

Топливо, которое обеспечивает незначительные выбросы CO_2 в течение всего цикла использования топлива, такое как метанол.

Приложение II: Список основных докладов МГЭИК

Climate Change – The IPCC Scientific Assessment

Доклад рабочей группы МГЭИК по научной оценке, 1990 г.

Climate Change – The IPCC Impacts Assessment

Доклад рабочей группы МГЭИК по оценке воздействий, 1990 г.

Climate Change – The IPCC Response Strategies

Доклад рабочей группы МГЭИК по стратегиям реагирования, 1990 г.

Emissions Scenarios

Подготовлено рабочей группой МГЭИК по стратегиям реагирования, 1990 г.

Assessment of the Vulnerability of Coastal Areas to Sea Level Rise – A Common Methodology

1991 г.

Climate Change 1992 – The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment

Доклад рабочей группы МГЭИК по научной оценке, 1992 г.

Climate Change 1992 – the Supplementary Report to the IPCC Impacts Assessment

Доклад рабочей группы МГЭИК по оценке воздействий, 1992 г.

Climate Change: The IPCC 1990 and 1992 Assessments

Первый доклад об оценках МГЭИК: Обзор и Резюме для лиц, определяющих политику, и приложение МГЭИК, 1992 г.

Global Climate Change and the Rising Challenge of the Sea

Подгруппа по управлению прибрежными зонами рабочей группы МГЭИК по стратегиям реагирования, 1992 г.

Report of the IPCC Country Study Workshop, 1992**Preliminary Guidelines for Assessing Impacts of Climate Change, 1992**

Руководящие принципы по составлению национальных кадастров газов с парниковым эффектом (три тома), МГЭИК, 1994 г.

Climate Change 1994 – Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios**IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations, 1995**

Climate Change 1995 – The Science of Climate Change – Вклад рабочей группы I во Второй доклад об оценках

Climate Change 1995 – Scientific-Technical Analyses of Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change – Вклад рабочей группы II во Второй доклад об оценках

Climate Change 1995 – The Economic and Social Dimensions of Climate Change – Вклад рабочей группы III во Второй доклад об оценках

The IPCC Second Assessment Synthesis of Scientific-Technical Information Relevant to Interpreting Article 2 of the UN Framework Convention on Climate Change, 1995

Пересмотренные руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов (три тома), МГЭИК, 1996 г.

Technologies, Policies and Measures for Mitigating Climate Change – IPCC Technical Paper 1, 1996

An Introduction to Simple Climate Models Used in the IPCC Second Assessment Report – IPCC Technical Paper 2, 1997

Stabilisation of Atmospheric Greenhouse Gases: Physical, Biological and Socio-Economic Implications – IPCC Technical Paper 3, 1997

Implications of Proposed CO₂ Emissions Limitations – IPCC Technical Paper 4, 1997

Последствия изменения климата для регионов: оценка уязвимости
Специальный доклад МГЭИК, 1997 г.

Авиация и глобальная атмосфера
Специальный доклад МГЭИК, 1999 г.

Методологические и технологические вопросы передачи технологии
Специальный доклад МГЭИК, 2000 г.

Сценарии выбросов
Специальный доклад МГЭИК, 2000 г.

Землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство
Специальный доклад МГЭИК, 2000 г.

Руководящие указания по эффективной практике и учет факторов неопределенности в национальных кадастрах парниковых газов

Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов, 2000 г.

Climate Change and Biodiversity – IPCC Technical Paper V, 2002

Изменение климата, 2001 г.: Научные аспекты – Вклад рабочей группы I в Третий доклад об оценках

Изменение климата, 2001 г.: Последствия, адаптация и уязвимость – Вклад рабочей группы II в Третий доклад об оценках

Изменение климата, 2001 г.: Смягчение последствий – Вклад рабочей группы III в Третий доклад об оценках

Изменение климата, 2001 г.: Обобщенный доклад

Руководящие указания по эффективной практике для землепользования, изменений в землепользовании и лесного хозяйства

Программа МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов, 2003 г.

Охрана озонового слоя и глобальной климатической системы: вопросы, связанные с гидрофторуглеродами и перфторуглеродами

Специальный доклад МГЭИК/ТЕАП, 2005 г.

Специальный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) предоставляет информацию для лиц, определяющих политику, ученых и инженерно-технических работников в области изменения климата и уменьшения выбросов CO₂. В докладе приводится описание источников CO₂, технические особенности его улавливания, транспортировки и хранения. В нем также дается оценка стоимости, экономического потенциала и социально-технических проблем, включая общественное восприятие и правовые вопросы. Основные варианты хранения CO₂ включают хранение в геологических формациях и океане, а также карбонизацию минералов. В значительной мере доклад рассматривает вопросы улавливания и хранения CO₂ в контексте других вариантов смягчения воздействий на изменение климата, таких как переход на другие виды топлива, возобновляемые источники энергии, атомную энергию и повышение энергетического КПД.

Доклад показывает, что потенциал улавливания и хранения CO₂ является значительным, а общая стоимость мер по смягчению воздействий может быть уменьшена по сравнению со стратегиями, при которых рассматриваются только другие варианты уменьшения воздействий на изменение климата. Важность будущей системы улавливания и хранения CO₂ для целей уменьшения воздействий на изменение климата будет зависеть от ряда показателей, включая финансовые стимулы для размещения системы, а также насколько успешно будут учитываться факторы риска, связанные с хранением CO₂. Настоящее издание включает Резюме для лиц, определяющих политику, которое было принято правительствами, представленными в МГЭИК, и Техническое резюме.

Специальный доклад МГЭИК Улавливание и хранение двуокиси углерода предоставляет весьма ценную информацию для ученых, занимающихся исследованиями в области окружающей среды, геологии, техники и нефтегазового сектора, для лиц, определяющих политику в правительствах и организациях по контролю окружающей среды, а также для научно-технических работников в промышленности.

Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭИК) была учреждена совместно Всемирной Метеорологической Организацией и Программой Организации Объединенных Наций по окружающей среде (ЮНЕП). Группа экспертов предоставляет авторитетные оценки научной информации об изменении климата на международном уровне. Настоящий доклад был подготовлен МГЭИК по предложению Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата.

Полный текст Специального доклада был опубликован «Кембридж Университи Пресс» (www.cambridge.org), а версия в электронном виде доступна на веб-сайте Секретариата МГЭИК (www.ipcc.ch) или может быть получена на компакт-дисках из Секретариата МГЭИК. Настоящая брошюра содержит Резюме для лиц, определяющих политику, и Техническое резюме доклада.