

ГЛАВА 5

ТРАНСПОРТИРОВКА, ВПРЫСКИВАНИЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ХРАНЕНИЕ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА

Авторы

Сэм Холлоуэй (СК), Анар Каримджи (США),

Макото Акаи (Япония), Риитта Пипатти (Финляндия) и Кристин Рипдал (Норвегия)

Содержание

5	Транспортировка, впрыскивание и геологическое хранение двуокиси углерода	
5.1	Введение	5.5
5.2	Общий обзор.....	5.5
5.3	Улавливание CO ₂	5.6
5.4	Транспортировка CO ₂	5.9
5.4.1	Транспортировка CO ₂ с помощью трубопровода.....	5.10
5.4.2	Транспортировка CO ₂ с помощью судов	5.12
5.4.3	Оборудование для промежуточного хранения вдоль маршрутов транспортировки CO ₂ ..	5.12
5.5	Впрыск CO ₂	5.12
5.6	Геологическое хранение CO ₂	5.13
5.6.1	Описание путей/источников выбросов	5.13
5.7	Методологические вопросы	5.15
5.7.1	Выбор метода	5.17
5.7.2	Выбор коэффициентов выбросов и данных о деятельности	5.19
5.7.3	Полнота	5.20
5.7.4	Формирование согласованного временного ряда.....	5.20
5.8	Оценка неопределенности.....	5.20
5.9	Обеспечение качества/контроль качества (ОК/КК) кадастра	5.21
5.10	Отчетность и документация.....	5.23
Приложение 5.1	Общее описание потенциальных технологий мониторинга для геологических хранилищ CO ₂	5.25
Ссылки	5.34

Уравнение

Уравнение 5.1	Общие национальные выбросы.....	5.19
---------------	---------------------------------	------

Рисунки

Рисунок 5.1	Схематическое представление процесса улавливания и хранения углерода с нумерацией, указывающей на рассматриваемые выше системы.	5.6
Рисунок 5.2	Системы улавливания CO ₂ (по СДУХУГ):.....	5.8
Рисунок 5.3	Порядок оценки выбросов из мест хранения CO ₂	5.15
Рисунок А1	Иллюстрация потенциала для утечек CO ₂ из резервуара геологического хранения, которые могут произойти за пределами хранилища.	5.25

Таблицы

Таблица 5.1	Категории источников для УХУГ	5.8
Таблица 5.2	Коэффициенты выбросов уровня 1 по умолчанию для трубопроводного транспорта CO ₂ от места улавливания CO ₂ до места его окончательного хранения	5.12
Таблица 5.3	Потенциальные пути выбросов из геологических резервуаров	5.14
Таблица 5.4	Обзорная таблица: обзор улавливания, транспортировки и впрыскивания CO ₂ и CO ₂ , помещаемого на длительное хранение	5.22
Таблица А 5.1	Потенциальные технологии подпочвенного мониторинга и их вероятные способы применения.....	5.27
Таблица А 5.2	Потенциальные технологии подпочвенного мониторинга и их вероятные способы применения.....	5.29
Таблица А 5.3	Технологии определения потоков газа из почвы или воды в атмосферу и возможные способы применения	5.30
Таблица А 5.4	Технологии выявления повышения уровня содержания CO ₂ в воде и почве (выявление утечек)	5.31
Таблица А 5.5	Косвенные измерения для выявления утечек из геологических хранилищ CO ₂	5.32
Таблица А 5.6	Технологии мониторинга уровней CO ₂ в морской воде и способы их возможного применения.....	5.33

Блок

Блок 5.1	Расчет коэффициентов по умолчанию для трубопроводной транспортировки CO ₂	5.11
----------	--	------

5 ТРАНСПОРТИРОВКА, ВПРЫСКИВАНИЕ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ХРАНЕНИЕ ДВУОКИСИ УГЛЕРОДА (УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА)

5.1 ВВЕДЕНИЕ

Улавливание углекислого газа (CO_2) и его хранение (УХУГ) являются дополнительными вопросами из подборки действий, которые можно использовать для снижения выбросов газов при продолжительном использовании ископаемых видов топлива.

В простейшем виде процессы УХУГ представляют собой цепь, состоящую из трех основных этапов: Улавливание и сжатие CO_2 (обычно, на крупных промышленных сооружениях¹), транспортировка его до места хранения и долгосрочная изоляция от атмосферы. МГЭИК (2005) разработал «Специальный доклад об улавливании и хранении углекислого газа» (СДУХУГ), в котором приведена дополнительная информация о УХУГ. Материал данных Руководящих принципов разработан с помощью консультации с авторами СДУХУГ.

Геологическое хранение может происходить в подземных резервуарах, таких как нефтяные и газовые месторождения, угольных пластах и минерализованных водных формациях с использованием природных геологических барьеров для изоляции CO_2 от атмосферы. Описание соответствующих процессов хранения приводится в главе 5 СДУХУГ. Геологическое хранилище CO_2 может располагаться в местах, предназначенных только для хранения CO_2 , либо соседствовать с добычей нефти или газа или угольного метана вторичным методом (ПНП, ППП и РМУП соответственно).

В настоящих Руководящих принципах представлено только руководство по оценке выбросов при транспортировке, впрыскивании и геологическом хранении углекислого газа (УГХУГ). Методов оценки выбросов от любых других видов хранения, таких как океаническое хранение или преобразование CO_2 в инертные неорганические карбонаты не приводится. За исключением минеральной карбонизации некоторых отходов, данные технологии находятся скорее на стадии разработки, чем на стадии демонстрации и технической реализации МГЭИК (2003). Если (и когда) они достигнут более поздних стадий развития, руководящие указания по составлению кадастров выбросов в результате этих технологий могут быть даны в будущих редакциях Руководящих принципов.

Выбросы, происходящие от использования ископаемых видов топлива, используемых для улавливания, сжатия, транспортировки и впрыскивания CO_2 , в данной главе не описываются. Эти выбросы включены и описаны в национальном кадастре как энергетическое использование в соответствующих категориях мобильного или стационарного использования энергии. Использование топлива судами, участвующими в международных перевозках, исключается, где это необходимо по правилам бункеровки, независимо от груза, и нежелательно распространять бункерные запасы на выбросы от использования энергии на действующих трубопроводах.

5.2 ОБЩИЙ ОБЗОР

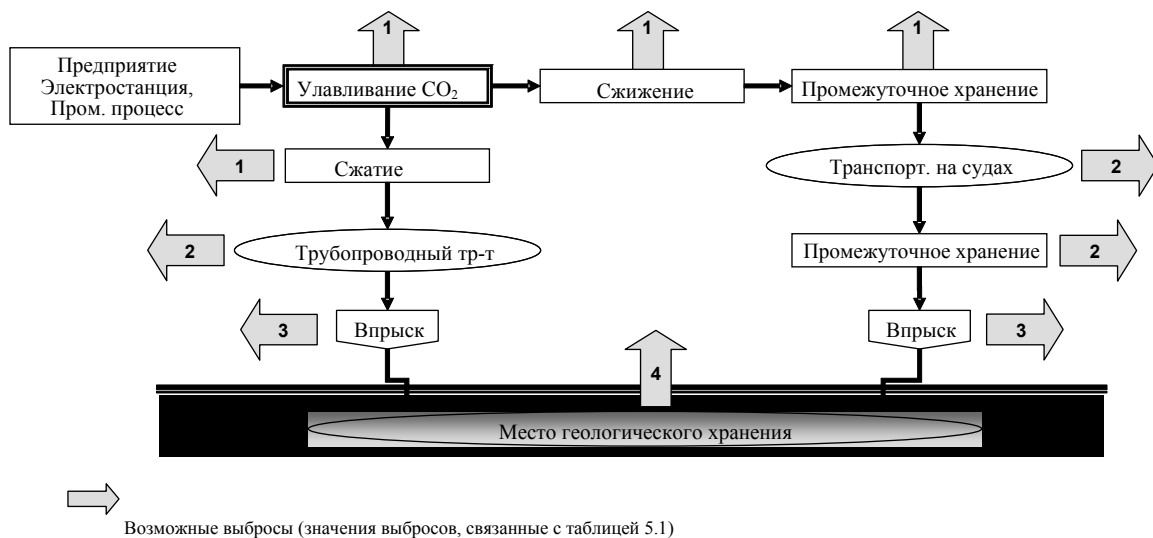
В настоящих Руководящих принципах цепь улавливания и геологического хранения CO_2 подразделяется на четыре системы (рисунок 5.1).

1. Система улавливания и сжатия. Рамки системы включают улавливание, сжатие и, если необходимо, доведение до необходимого для транспортировки состояния.
2. Система транспортировки. Трубопроводы и суда, признанные наиболее подходящими для транспортировки больших объемов CO_2 . Верхними границами системы являются патрубки предприятий по сжатию / доведению до нужного состояния в системе сжатия и улавливания. Нижними рамками системы являются нагнетательные патрубки транспортного трубопровода, либо системы разгрузки судов. Следует отметить, что могут существовать компрессорные станции, расположенные в трубопроводных системах, и являющиеся дополнительными к любым видам компрессии по системе 1 или 3.

¹ Примеры больших точечных источников CO_2 , где возможно улавливание, включают выработку электроэнергии, производство чугуна и стали, обработку природного газа, производство цемента, аммиака, водорода и этанола.

3. Система впрыска. Система впрыска включает наземные объекты на месте впрыска, например, хранилища, распределительную магистраль на конце транспортного трубопровода, распределительные трубопроводы к скважинам, дополнительные компрессорные средства, системы измерений и контроля, устье/устья скважин и скважины впрыска. Верхними рамками систем являются нагнетательные патрубки транспортного трубопровода, либо системы разгрузки судов. Нижними границами систем являются геологические резервуары-хранилища.
4. Система хранения. Системой хранения является геологический резервуар-хранилище.

Рисунок 5.1 Схематическое представление процесса улавливания и хранения углерода с нумерацией, указывающей на рассматриваемые выше системы.



В данную главу не включено руководство по улавливанию и сжатию CO_2 . Краткая сводка и информация о том, где можно найти руководство по оценке выбросов CO_2 при улавливании и сжатии может быть найдена в разделе 5.3. Руководящие указания по составлению кадастров выбросов из систем транспортировки, впрыска и хранения CO_2 цепочки УГХУГ изложены соответственно в разделах 5.4, 5.5 и 5.6 данной главы. Летучие выбросы от наземных объектов на местах использования процессов ПНП, ППП и РМУП (с хранением CO_2 или без него) классифицируются как нефтяные и газовые операции, и в главе 4 тома 2 приводятся руководящие указания по оценке этих выбросов. Выбросы из подземных резервуаров на местах использования процессов ПНП, ППП и РМУП классифицируются как выбросы от мест геологического хранения, и в разделе 5.7 данной главы приводится руководство по оценке этих выбросов.

В таблице 5.1 показаны категории, к которым относятся выбросы от систем транспортировки, впрыскивания и хранения CO_2 .

5.3 УЛАВЛИВАНИЕ CO_2

Антропогенные выбросы углекислого газа, в основном, происходят от сжигания ископаемых видов топлива (и биомассы) в секторах выработки энергии, строительства и транспорта. Также CO_2 высвобождается из иных источников, чем сжигание, при некоторых промышленных процессах, таких, как производство цемента, обработка природного газа и производство водорода.

При улавливании CO_2 производится концентрированный поток CO_2 под высоким давлением, этот поток может быть транспортирован для хранения к местам хранения. В данном руководстве, границы систем улавливания включают сжатие и дегидратация, либо иные мероприятия по подготовке CO_2 , имеющие место перед транспортировкой.

Электростанции и прочие крупные промышленные объекты являются первыми кандидатами на улавливание CO_2 , несмотря на высокую чистоту потоков CO_2 , отделенных от природного газа в газоперерабатывающей промышленности, которые могут быть уловлены и направлены на хранение к

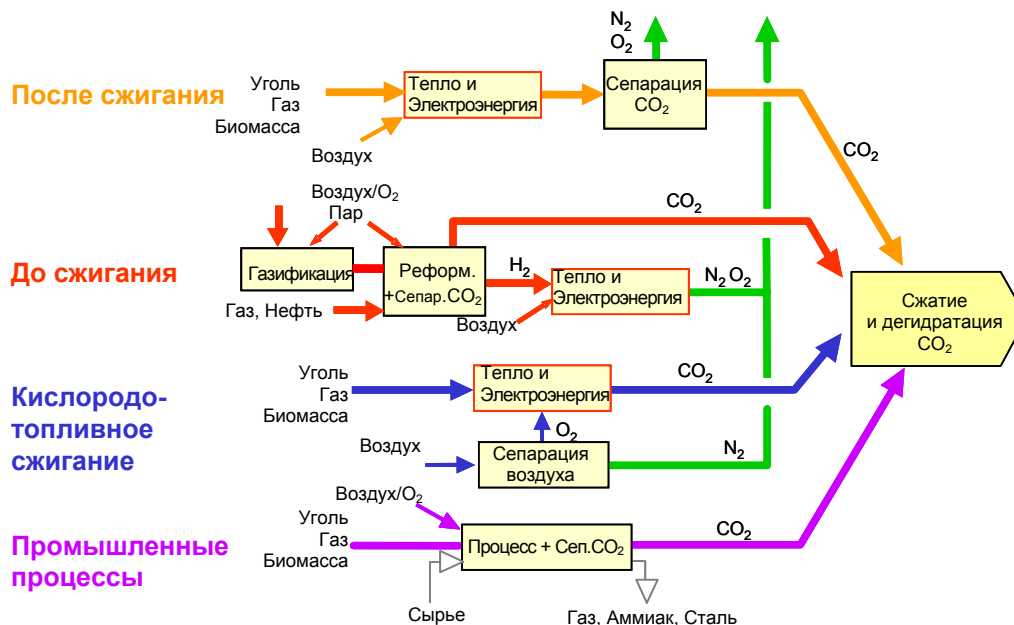
настоящему времени. Доступная технология в целом применяется таким способом, при котором улавливается около 85-95 процентов обрабатываемого CO_2 на улавливающих установках, МГЭИК (2005). На рисунке 5.2, взятом из СДУХУГ, показан обзор соответствующих процессов. Основные технологии кратко описаны ниже. Дополнительные детали приведены в главе 3 СДУХУГ.

- Улавливание после сжигания: CO_2 может быть отделен от дымовых газов сжигательных установок или из от потоков природного газа и подан на устройства сжатия и дегидратации для достижения относительной чистоты и сухости потока CO_2 в транспортной системе. Эти системы обычно используют для CO_2 жидкий раствор.
- Улавливание перед сжиганием: включает взаимодействие топлива с кислородом или воздухом и/или паром для получения «синтез-газа» или «топливного газа», состоящего в основном из монооксида углерода и водорода. Монооксид углерода взаимодействует с паром в каталитическом реакторе, называемом «конвертер сдвига», в результате получается CO_2 и некоторое количество водорода. Далее CO_2 отделяется от смеси газов, обычно, при помощи процесса химической или физической абсорбции, что дает в результате богатое водородом топливо, которое можно использовать многими способами, например, в бойлерах, топках, газовых турбинах и топливных элементах. Эта технология широко используется при производстве водорода, который используется в основном при производстве аммиака и удобрений, а также в операциях по переработке нефти. Руководящие указания по оценке и регистрации выбросов в результате данного процесса приводятся в разделе 2.3.4 главы 2 настоящего тома.
- Кислородотопливное улавливание: При кислородном сжигании топлива, почти чистый кислород используется при сжигании вместо воздуха, что дает в результате отходящий газ, состоящий в основном из CO_2 и H_2O . Поток отходящего газа может быть прямо направлен в блоки сжатия и дегидратации CO_2 . Эта технология находится на стадии демонстрации. Руководящие указания по оценке и регистрации выбросов в результате данного процесса приводятся в разделе 2.3.4 главы 2 данного тома.

ТАБЛИЦА 5.1
КАТЕГОРИИ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ УХУГ

1	C			Транспортировка и хранение углекислого газа	Улавливание и хранение углекислого газа (УХУГ) означает улавливание CO ₂ , его транспортировку до места хранения и длительную изоляцию от атмосферы. Выбросы, связанные с транспортировкой, впрыскиванием и хранением CO ₂ относятся к категории 1С. Выбросы (и сокращения), связанные с улавливанием CO ₂ следует учитывать в том секторе МГЭИК, в котором это улавливание имеет место (например, «Стационарное сжигание топлива» или «Промышленная деятельность»).
1	C	1		Транспортировка CO ₂	Летучие выбросы от систем, используемых для транспортировки уловленного CO ₂ от источника до места впрыскивания. Эти выбросы могут включать в себя летучие потери из-за протечек оборудования, удаления газов и выбросов вследствие разрывов трубопроводов или прочих случаев случайного высвобождения (например, при временном хранении).
1	C	1	a	Трубопроводы	Летучие выбросы от трубопроводных систем, используемых для транспортировки CO ₂ от источника до места впрыскивания.
1	C	1	b	Суда	Летучие выбросы от водного транспорта, используемого для транспортировки CO ₂ от источника до места впрыскивания.
1	C	1	c	Другое (указать)	Летучие выбросы из других систем, используемых для транспортировки CO ₂ до места впрыскивания и временного хранения.
1	C	2		Впрыскивание и хранение	Летучие выбросы от деятельности и оборудования на месте впрыскивания и вследствие нарушения герметичности хранилища CO ₂ .
1	C	2	a	Впрыскивание	Летучие выбросы от деятельности и оборудования на месте впрыскивания.
1	C	2	b	Хранение	Летучие выбросы от нарушения герметичности хранилища CO ₂ .
1	C	3		Прочее	Любые другие выбросы из УХУГ, не обозначенные более нигде.

Рисунок 5.2 Системы улавливания CO₂ (по СДУХУГ):



Как уже было упомянуто, для многих промышленных процессов, химические реакции приводят к образованию CO₂ в количествах и концентрациях, позволяющих использовать прямое улавливание или сепарацию CO₂ из отходящих газов, например: производство аммиака, цементное производство, производство этанола, водорода, чугуна и стали, а также заводы по переработке природного газа.

Местоположение нормативов для составителей кадастра выбросов от систем улавливания и сжатия CO₂ зависит от природы источника CO₂:

- Системы стационарного сжигания (в основном установки по производству электрической энергии и тепла): Том 2, глава 2, раздел 2.3.4.
- Заводы по обработке природного газа: Том 2, глава 2, раздел 4.2.1.
- Заводы по производству водорода: Том 2, раздел 4.2.1.
- Улавливание при прочих промышленных процессах: Том 3 (ППИП), глава 1, раздел 1.2.2 и отдельно для:
 - (i) Производства цемента: Том 2 ППИП, раздел 2.2.
 - (ii) Производства метанола Том ППИП, раздел 3.9.
 - (iii) Производства азотной кислоты: Том ППИП, раздел 3.2.
 - (iv) Производства чугуна и стали: Том ППИП, раздел 4.2.

Выбросы от систем улавливания и сжатия могут быть отрицательными, если CO₂, производимый при сжигании биомассы, улавливается. Это является правильной процедурой, и отрицательные выбросы следует регистрировать как таковые.

Хотя многие потенциальные пути выбросов стандартны для всех видов геологических хранилищ, некоторые из путей выбросов для улучшенных операций извлечения сжиженных нефтепродуктов отличаются от таковых для геологических хранилищ CO₂ без улучшенного извлечения сжиженных нефтепродуктов. В операциях ПНП CO₂ впрыскивается в нефтяной резервуар, но пропорция впрыснутого количества обычно производится вместе с нефтью, газообразными углеводородами и водой в добывающей скважине. Смесь CO₂-углеводороды отделяется от сырой нефти и может быть повторно впрыснута в нефтяной резервуар, использован в качестве газообразного топлива на месте или перемещена на завод по обработке газов для разделения CO₂ и углеводородов, в зависимости от содержания углеводородов. При процессах ПГП и РМУП пытаются избежать образования CO₂, так как выделение CO₂ из смеси производимых газов – довольно дорогое дело. CO₂, отделенный от углеводородного газа может быть использован повторно и впрыснут при операциях ПНП, либо выпущен в атмосферу, в зависимости от экономики повторного использования относительно импортирования CO₂ для впрыска. Богатый CO₂ газ также высвобождается при операциях ПНП из резервуаров для хранения сырой нефти. Эти испарения могут быть высвобождены в атмосферу, сожжены в факелах или использованы в качестве газообразного топлива в зависимости от содержания углеводородов. Таким образом, существуют возможности для дополнительных источников летучих выбросов при высвобождении, сжигании в факелах или просто сжигании богатых CO₂ углеводородных газов, а также от впрыснутого CO₂ с углеводородами в качестве добавки. Эти выбросы, вместе с летучими выбросами от наземных операций в местах применения ПНП, ПГП и РМУП (выбросы от впрыскивания CO₂ и/или его производства, рециклинга, высвобождения, факельного или обычного сжигания углеводородных газов со значительным содержанием CO₂), и включая весь экспортированный впрыснутый CO₂ с углеводородами, могут быть оценены и зарегистрированы с помощью высших методов, описанных в главе 4 тома 2.

5.4 ТРАНСПОРТИРОВКА CO₂

Выбросы могут возникать от поврежденного трубопровода, заглушек и вентилях, промежуточных компрессорных станций газопроводов, оборудования для промежуточного хранения, судов, перевозящих сжиженный охлажденный CO₂, и объектов для погрузки и отгрузки судов. Выбросы от транспортировки уловленного CO₂ относятся к категории 1С (см. Таблицу 5.1). Трубопроводы для CO₂ являются самыми распространенными средствами массовой транспортировки CO₂, а также зрелыми рыночными используемыми технологиями. Массовая транспортировка CO₂ при помощи судов также имеет место, хотя и в относительно меньших масштабах. Она осуществляется в изолированных контейнерах, при температурах значительно ниже температуры окружающей среды и при значительно меньшем давлении, чем в трубопроводах. Транспортировка с помощью автотранспорта и железнодорожного транспорта возможна только для небольших количеств CO₂, она не является значительной для УХУГ, из-за необходимости улавливать большие количества CO₂. Поэтому описание методов подсчета выбросов от автомобильного и железнодорожного транспорта здесь не приводится. Дополнительная информация о транспортировке CO₂ приведена в главе 4 СДУХУГ (МГЭИК 2005).

5.4.1 Транспортировка CO₂ с помощью трубопровода

Для оценки выбросов от трубопроводной транспортировки CO₂ можно рассчитать коэффициенты выбросов по умолчанию из коэффициентов выбросов для транспортировки (трубопроводной) природного газа, приведенных в разделе 4.2 данного тома. Коэффициенты выбросов уровня 1 для трубопроводной транспортировки природного газа, приведенные в таблицах 4.2.4 и 4.2.5, приводятся на основе количества главным образом потому, что длина трубопровода не является общедоступной национальной статистикой. Однако летучие выбросы от трубопроводного транспорта в целом не зависят от пропускной способности, зато зависят от размера и оборудования, устанавливаемого в трубопроводных системах. Поскольку предполагается, что существует связь между размерами систем и используемым природным газом, такой подход вполне приемлем для метода уровня 1 для транспортировки природного газа.

Вышеизложенное может быть верно и для перевозки CO_2 при осуществлении УХУГ. Поскольку *эффективная практика* предполагает как улавливание, так и хранение на заводах или иных объектах, длина трубопроводной системы транспортировки CO_2 известна и должна использоваться для оценки выбросов от транспорта.

Блок 5.1

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПО УМОЛЧАНИЮ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКИ CO_2

Падение давления газа по причине геометрии описывается следующим образом:

$$\Delta P = \frac{f}{2} \rho * v^2 \frac{l}{D}$$

где

- v – это линейная скорость газа, высвобождающегося через протечки и, при том же размере протечек, являющаяся пропорциональной высвобождающимся объемам;
- ρ – плотность газа;
- f – безразмерный коэффициент трения
- l/D (длина, поделенная на диаметр) характеризует физический размер системы.

Для протечек, $f = 1$ независимо от природы газа. Таким образом, допускаем, что внутреннее давление трубопровода и его габариты одинаковы как для транспортировки CO_2 , так и для CH_4 , скорость утечки обратно пропорциональна исходной плотности газа и, следовательно, пропорциональна исходной молекулярной массе.

Таким образом, ΔP одинаково как для метана, так и для углекислого газа

$$v \sim \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$

Молекулярная масса CO_2 равна 44, а CH_4 – 16. Следовательно, интенсивность выбросов CO_2 по весовой базе оценивается по отношению к интенсивности выбросов CH_4 следующим образом: $\sqrt{\frac{44}{16}} = 1,66$.

Из этих коэффициентов выбросов CO_2 по умолчанию для трубопроводного транспорта получены путем умножения соответствующих коэффициентов выбросов по умолчанию^a из таблицы 4.2.8 для природного газа (в основном CH_4), с применением коэффициента 1,66.

Примечания:

^a для преобразования выраженных коэффициентов из м^3 в единицы массы, для метана используется особое значение массы $\text{кг}/\text{м}^3$.

См. главу 5: R.H. Perry, D. Green, *Perry's chemical engineers handbook*, 6th edition, McGraw Hill Book Company - New York, 1984.

В таблице 4.2.8 в разделе 4.2 данного тома приводятся показательные коэффициенты протечки для систем транспортировки природного газа. Для получения коэффициентов выбросов по умолчанию для трубопроводной транспортировки CO_2 эти значения следует преобразовать из кубических метров в единицы массы и умножить на 1,66 (см. блок 1).

ТАБЛИЦА 5.2					
КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЫБРОСОВ УРОВНЯ 1 ПО УМОЛЧАНИЮ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА CO₂ ОТ МЕСТА УЛАВЛИВАНИЯ CO₂ ДО МЕСТА ЕГО ОКОНЧАТЕЛЬНОГО ХРАНЕНИЯ					
Источник выбросов	Значение			Неопределенность	Единицы измерения
	Нижнее	Среднее	Верхнее		
Летучие выбросы при транспортировке CO ₂ по трубопроводу	0,00014	0,0014	0,014	± множитель 2	Гг в год на километр трубопровода

Хотя утечки выбросов в области трубопроводного транспорта являются независимыми от пропускной способности, количество протечек не обязательно коррелирует с длиной трубопровода. Лучшей корреляцией будет корреляция между количеством и видами компонентов оборудования и видом техобслуживания. Большая часть оборудования, как правило, имеет тенденцию находиться на объектах, связанных с трубопроводом, а не на трубопроводах самих по себе. По сути дела, если CO₂ в настоящее время транспортируется на очень большие расстояния и требуются промежуточные компрессорные станции, практически все летучие утечки из системы УХУГ будут ассоциироваться с первоначальным оборудованием для улавливания и сжатия CO₂ в начале трубопровода, и оборудованием впрыска в конце газопровода, с практически отсутствующими выбросами из трубопровода самого по себе. Для подхода уровня 3, выбросов от утечек из транспортного трубопровода могут быть получены из данных о количестве и типах оборудования и коэффициентов выбросов, зависящих от оборудования.

5.4.2 Транспортировка CO₂ с помощью судов

Коэффициенты выбросов по умолчанию для летучих выбросов CO₂ от транспортировки судами отсутствуют. Объемы газа необходимо измерять в ходе погрузки и разгрузки с использованием измерения параметров потока и относить потери к летучим выбросам CO₂ в результате транспортировке судами под категорией 1C1 b.

5.4.3 Оборудование для промежуточного хранения вдоль маршрутов транспортировки CO₂

Если существуют временные несоответствия между поставками и транспортировкой или вместимостью хранилища, буфера для CO₂ (надземного или подземного) могут понадобиться для временного хранения CO₂. Если буфер является цистерной, летучие выбросы следует оценивать и рассматривать в качестве составной части транспортной системы и относить к категории 1C1 (прочее). Если промежуточное хранилище (или буфер), является геологическим резервуаром, летучие выбросы из него могут рассматриваться так же, как и для любых других геологических хранилищ (см. раздел 5.6 настоящей главы) и относиться к категории 1C3.

5.5 ВПРЫСК CO₂

Система впрыска включает наземные объекты на месте впрыска, например, хранилища, распределительную магистраль на конце транспортного трубопровода, распределительные трубопроводы к скважинам, дополнительные компрессорные средства, системы измерений и контроля, устье/устья скважин и скважины впрыска. Дополнительная информация о скважинах впрыска может быть найдена в разделе 5.5 главы 5 СДУХУГ.

Счетчики на устье скважины измеряют скорость потока, температуру и давление впрыскиваемого вещества. Также, устье скважины оборудовано системами безопасности для предотвращения выбросов впрыскиваемого вещества. Системы безопасности, такие как скважинный предохранительный клапан или контрольный клапан, могут быть также включены ниже уровня земли, для предотвращения обратного потока в случае отказа оборудования на поверхности. Клапаны и прокладки могут быть повреждены сверхкритическим CO₂, поэтому следует выбирать соответствующие материалы. Углеродистая сталь и обычные цементы могут подлежать разрушению чрезвычайно соленых растворов и мощными потоками CO₂ (Schereg и др. 2005). Кроме того, целостность нагнетательных скважин для CO₂ необходимо поддерживать в течение весьма длительного времени, так что необходимо соблюдать требования к строительным материалам. Цементы, используемые для герметизации между скважиной и

горной породой и, после ликвидации скважины, для ее закупорки, должны быть также более устойчивы к CO_2 /солевым растворам в долгосрочном плане. Такие цементы уже разработаны, но нуждаются в дальнейшем тестировании. Из-за потенциальной возможности для скважин служить в качестве каналов утечки CO_2 обратно в атмосферу, они должны контролироваться в рамках всеобъемлющего плана мониторинга, как изложено в разделе 5.7 настоящей главы.

Количество CO_2 , впрыснутого в геологическое образование с помощью скважины, можно контролировать с помощью оборудования на устье скважины, до поступления его в скважину. Типичный метод описывается Wright и Majek (1998). Счетчики на устье скважины непрерывно измеряют давление, температуру и расход нагнетаемого газа. Для состава, импортируемого CO_2 , обычно характерны незначительные колебания, поэтому он периодически анализируется с помощью газового хроматографа. Масса CO_2 , проходящего через устье скважины, может быть рассчитана на основе измеренных количеств. Метод умолчания не предлагается и отчетность о массе закачанного CO_2 , рассчитывается на основе прямых измерений - это считается *эффективной практикой*.

Если давление, поступающее в хранилище CO_2 , является не таким высоким, насколько это необходимо для впрыска, требуется сжатие. Любые выбросы от сжатия хранящегося в хранилище газа должны быть измерены и учтены.

5.6 ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ХРАНЕНИЕ CO_2

Глава 5 СДУХУГ (МГЭИК 2005) показывает, что геологическое хранение углекислого газа может иметь место как на берегу, так и в открытом море, в:

- **Глубоких соленосных образования.** Это пористые и проницаемые каменные резервуары, содержащие в порах соленую воду.
- **Истощенных или частично истощенных нефтяных месторождениях,** в рамках либо вне рамок, операций по повышению нефтеотдачи пластов (ПНП).
- **Истощенных или частично истощенных газовых месторождениях,** в рамках либо вне рамок, операций по повышению газоотдачи пластов (ПГП).
- **Угольных пластах** – с операциями по рекуперации метана из угольных пластов (РМУП) либо без них.

Кроме того, отдельные возможности для хранения могут существовать в рамках иных концепций, таких, как хранение в соляных, базальтовых формациях и органически богатых сланцах.

Дополнительную информацию об этих видах хранения и механизмах улавливания CO_2 можно найти в главе 5 СДУХУГ (МГЭИК, 2005).

5.6.1 Описание путей/источников выбросов

Во введении в СДУХУГ говорится, что $> 99\%$ CO_2 , хранящегося в геологических резервуарах, вероятно, будет оставаться там более тысячи лет. Поэтому потенциальные пути выбросов, созданные или появившиеся в ходе медленных или долгосрочных процессов необходимо рассматривать, как и те, которые могут действовать в краткосрочной и среднесрочной перспективе (от десятилетий до столетий).

В настоящих руководящих принципах термин «миграции» определяется как перемещение CO_2 в пределах и из геологического хранилища, остающегося ниже земной поверхности и морского дна, а термин «утечка» определяется как передача CO_2 из-под поверхности земли или морского дна в атмосферу или океан.

Пути выбросов, которые необходимо учитывать в отчетности, являются утечками CO_2 с поверхности или морского дна из геологических хранилищ². Потенциальные пути выбросов из резервуаров хранения показаны в таблице 5.3.

Существует вероятность того, что выбросы метана, а также выбросы CO_2 , могут возникнуть из-за геологических хранилищ, содержащих углеводороды. Хотя нет достаточной информации, для того, чтобы обеспечить основу для оценки выбросов метана, было бы *эффективной практикой* делать соответствующие оценки потенциальных выбросов метана от таких резервуаров и, в случае необходимости, включать любые такие выбросы, связанные с хранением CO_2 , в кадастр.

² Выбросы CO_2 могут происходить в виде свободного газа, растворенного в подземных водах, достигающих поверхности, например, в виде ручьев.

ТАБЛИЦА 5.3
ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПУТИ ВЫБРОСОВ ИЗ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ

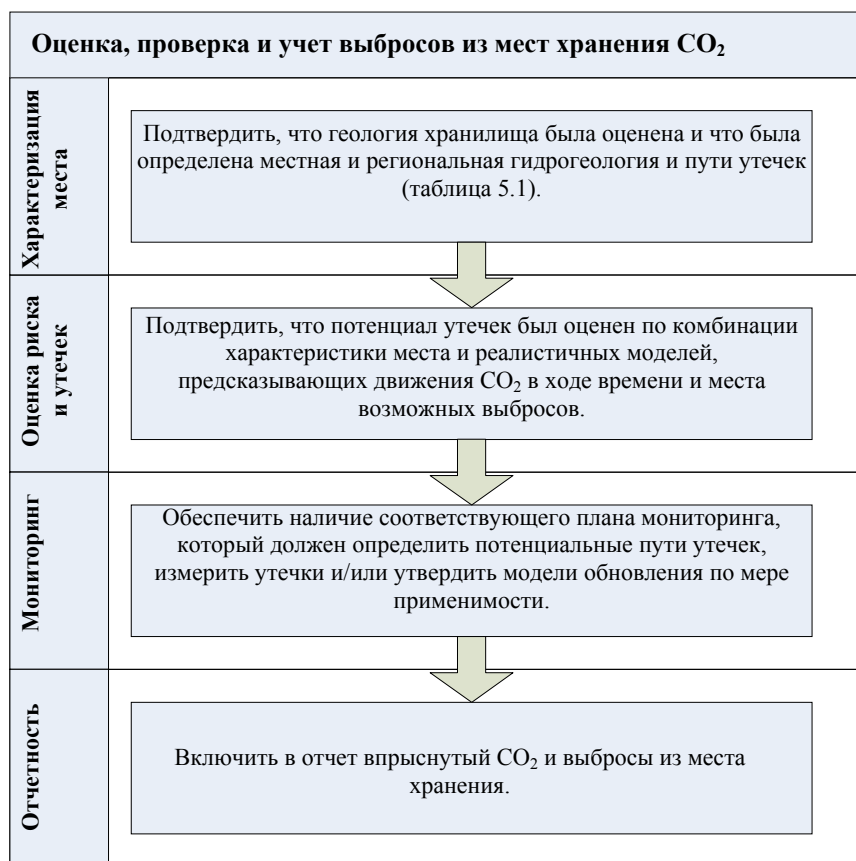
Вид выбросов	Потенциальные пути/источники выбросов	Дополнительные комментарии
Пути прямой утечки из скважин и месторождений	<ul style="list-style-type: none"> • Функционирующие или заброшенные скважины 	<ul style="list-style-type: none"> • Ожидается, что будут приложены все усилия для выявления заброшенных скважин в районе хранения. Неправильно сконструированные, закупоренные и/или работающие скважины могут представлять собой источники серьезного потенциального риска утечки. Методы устранения утечек из скважин уже разработаны и, в случае необходимости, должны применяться.
	<ul style="list-style-type: none"> • Выбросы из скважин (неконтролируемые выбросы из скважин впрыска) 	<ul style="list-style-type: none"> • Возможный источник высокопоточных утечек, обычно в течение короткого промежутка времени. Выбросы подлежат ремедиации и, скорее всего, возникают редко, так как принятая практика бурения снижает риск.
	<ul style="list-style-type: none"> • Будущие резервуары для CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • Вопрос о будущих резервуарах в угольных пластах
Естественные пути утечки и миграции (могущие со временем привести к выбросам)	<ul style="list-style-type: none"> • Через поровую систему в породах с низкой проницаемостью, если входное давление капилляров превышает установленные пределы или CO₂ поступает в виде раствора 	<ul style="list-style-type: none"> • Надлежащая характеристика хранилища и отбор, а также контролируемое давление впрыска может снизить риск утечки
	<ul style="list-style-type: none"> • Если перекрывающая горная порода в данном месте отсутствует 	<ul style="list-style-type: none"> • Надлежащая характеристика хранилища и отбор могут снизить риск утечки
	<ul style="list-style-type: none"> • Через точки выбросов, если резервуар переполнен 	<ul style="list-style-type: none"> • Надлежащая характеристика хранилища и отбор, включая оценку гидрогеологии, могут снизить риск утечки
	<ul style="list-style-type: none"> • Через разрушающиеся перекрывающие породы в результате реакций CO₂/поды/пород 	<ul style="list-style-type: none"> • Надлежащая характеристика хранилища и могут снизить риск утечки. Подробная оценка перекрывающих пород и правильные геохимические коэффициенты могут оказаться полезными
	<ul style="list-style-type: none"> • При растворении CO₂ в поровых жидкостях и последующем перемещении из хранилища естественными потоками 	<ul style="list-style-type: none"> • Надлежащая характеристика хранилища и отбор, включая оценку гидрогеологии, могут выявить/снизить риск утечки.
	<ul style="list-style-type: none"> • Через естественные или искусственные дефекты и/или трещины 	<ul style="list-style-type: none"> • Возможный источник высокопоточных утечек. Надлежащая характеристика хранилища и отбор, а также контролируемое давление впрыска могут снизить риск утечки.
Прочие летучие выбросы из района расположения геологического хранилища	<ul style="list-style-type: none"> • Летучие выбросы метана могут произойти в результате вымещения в геологических хранилищах метана углекислым газом. Это особенно касается РМУП, ПНП и истощенных газовых и нефтяных резервуаров 	Требуется правильная оценка

5.7 МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Геологические условия разнообразны и в настоящее время существует лишь несколько опубликованных исследований о программах мониторинга, которые выявляют и количественно оценивают антропогенные летучие выбросов диоксида серы от операций по геологическому хранению (Arts и др. 2003, Wilson и Monea 2005; Klusman 2003a, b, c). Хотя резюме для директивных органов СДУХУГ показывает, что правильно выбранные геологические хранилища могут сохранить более чем 99 процентов CO_2 на протяжении более чем 1000 лет и могут удерживать его до миллионов лет, на момент написания, небольшое число контролируемых хранилищ означает, что нет достаточных эмпирических данных для получения коэффициентов выбросов, которые могут применяться для утечек из геологических хранилищ. Следовательно, в данное руководство не включены методологии уровней 1 и 2. Однако, существует возможность разработки таких методик в будущем, когда на протяжении длительного времени будет находиться в эксплуатации большее количество хранилищ (Yoshigahara и др. 2005). Однако зависящий от места подход уровня 3 уже может быть разработан. Технологии мониторинга были разработаны и совершенствовались на протяжении последних 30 лет для нефти и газа, подземных вод и мониторинга окружающей среды (также см. приложение 1). Пригодность и эффективность этих технологий в значительной степени зависят от геологии и потенциальных путей выбросов на отдельных хранилищах, так что выбор технологий мониторинга надо будет делать на месте, по принципу «от точки к точке». Технологии мониторинга стремительно совершенствуются, и *эффективная практика* заключается в том, чтобы не отставать от новых технологий.

Процедуры уровня 3 для оценки и отчетности о выбросах от хранилищ CO_2 кратко резюмируются на рисунке 5.3 и обсуждаются ниже.

Рисунок 5.3 Порядок оценки выбросов из мест хранения CO_2



Для того, чтобы понять судьбу CO_2 , впрыснутого в геологические резервуары в течение длительных сроков, оценки его потенциал выброса обратно в атмосферу или через морское дно через протечки, описанные в таблице 5.3, и измерения всех летучих выбросов, необходимо:

(а) Правильно и досконально характеризовать места геологического хранения и окружающие пласты;

- (b) Моделировать впрыск CO₂ в резервуар хранения и будущее поведение системы хранения;
- (c) Контролировать систему хранения;
- (d) Использовать результаты мониторинга для проверки достоверности и/или обновления моделей систем хранения;

Правильный выбор объектов и определение характеристик может способствовать укреплению достоверности того, что утечки будут минимальными, совершенствованию моделирования и результатов и, в конечном счете, снижению необходимого уровня контроля. Дополнительная информация об определении характеристик места хранения имеется в СДУХУГ и программе R&D Международного энергетического агентства парниковых газов (МЭАПГ 2005).

Технологии мониторинга разрабатывались и совершенствовались на протяжении последних 30 лет для нефти и газа, подземных вод и индустрии экологического мониторинга. Наиболее часто используемыми технологиями являются описанные в таблицах 5.1-5.1 в приложении I к данной главе. Пригодность и эффективность этих технологий в значительной степени зависят от геологии и потенциальных путей выбросов на отдельных хранилищах, так что выбор технологий мониторинга надо будет делать на месте, по принципу «от точки к точке». Технологии мониторинга стремительно совершенствуются, и *эффективная практика* заключается в том, чтобы не отставать от новых технологий.

Доступен ряд инструментов моделирования, некоторые из которых позволяют провести процесс взаимного сопоставления код (Ruess и др. 2004). Все модели приближены и/или не учитывают некоторые процессы, а также допускают упрощение. Более того, их результаты зависят от их внутренних качеств и, особенно, от качества вводимых в них данных. Многие из соответствующих физико-химических факторов (изменение температуры и давления, смешивания нагнетаемого газа с жидкостями, изначально присутствующими в хранилище, тип и интенсивность механизма иммобилизации двуокиси углерода и жидкости сквозь геологическую среду) можно моделировать успешно с помощью инструментов цифрового моделирования, известных как симуляторы резервуара. Они широко используются в нефтяной и газовой промышленности и доказали свою эффективность при прогнозировании перемещения газов и жидкостей, включая CO₂, сквозь геологические формации.

Симуляторы резервуаров могут использоваться для прогнозирования вероятного местонахождения, времени и потока выбросов, что, в свою очередь, может быть проверено с помощью технологий прямого мониторинга. Таким образом, это может быть чрезвычайно полезным методом для оценки риска утечки из хранилища. Однако на настоящее время не существует единой модели, которая может учесть все происходящие процессы в нужном масштабе и детализации. Так, иногда могут потребоваться дополнительные численные методы моделирования для анализа аспектов геологии. Многофазные модели реакции переноса, которые обычно используются для оценки переноса загрязнителей можно использовать для моделирования переноса CO₂ по резервуару и реакций CO₂/вода/камень и потенциальных геомеханических последствий, возможно, необходимо будет рассматривать с использованием геомеханических моделей. Такие модели могут использоваться в сочетании с симуляторами резервуаров или независимо от них.

Цифровое моделирование должно быть подтверждено путем прямых измерений на местах хранения, если это возможно. Эти измерения должны быть получены в результате реализации программы мониторинга, а сопоставления результатов мониторинга с ожидаемыми, используются для улучшения геологической и цифровой модели. Экспертное заключение: необходимо ли для оценки геологического и численного моделирования с целью проверки, являются ли модели хранения и окружающих пород репрезентативными, и дает ли последующее моделирование адекватное прогнозирование эффективности хранилища.

Мониторинг следует проводить согласно плану, как описано ниже. При этом следует учитывать ожидания от моделей, где именно может произойти утечка, а также измерения, произведенные над всей зоной, в которой, скорее всего, будет присутствовать CO₂. Руководители на местах, как правило, отвечают за установку и эксплуатацию технологий мониторинга хранения двуокиси углерода (см. приложение 1). Составителю кадастра необходимо обеспечения наличие достаточного количества информации о каждом хранилище для оценки ежегодных выбросов в соответствии с руководящими указаниями, содержащимися в данной главе. Для оценки составителю кадастра следует создать официальный план для каждого оператора хранилища, что позволит соблюсти требования к годовой отчетности, анализу и проверке зависящих от места данных.

5.7.1 Выбор метода

На время написания, несколько существующих мест хранения CO₂ являлись частью нефтехимического производства и управлялись согласно соответствующим принципам. Например, хранение кислотного газа в западной Канаде должно соответствовать требованиям, связанным с прикладными способами эксплуатации резервуаров для обычной нефти и газа (Vachu и Gunter, 2005). Регулирование развития УХУГ находится на начальных этапах. Пока не существует каких-либо национальных или международных стандартов оценки производительности геологических хранилищ CO₂ и многие страны в настоящее время разрабатывают соответствующие правила для снижения рисков утечки. Демонстрация технологий мониторинга является необходимой частью этого развития (см. приложение 1). Поскольку эти стандарты и нормативные подходы разрабатываются и применяются, они могут быть пригодны для предоставления информации о выбросах с относительной определенностью. Таким образом, в рамках процесса составления годового кадастра, если имеется один или несколько соответствующих руководящих органов, регулирующих улавливание и хранение двуокиси углерода, то составитель кадастра выбросов может получить информацию от этих органов. Если составитель кадастра доверяет этой информации, он/она должен представить подтверждающие документы, объясняющие, каким образом производились оценка или измерения и как эти методы согласуются с практикой МГЭИК. Если таких организаций не существует, *эффективной практикой* для составителя кадастра считается следовать приведенной ниже методологии. В методологии, представленной ниже, классификация объектов, моделирование, оценки риска утечки и мониторинга является обязанностью руководителя проекта хранения и/или соответствующих руководящих органов, которые регулируют улавливание и хранение углекислого газа. Кроме того, менеджер проекта хранения или регулирующий орган могут разработать методики оценки выбросов, которые будут доведены до сведения национальных составителей кадастра как часть ежегодного кадастрового процесса. В обязанности составителя национального кадастра входит запрашивать данные о выбросах и пытаться удостовериться в их достоверности. В случае использования процессов УХУГ, связанных с применением рекуперации РМУП, методологию следует применять как для выявления CO₂, так и для CH₄.

1. Определить и задокументировать все операции по геологическому хранению в пределах компетенции. Составитель кадастра должен вести постоянно обновляемую регистрацию всех операций по геологическому хранению, включая все сведения, необходимые для перекрестных ссылок из этого раздела на другие элементы цепи улавливания и хранения CO₂ для целей ОК/КК, для каждой операции.

- Местоположение хранилища;
- Вид операции (связана или нет с ПНП, ПГП, РМУП);
- Год, в котором начато хранение CO₂.
- Источник(и), годовая масса впрыснутого CO₂ для каждого источника и расчетная общая сумма вещества в хранилище; и
- Связанная с транспортом, впрыском и утилизацией CO₂ инфраструктура, в случае необходимости (т.е. для оборудования для производства и улавливания на месте, технологии впрыскивания и т.д.) и выбросов из них.

Хотя составитель кадастра отвечает лишь за отчетность об эффекте операций в пределах своей юрисдикции, он/она должны регистрировать трансграничную транспортировку CO₂ для перекрестной проверки и для целей ОК/КК (см. раздел 5.9).

2. Определить, является ли отчет о характеристиках каждого места геологического хранения адекватным. Доклад о характеристиках должен выявить и квалифицировать потенциальные пути утечки, такие, как разломы и ранее существовавшие скважины и дать количественную оценку гидрогеологических свойств системы хранения, особенно в отношении миграции CO₂. Отчет о характеристиках должен содержать достаточные данные, представляющие особенности геологической модели объекта и окрестностей. Он также должен включать в себя все данные, необходимые для создания соответствующей цифровой модели объекта и прилегающих районов для ввода их в соответствующий численный симулятор хранилища.

3. Определить, оценил ли оператор места хранения потенциальные утечки. Оператор должен определить вероятные сроки, места и потоки любых летучих выбросов из резервуара хранения, или доказать, что протечки не должны произойти. Следует выполнять краткосрочные моделирования впрыска CO₂, прогнозировать эффективность хранилища с начала впрыска и долгое время после (может

быть, на протяжении десятилетий). Должно выполняться долгосрочное моделирование для прогноза о судьбе CO_2 в течение от столетий до тысячелетий. Должен быть проведен анализ чувствительности с целью оценки диапазона возможных выбросов. При разработке программы мониторинга, которая будет проверять, функционирует ли хранилище так, как ожидалось должны быть использованы модели. Геологическая модель и модель резервуара должны обновляться в последующие годы с учетом всех новых данных и с учетом любых новых объектов или функциональных изменений.

4. Определить, подходит ли план мониторинга для каждого хранилища. План мониторинга каждого объекта должен описывать мероприятия мониторинга, согласующиеся с оценкой утечки и результатов моделирования. Существующие технологии, представленные в приложении 1 могут измерить утечки на поверхность земли или морского дна. СДУХУГ содержит подробную информацию о технологиях мониторинге и подходах (см. приложение 1). В целом программы мониторинга должны включать положения, касающиеся:

- (i) Измерения фоновых потоков CO_2 (и, если необходимо, CH_4) как в хранилище, так и, вероятно, на точках выбросов за пределами хранилища. В геологических хранилищах могут существовать естественные, сезонно изменяющиеся (экологические и/или промышленные) фоновые потоки выбросов до впрыска. Эти фоновые потоки не должны включаться в оценку ежегодных выбросов. См. приложение 1 для информации о потенциальных методах. Рекомендуется изотопный анализ фоновых потоков CO_2 , так как это, вероятно, поможет проводить различия между естественным и впрыскиваемым CO_2 .
- (ii) Последовательного измерения массы впрыскиваемого CO_2 на каждой скважине в период впрыска, см. раздел 5.5 выше.
- (iii) Мониторинга всех выбросов CO_2 от системы впрыска.
- (iv) Мониторинга для определения любых потоков CO_2 (и, если необходимо, CH_4) через морское дно или поверхность земли, включая, в случае необходимости, выбросы через скважины и водные источники, такие, как родники. Следует проводить периодические исследования всего местоположения хранилища, и любых дополнительных области, для которых мониторинг и моделирование предполагает распределение CO_2 , для выявления любых непредвиденных утечек.
- (v) Мониторинга после впрыска: План должен содержать информацию о мониторинге местоположения хранилища после фазы впрыска. При мониторинге после фазы впрыска должны учитываться результаты моделирования распределения CO_2 для обеспечения того, что контрольное оборудование размещено в надлежащих местах и в нужное время. Если подход для CO_2 прогнозирует долгосрочное распределение внутри резервуара и налицо согласованность между моделями распределения CO_2 и измерениями в соответствии с планом мониторинга, может оказаться целесообразным уменьшение частоты (или прекращение) мониторинга. Мониторинг может нуждаться в возобновлении, в случае, если хранилище подвержено непредвиденным событиям, например, сейсмическим.
- (vi) Объединения улучшения методов/технологий мониторинга с течением времени.
- (vii) Периодической проверки оценок выбросов. Необходимая периодичность является функцией проектного решения, применения и раннего выявления потенциального риска. В период впрыска, требуется проверка как минимум каждые пять лет или после значительных изменений в эксплуатации хранилища.

Постоянный контроль над давлением впрыска и периодический мониторинг распространения CO_2 в нижнем горизонте полезны как часть плана мониторинга. Мониторинг давления впрыска необходим для контроля процесса впрыска, например, для предотвращения чрезмерного поровое давление жидкости в резервуаре. Это может дать ценную информацию о характеристиках резервуара и помочь в раннем предупреждении об утечке. Это считается обычной практикой и может являться нормативным требованием к текущим операциям подземного впрыска. Периодический мониторинг распространения CO_2 в нижнем горизонте, непосредственный либо дистанционный, также будет полезен, поскольку он может дать сведения о миграции CO_2 из хранилища и помочь в раннем предупреждении о потенциальных утечках в атмосферу или в морское дно.

5. Произвести сбор и проверку данных об ежегодных выбросах для каждого хранилища: Операторы каждого хранилища должны, на ежегодной основе, представлять составителю кадастра годовые оценки выбросов, которые будут предаваться гласности. Зафиксированные выбросы от хранилища и все утечки могущие происходить внутри или снаружи хранилища в любой год будут выбросами, оцениваемыми как

при моделировании (могут быть равными нулю), подправленными для учета результатов годового мониторинга. В случае внезапного высвобождения, например, при утечке из скважины, количество утекшего CO₂ следует оценивать в кадастре. Для упрощения подсчета для морских геологических хранилищ, утечки в морское дно следует считать выбросами в атмосферу для целей составления кадастра. В дополнение к общим годовым выбросам, исходные данные должны включать общее количество впрыснутого CO₂, источник впрыснутого CO₂, сумма нарастающим итогом общего количества CO₂, хранящегося к настоящему моменту, технологии, используемые для оценки выбросов, и любые иные процедуры верификации, предпринятые оператором хранилища в соответствии с планом мониторинга, как показано в вышеприведенных разделах 4(iii) и 4(iv). Для верификации выбросов, составитель кадастра должен запросить и изучить документацию данных мониторинга, включая частоту мониторинга, технологические пределы чувствительности и распределение выбросов, происходящих через различные пути, определенные планом мониторинга, а также любые иные изменения, случившиеся в результате верификации. Если модель, использованная для оценки выбросов в течение года, не включает прямой мониторинг, составитель кадастра должен сравнить смоделированные результаты с самыми последними данными мониторинга. Вышеописанные шаги 2, 3 и 4 должны отражать потенциал и наиболее вероятные временные рамки будущих утечек и необходимость прямого мониторинга.

Общие национальные выбросы от хранилищ углекислого газа будут являться суммой зависящих от хранилища оценок.

УРАВНЕНИЕ 5.1

ОБЩИЕ НАЦИОНАЛЬНЫЕ ВЫБРОСЫ

Общие национальные выбросы от геологических хранилищ углекислого газа = ∑ выбросов углекислого газа из мест хранения

Дальнейшее руководство по учету выбросов, в случаях, когда более чем одна страна участвует в улавливании, хранении и/или выбросах CO₂, приводится в разделе 5.10 (Отчетность и документация).

5.7.2 Выбор коэффициентов выбросов и данных о деятельности

Коэффициенты выбросов для уровней 1 и 2 в настоящий момент недоступны для хранилищ углекислого газа, но могут быть определены в будущем (см. раздел 5.7). Однако в составе части процесса оценки выбросов уровня 3, составитель кадастра должен собрать данные о деятельности от оператора о ежегодном хранении и накоплении CO₂. Эти данные можно легко отследить в момент впрыска в скважину или в смежный трубопровод.

Мониторинг в ранних проектах может помочь получить полезные данные, которые можно использовать для разработки методологий уровней 1 и 2 в будущем. Примеры использования технологий мониторинга приведены в программах мониторинга для проектов добычи нефти вторичными методами на Рэнгли, Колорадо, США (Klusman, 2003a, b, c), Уэйберн, Саскачеван, Канада (Wilson and Monea, 2005) и проект «Слейпнер» по хранению CO₂ в Северное море (Arts и др., 2003; также см. Приложение 5.1). Ни для одного проекта по впрыску CO₂ в мире результаты систематического мониторинга утечек CO₂ пока не опубликованы.

В рамках проекта «Рэнгли» по добыче нефти вторичными методами был начат впрыск CO₂ в резервуар «Вебер Сэнд Юнит» на месторождении Рэнгли в 1986 году. Совокупный объем впрыснутого к 2003 году CO₂ составил примерно 23 миллиона тонн. Использовалась программа мониторинга (Klusman 2003a, b, c), основанная на 41 точке измерения, рассеянной на площади примерно в 78 км². Предварительные фоновые измерения недоступны (для каждого нового места они определяются шагом 4 (i) в плане мониторинга, приведенном выше). На месте предвпрыскового исходного уровня было использовано 15 точек измерений вне контрольной области. Результаты программы мониторинга отражают ежегодные выбросы CO₂ из глубинных источников, равные менее чем 3 800 тонн/год на поверхность месторождения. Скорее всего, это как минимум часть, если не весь поток в результате окисления глубоко расположенного метана, образующегося в нефтяных резервуарах или прилегающих пластах, но возможно, что часть этого потока может оказаться летучими выбросами CO₂, впрыснутого в нефтяной резервуар. Отсутствие предвпрысковых базовых измерений не дает возможности произвести точное определение данного источника.

CO₂ впрыскивался на месторождении Уэйберн (Саскачеван, Канада) для ПНП с сентября 2000 года. Образцы почвенного газа с целью определения подземных концентраций и наличия утечек CO₂ или соответствующих газов-индикаторов из резервуара имели место для трех периодов с июля 2001 года и октября 2003. На настоящее время нет доказательств утечки уловленного CO₂. Однако дальнейший

мониторинг почвенных газов необходим для верификации того, что утечки могут иметь место в будущем, а более детальная работа необходима для понимания случаев изменения содержания почвенного газа и исследования будущих возможных путей утечки газа (Wilson and Monea 2005).

Хранилище CO₂ Слейпнер в Северном море, у берегов Норвегии (Chadwick и др. 2003), с 1996 года заполнялось примерно миллионом тонн CO₂ в год в соленосную формацию «Утсира Сэнд». Общий впрыск CO₂ в 2004 году составил >7 миллионов тонн. Распределение CO₂ под поверхностью отслеживалось по среднему значению с помощью повторяющейся трехмерной сейсморазведки (данные разведки перед впрыском и двух повторных разведок на настоящее время опубликованы) и, уже позднее, с помощью гравитационной сейсморазведки (пока имеются данные только одной сейсморазведки). Результаты трехмерной сейсморазведки свидетельствуют о том, что утечек нет (Arts и др. 2003).

Взяты вместе, эти исследования показывают, что методология уровня 3 может быть применена для того, чтобы поддерживать не только нулевое значение оценки выбросов, но также и для обнаружения утечек, даже на низких уровнях, если они случаются.

Пока было только одно широкомасштабное исследование метана улучшенного угольного пласта (МУУП) с использованием CO₂ в качестве впрыскиваемого вещества; проект «Эллисон» в бассейне Сан-Хуан, США (Reeves, 2005). В ходе проекта «Эллисон» получено достаточно информации, показывающей на то, что CO₂ надежно изолирован в угольных пластах. Давление и данные о составе из 4 скважин впрыска и 15 производственных скважин утечек не показали. Часть CO₂ из производственных скважин была регенерирована после примерно 5 лет. Однако, в целях кадастра, предполагается считать его выбросами (Если он не был отделен от метана угольного пласта и рециркулирован). Мониторинг поверхностных утечек CO₂ или метана не производился.

5.7.3 Полнота

Все выбросы (CO₂ и, если таковое имеет место, CH₄) из хранилищ CO₂ следует включать в кадастр. В случае если имеет место улавливание CO₂ в разных странах на хранилищах CO₂, соответствующим составителям кадастров следует вносить изменения во избежание двойного счета.

Определение характеристик и плана мониторинга должно выявить возможные источники вне хранилища (например, латеральную миграцию, подземные воды и т.п.). В противном случае, должны быть разработана ответная стратегия для мест вне хранилища, основанная на информации из хранилища. Если выбросы были предсказаны и/или случились вне страны, выполняющей операции по хранению (впрыск CO₂), соответствующим составителям кадастров следует вносить взаимные изменения для мониторинга и учета выбросов (см. раздел 5.10 ниже).

Оценки CO₂ растворенного в нефти и высвобожденного в атмосферу в результате поверхностных процессов описываются с помощью методологий для производства нефти и газа. Составитель кадастра должен убедиться в том, что информация об этих выбросах, собранная с мест хранения CO₂ согласуется с оценками по данным категориям источников.

5.7.4 Формирование согласованного временного ряда

Если возможности обнаружения или оборудование для мониторинга со временем улучшаются, или выявлены ранее не учтенные выбросы, либо если обновленные модели подтверждают невыявленные выбросы, а также, если это подтверждает обновленная программа мониторинга, необходим соответствующий пересчет выбросов. Это особенно важно при невысокой в целом точности, связанной с имеющимся оборудованием для мониторинга, даже при использовании наиболее продвинутых, современных технологий. Также важна оценка исходных фоновых потоков и их изменчивости. Для особых хранилищ CO₂ антропогенные выбросы перед впрыском и хранением будут равны нулю. При некоторых операциях по добыче нефти вторичными методами могут существовать антропогенные выбросы перед преобразованием их в CO₂.

5.8 ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Частью *эффективной практики* считается включать оценку неопределенности в методы уровня 3. Неопределенность оценок выбросов будет зависеть от точности технологий мониторинга, использованных для верификации и измерения выбросов и моделирования, использованного для предсказания утечек из хранилища. Понятие процента неопределенности может быть неприменимо для данного сектора, и поэтому могут быть приведены доверительные интервалы и/или кривые вероятности.

Неопределенность в полевых измерениях наиболее важна и зависит от плотности отбора образцов и частоты измерений, она может также определяться использованием стандартных статистических методов.

Эффективная симуляция резервуара должна иметь целью вопросы изменчивости и неопределенности физических характеристик, особенно для коллекторных пород и характеристик жидкостей в резервуаре, потому что модели резервуара созданы для предсказания передвижений жидкостей в долгосрочной перспективе и поэтому геологические резервуары по сути гетерогенны и изменчивы. Неопределенность оценок определяется при моделировании и поэтому зависит от:

- Полноты исходных данных, использованных при оценке хранилища;
- Соответствия между геологической моделью и критическими аспектами геологии хранилища и прилегающих областей, особенно в вопросах возможных путей миграции;

Точность критических данных для модели:

- Ее последовательное цифровое представление по блокам
- Адекватное представление процессов в физико-химической, цифровой и аналитической моделях.

Оценки неопределенности обычно делаются с помощью изменения входных параметров и выполнения множественных симуляций для определения эффекта краткосрочных результатов модели и долгосрочных прогнозов. Неопределенность полевых измерений будет зависеть от плотности отбора образцов и частоты измерений и может определяться с помощью стандартных статистических методов. Если в наличии имеются как оценки модели, так и результаты измерений, лучшие оценки будут делаться с помощью проверки модели и, затем, оценки выбросов с использованием обновленной модели. Множественные выполнения с использованием исторически проверенной модели могут иметь целью определение неопределенности данных оценок. Эти данные могут быть использованы для модификации требований мониторинга (например, добавления новых локаций или технологий, увеличения или снижения частоты) и, в конечном итоге, включают в себя базис для информированного решения списания оборудования.

5.9 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА/КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА (ОК/КК) КАДАСТРА

ОК/КК для системы УХУГ в целом.

Улавливание CO₂ не следует учитывать без связи его с долгосрочным хранением.

Следует проводить проверку того, что масса уловленного CO₂ не превосходит массу хранящегося CO₂ плюс зарегистрированные летучие выбросы за кадастровый год (Таблица 5.4).

К настоящему времени для УХУГ существует ограниченный опыт, но ожидается, что опыт будет расти в течение нескольких последующих лет. Поэтому *эффективная практика* заключается в сравнении методов мониторинга и возможных сценариев утечки для сопоставимых хранилищ на международном уровне. Международное взаимодействие также выгодно при разработке методологий и технологий мониторинга.

ТАБЛИЦА 5.4
ОБЗОРНАЯ ТАБЛИЦА: ОБЗОР УЛАВЛИВАНИЯ, ТРАНСПОРТИРОВКИ И ВПРЫСКИВАНИЯ CO₂
И CO₂, ПОМЕЩАЕМОГО НА ДЛИТЕЛЬНОЕ ХРАНЕНИЕ

Категория	Деятельность		CO ₂ (Гг) ¹
	Источник данных	Ед.	
Общее количество газа, уловленного для хранения (А)	Суммируется по всем соответствующим категориям	Гг	
Общее количество газа, импортированного для хранения (В)	Данные из предприятий трубопроводного транспорта или статистических агентств	Гг	
Общее количество газа, экспортированного для хранения (С)	Данные из предприятий трубопроводного транспорта, или статистических агентств	Гг	
Общее количество CO ₂ , впрыснутого в местах хранения (D)	Данные с мест хранения, предоставленные операторами, как описано в главе 5.	Гг	
Общее количество утечек при транспортировке (E1)	Суммируется по отчетной категории МГЭИК 1 С 1	Гг	
Общее количество утечек при впрыскивании (E2)	Суммируется по отчетной категории МГЭИК 1 С 2 а	Гг	
Общее количество утечек из мест хранения (E3)	Суммируется по отчетной категории МГЭИК 1 С 2 б	Гг	
Всего утечек (E4)	E1 + E2 + E3	Гг	
Улавливание + Импорт (F)	A + B	Гг	
Впрыскивание + Утечки + Экспорт (G)	D + E4 + C	Гг	
Расхождение	F - G	Гг	

¹ После улавливания не определяется какое-либо различие между биогенным углеродом и ископаемым углеродом: выбросы и хранение как одного, так и другого должны быть оценены и внесены в отчет.

В идеале, (Улавливание + Импорт) = (Впрыск + Экспорт + Утечки)

Если (Улавливание + Импорт) < (Впрыск + Экспорт + Утечки), то требуется проверка того, что

Оценка экспорта не завышена

Оценка импорта не занижена

Данные о впрыске CO₂ не включают в себя операции ПНП, не связанные с хранением

Если (Улавливание + Импорт) > (Впрыск + Экспорт + Утечки), то требуется проверка того, что

Оценка экспорта не завышена

Оценка импорта не занижена

CO₂, предназначенный для «долговременного хранения», фактически идет как прочие краткосрочные выбросы от использования (например, производство, ПНП без хранения).

ОК/КК в месте хранения

ОК/КК в месте хранения достигается с помощью регулярных инспекций оборудования мониторинга и инфраструктуры оператором. Оборудование и программы мониторинга являются объектом независимой проверки составителем кадастра и/или органами государственного регулирования.

Все данные, включая отчеты о характеристиках хранилищ, геологические модели, симуляции впрысков CO_2 , прогнозирующее моделирование хранилищ, оценки рисков, планы впрысков, ходатайств о выдаче лицензий и результаты проверок должны сохраняться оператором и направляться составителю кадастра для ОК/КК.

Составитель кадастра должен сравнивать (тестировать) интенсивности протечек данного хранилища с аналогичными хранилищами и объяснять причины расхождений там, где это применимо, соответствующий орган власти может осуществить проверку оценок выбросов и/или плана мониторинга, описанного выше. Если такого органа не существует, оператор хранилища должен сначала предоставить составителю кадастра результаты совместной проверки с компетентной третьей стороной, подтверждающей то, что геологические и цифровые модели репрезентативны, симуляторы хранилища пригодны, моделирование реалистично, а план мониторинга соответствует требованиям. По мере получения этих сведений, оператор хранилища должен сравнить результаты программы мониторинга с прогнозирующими моделями и откорректировать модели, программу мониторинга и/или стратегию впрыска, соответственно. Оператор хранилища должен своевременно информировать составителя кадастра о внесенных изменениях.

5.10 ОТЧЕТНОСТЬ И ДОКУМЕНТАЦИЯ

Руководящие принципы отчетности о выбросах из геологических хранилищ:

Перед началом операций геологического хранения, составитель национального кадастра соответствующей страны должен сохранить и поместить в архив следующее:

- Отчет о методах и результатах определения характеристик хранилища
- Отчет о методах и результатах определения моделирования
- Описание предложенной программы мониторинга, включая соответствующие исходные измерения
- Год, в котором начато или начнется хранение CO_2
- Предложенные источники CO_2 и инфраструктуру, задействованную во всей цепи УХУГ от источника к резервуару

Тот же составитель национального кадастра должен ежегодно получать с каждого хранилища:

- Массу CO_2 , впрыснутого за отчетный год
- Массу CO_2 , хранящегося в течение отчетного года
- Накопительную массу CO_2 в хранилище
- Предложенные источники CO_2 и инфраструктуру, задействованную во всей цепи УХУГ от источника к резервуару
- Отчет, детализирующий обоснование, методологию, частоту мониторинга и результаты программы мониторинга – для включения массы любых летучих выбросов CO_2 и любых иных парниковых газов в атмосферу или морское дно из места хранения за отчетный год
- Отчет о любых поправках, внесенных в моделирование и последнюю модель хранилища, необходимую для освещения результатов мониторинга
- Массу любых летучих выбросов CO_2 и любых иных парниковых газов в атмосферу или морское дно из места хранения за отчетный год
- Описание программ мониторинга и использованных методов мониторинга, частоту мониторинга и его результаты
- Результаты проверки программы мониторинга и методов третьей стороной

Могут возникнуть дополнительные требования к отчетности на уровне проекта, если хранилище является частью схемы выбросов.

Отчетность о международных операциях УХУГ

CO_2 может быть уловлен в одной стране, стране А и экспортирован для хранения в другую страну, страну В. По этому сценарию, страна А должна регистрировать количество уловленного CO_2 , любых выбросов при транспортировке и/или временном хранении в стране А и количество CO_2 ,

экспортированного в страну В. Страна В должна регистрировать количество уловленного CO₂, любых выбросов при транспортировке и/или временном хранении в стране В и все выбросы при впрыске и геологическом хранении CO₂.

Если CO₂ впрыснут в одной стране (стране А), перемещен с места хранения и высвободился в другой стране (стране В) страна А отвечает за отчетность о выбросах из геологического хранилища. Если такие утечки были предвидены на основании характеристик хранилища или моделирования, страна А должна сделать поправки вместе со страной В для обеспечения использования соответствующих стандартов долговременного хранения и мониторинга и/или оценки выбросов (соответствующие регулирующие органы могут обладать соответствующими изменениями для вопросов международного перемещения учетом защиты от подземных вод и/или регенерации газа).

Если более чем одна страна использует общее хранилище, то страна, в которой оно расположено, несет ответственность за отчетность о выбросах из хранилища. Если выбросы происходят за пределами страны, то она остается ответственной за отчетность о таких выбросах как описано выше.

В случае если хранилище расположено в более чем одной стране, страны должны позаботиться об изменениях отчетности в соответствии с долей выбросов, приходящихся на каждую страну.

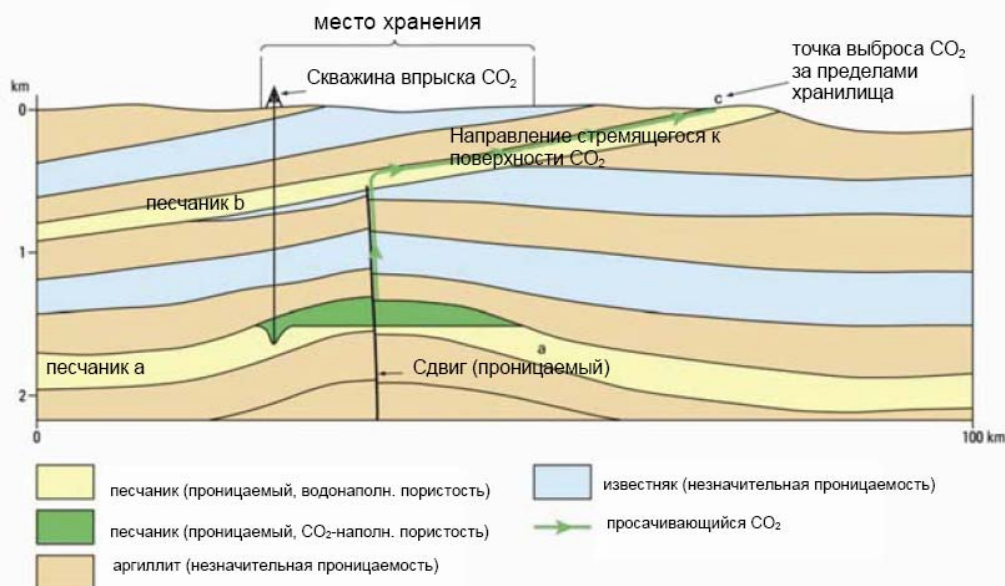
Приложение 5.1 Общее описание потенциальных технологий мониторинга для геологических хранилищ CO₂

Введение

Мониторинг геологического хранения CO₂ требует использования спектра технологий, которые могут определять распространение, фазу и массу впрыснутого CO₂ по всему пути от места впрыска в резервуар геологического хранилища до поверхности земли или морского дна. Обычно это требует одновременного использования нескольких различных технологий.

Геология хранилища и прилегающих пород должна характеризоваться для выявления параметров, событий и процессов, которые могут привести к высвобождению CO₂ из резервуара хранилища, а также для моделирования потенциальных транспортных маршрутов CO₂ из резервуара хранилища, это не является необходимым для места впрыска (Рисунок А 1).

Рисунок А1 Иллюстрация потенциала для утечек CO₂ из резервуара геологического хранения, которые могут произойти за пределами хранилища.



Если CO₂ мигрирует из резервуара (а) хранилища через невыявленные разломы в пористых и проницаемых породах (б), он может перемещаться из-за плавучести к поверхности в точке (с). Это может привести к выбросам CO₂ с поверхности земли площадью в несколько километров вокруг самой точки с в неопределенный момент времени в будущем. Описание характеристик геологии хранилища и прилегающих пород, а также цифровое моделирование потенциальных сценариев утечек и процессов, может дать информацию, необходимую для правильного выбора оборудования для мониторинга в течение и после процесса впрыска.

В таблицах А5.6 - А5.1 перечислены наиболее распространенные методы контроля и средства измерения, которые могут быть использованы для мониторинга CO₂ в глубине недр (примерно от 200 метров до 5000 метров под землей поверхности или морским дном), неглубоких недр (около 200 метров ниже поверхности земли или морского дна) и вблизи поверхности (регионах менее 10 метров выше и ниже поверхности земли или морского дна).

Следует использовать технологии, дающие наиболее верные результаты в заданных условиях. Пригодность технологии обычно очевидна для специалистов, но различия между технологиями также могут быть оценены на относительную пригодность. Для большинства технологий не существует строго определенных ограничений чувствительности. В полевых условиях возможность измерения распределения, фазы и массы CO₂ из подповерхностных резервуаров зависит от места применения. Она будет определяться в такой же мере геологией участка и окрестностей, и окружающей температурой,

давлением и насыщением подземных вод, а также теоретической чувствительностью технологий измерений или самих измерительных приборов.

Аналогично, пределы чувствительности технологий поверхностного мониторинга определяются параметрами среды, как и чувствительностью инструментов мониторинга самой по себе. Для приповерхностных систем на земле, потоки и концентрация CO₂ определяются с помощью поглощения CO₂ растениями в процессе фотосинтеза, корневого дыхания, микробного дыхания почвы, глубины утечки CO₂ и обмена CO₂ между почвой и атмосферой [Oldenburg and Unger 2003]. Любое высвобождение CO₂ из антропогенного хранилища CO₂ необходимо отличать от изменчивости естественного фона (Oldenburg и Unger 2003, Klusman 2003a, c). Анализ стабильных изотопов углерода и радиационные показатели обнаруженного CO₂ может способствовать этому процессу.

Большинство методов требует калибровки или сравнения с базовыми исследованиями до начала впрыска, например, для определения фоновых потоков CO₂. Стратегии мониторинга в глубинах недр применялись на нефтяном месторождении Уэйберн и на хранилище CO₂ Слейпнер (Wilson и Monea 2005, Arts и др. 2003). Интерпретация данных четырехмерных сейсморазведок оказалась очень успешной в обоих случаях. На нефтяном месторождении Уэйберн геохимическая информация, полученная от некоторых из многочисленных скважин, оказалась также чрезвычайно полезной.

Стратегии мониторинга поверхности и приповерхности суши были предложены (Oldenburg and Unger 2003) и опробованы (Klusman 2003a, c; Wilson и Monea 2005). Использовались исследования почвенного газа и поверхностных газовых потоков. До настоящего времени мониторинг CO₂ для неглубоких подземных пустот или морского дна не применялся. Однако мониторинг просачивания природного газа и его влияние на мелководье морского дна и недр был проведен и принят как аналог для просачивания CO₂ [например, Schroot and Schuttenhelm 2003a, b].

Таблица А 5.1

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДПОЧВЕННОГО МОНИТОРИНГА И ИХ ВЕРОЯТНЫЕ СПОСОБЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Технология	Возможности	Пределы чувствительности	Где применяется, стоимость	Ограничения	Текущий технологический уровень
2D, 3D и 4D (в замедленном темпе) и многокомпонентные исследования сейсмического отражения	Образы геологического строения хранилища и окрестностей; структура, распределение и толщина пород-коллекторов и покрывающих пород; распределение (и исследования в замедленном темпе) CO ₂ в хранилище. Может удостоверить (в определенных пределах) массу CO ₂ в резервуаре. Могут быть установлены постоянные группы сейсмоприемников (что не является обязательным) для исследований в замедленном темпе (4D).	Зависит от месторасположения хранилища. Оптимальная глубина обычно находится в пределах от 500 до 3000 м для хранилища Слейпнер, которое близко к оптимальному технологическому уровню, предел чувствительности на «Утсира Сэнд» определяется как с. 2800 CO ₂ на Уэйберн, предел чувствительности равен с. 2500 - 7500 тонн CO ₂ (White и др. 2004). Вполне вероятно, что CO ₂ в перекрывающих породах может быть обнаружен – неглубокие резервуары природного газа отображаются как светлые точки, и диспергированный метан газовых трубах может быть легко опознан	Береговые и морские хранилища. Труднее поддаются опознанию из-за карстовых полостей, соляных и газовых залежей. Как правило, разрешение ухудшается с глубиной.	Невозможно выявление растворенного CO ₂ (недостаточный импедансный контраст между CO ₂ -насыщенными и природными поровыми жидкостями). Невозможно отображение скважины если импедансный контраст между CO ₂ -насыщенными породами и жидкостью слишком мал. Это довольно распространенные случаи (Wang, 1997).	Хорошо отработанный, с полным коммерческим развитием в газовой и нефтяной промышленности
Межскважинная сейсморазведка	Изображения распределения скоростей между скважинами. Предоставляет двумерную информацию о породах и содержащихся в них жидкостях.	Зависит от месторасположения хранилища. Разрешение может быть выше, чем исследование сейсмического отражения поверхности, но зона действия более ограничена	Береговые и морские хранилища	Как и выше, с ограничением пространством между скважинами	Хорошо отработанный, с полным коммерческим развитием в газовой и нефтяной промышленности
Вертикальный сейсмо-профиль	Изображение распределения скоростей в пределах одной скважины. Карта жидкостных давлений в пределах скважины. Потенциально раннее определение утечки в районе скважины	Зависит от месторасположения хранилища	Береговые и морские хранилища	Как и выше, с ограничением по местоположению скважины	Хорошо отработанный, с полным коммерческим развитием в газовой и нефтяной промышленности
Микро-сейсмический мониторинг	Выявляет и триангулирует местоположение микротрещин в породах резервуара и в окружающих породах. Обеспечивает выявление местоположений фронтов впрыскиваемых жидкостей. Оценивает индуцированную сейсмическую опасность	Зависит от месторасположения хранилища. Зависит от фоновых шумов, среди прочих факторов. Больше количество приемников в большем количестве скважин дает более высокую точность в определении местоположения событий	Береговые и морские хранилища	Для размещения требуются скважины	Достаточно основательно отработан, имеет коммерческое применение.

ТАБЛИЦА А 5.1(ПРОДОЛЖЕНИЕ)
ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДПОЧВЕННОГО МОНИТОРИНГА И ИХ ВЕРОЯТНЫЕ СПОСОБЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Технология	Возможности	Пределы чувствительности	Где применяется, стоимость	Ограничения	Текущий технологический уровень
Скважины для мониторинга	Многие потенциальные функции включают измерения насыщенности CO ₂ , давление жидкости, температуру. Цемент и/или эрозия опалубки или повреждения. Промысловая геофизика. Прослеживание радиоактивными индикаторами может дать предотвращения утечки, изменив параметры эксплуатации. Выявление геохимических изменений в пластовых жидкостях. Физический отбор пород и жидкостей. Внутрискважинные инклинометры для выявления движения пород при впрыске CO ₂ . Мониторинг образования прилегающих пород хранилища на предмет проявления признаков утечки.	Анализ образцов из нисходящих скважин могут быть проанализированы с помощью масс-спектрометра индуктивно связанной плазмы (разрешение - в частях на миллиард). Перфторуглеродные маркеры могут быть выявлены в соотношении частей на 10 ¹² . . Диаграмма геофизического исследования скважины может обеспечить точное измерение многих параметров (пористость, сопротивление, плотность и т.д.).	Береговые и морские хранилища. Более дорог при использовании на морских хранилищах.	Некоторые функции могут выполняться только перед обсадкой скважины. Прочие требуют перфорации некоторых интервалов обсадки. Стоимость являет собой ограничение, особенно при использовании на морских хранилищах.	Скважины мониторинга используются, например, в отрасли хранения природного газа. Многие инструменты довольно хорошо отработаны и повседневно применяются в нефтяной и газовой промышленности, прочие – находятся в разработке.
Мониторинг давления в скважине при впрыске, проверка пластового давления	Давление впрыска может отслеживаться в устье скважины в метрах на протяжении долгого времени (Wright & Majek 1998). Давление в скважине может отслеживаться с помощью приборов. Проверки давления впрыска и испытания на продуктивность используются для определения проницаемости, наличия барьеров в резервуаре, возможностей перекрывающих пластов в вопросах удержания жидкостей.	Проверенная технология для инженерии газовых и нефтяных резервуаров и оценки запасов. ICP-MS используется для выявления трудноуловимых изменений в химическом составе при впрыске CO ₂	Береговые и морские хранилища. Более дорог при использовании на морских хранилищах.		Хорошо отработанный, с полным коммерческим развитием в газовой и нефтяной промышленности
Гравиметрическая разведка	Определение массы и приблизительного распределения впрыснутого CO ₂ с помощью незначительных изменений гравитации, вызванных впрыском CO ₂ , замещающего природные пластовые жидкости в резервуаре. Возможно определение вертикальной миграции CO ₂ , при использовании повторяющихся измерений, особенно если фазовые изменения от суперкритических жидкостей до газа вызваны изменением плотности. Предел чувствительности невелик и зависит от местоположения хранилища.	Минимальные количества измеряются в порядках от сотен тысяч до миллионов тонн (Benson и др. 2004; Chadwick и др. 2003). Фактические измеряемые количества зависят от местоположения хранилища. Наибольшая пористость и плотность контрастирует между естественными поровыми жидкостями и впрыснутым CO ₂ , при лучшем разрешении.	Береговые и морские хранилища Дешево при применении на береговых хранилищах.	Невозможно выявление растворенного CO ₂ (недостаточный импедансный контраст с природными поровыми жидкостями).	Хорошо отработанный, с полным коммерческим развитием в газовой и нефтяной промышленности. Широко применяется в геофизических исследованиях.

Таблица А 5.2

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДПОЧВЕННОГО МОНИТОРИНГА И ИХ ВЕРОЯТНЫЕ СПОСОБЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Технология	Возможности	Пределы чувствительности	Где применяется, стоимость	Ограничения	Текущий технологический уровень
Спаркер: Сейсмический источник с центральной частотой в пределах от 0,1 до 1,2 кГц используется как правило на небольших глубинах.	Отображения (изменения в них) распределения газа в неглубоко расположенных породах (обычно полученные с помощью акустического зондирования, светлые точки, рефлекторное увеличение)	Общая концентрация газа >22% выявляется с помощью акустического зондирования. Разрешение по вертикали >1 м.	Морские хранилища	Повышенная проницаемость, но меньшее разрешение, чем при применении устройства глубинного буксирования Количественная оценка газа может быть затруднена, если концентрация выше 5%.	Высокоразвитый, широко применяемый в коммерческом секторе, и индустриях, имеющих дело с морским дном и исследованиями сейсмических пустот, а также в морских исследованиях
Устройство глубинного буксирования: Сейсмический источник генерирует широкий диапазон звуковых импульсов с центральной частотой около 2,5 кГц, продвигаемый в глубину.	Отображения (изменения в них) распределения газа в неглубоко расположенных породах (обычно полученные с помощью акустического зондирования, светлых зон и т.д.). Изображение морфологии морского дна. Изображение потоков ЦМД в морской воде.	Общая концентрация газа >22% выявляется с помощью акустического зондирования. Разрешение морфологии морского дна обычно менее 1 метра. Проницательная способность может составлять до 200 м ниже уровня морского дна, но, как правило, менее этого значения.	Морские хранилища	Потоки ЦМД более растворимы, чем метановые пузыри, потому как могут растворяться на относительно мелководных участках моря (примерно до 50 метров). Потоки ЦМД могут быть нерегулярными и не выявляемыми одиночным исследованием. Точное позиционирование устройства является критическим фактором.	Высокоразвитый, широко применяемый в коммерческом секторе, и индустриях, имеющих дело с морским дном и исследованиями сейсмических пустот, а также в морских исследованиях
Звуковой локатор бокового обзора	Изображение морфологии морского дна. Изображение потоков ЦМД в морской воде. Характеризация литологии морского дна, например, цементации углеводородов	Оптимальный метод выявления пузырей газа.	Морские хранилища	Как в вышеописанном случае. Точное позиционирование локатора является критическим фактором.	Высокоразвитый, широко применяемый в коммерческом секторе, а также в морских исследованиях
Многолучевое эхозондирование (широкопрофильная батиметрия)	Изображение морфологии морского дна. Повторяющиеся исследования позволяют количественно оценить морфологические изменения. Литология морского дна выявляется с помощью обратного рассеяния сигнала.	Может выявить изменения морфологии морского дна как минимум на 10 см.	Морские хранилища	Как в вышеописанном случае. Большая область покрытия за более короткое время.	Широко применяется в морских исследованиях.
Электроразведка	Может выявить изменения электросопротивления при вытеснений природных поровых жидкостей CO ₂ , особенно если CO ₂ – сверхкритический. ЭР потенциально может картографировать распределение CO ₂ в резервуаре хранилища. Поверхностная ЭР потенциально может картографировать изменения насыщенности CO ₂ в резервуаре.	Относительно невысокая стоимость и низкое разрешение.	Возможно применение как для береговых, так и для морских хранилищ. Требует дальнейшего развития в применении к хранилищам CO ₂ .	Разрешение – Требует дальнейшего развития и демонстрации возможностей.	На стадии разработки

ТАБЛИЦА А 5.3
ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОВ ГАЗА ИЗ ПОЧВЫ ИЛИ ВОДЫ В АТМОСФЕРУ И ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Технология	Возможности	Пределы чувствительности	Где применяется, стоимость	Ограничения	Текущий технологический уровень
Технология смешивания вихревых потоков (Miles, Davis и Wyngaard 2005).	Измерения потоков CO ₂ , поступающих в атмосферу с помощью математически определенных с помощью аппаратуры контуров потока. Оборудование монтируется на платформе или вышке. Данные анализа газа, обычно от открытых или закрытых инфракрасных детекторов CO ₂ интегрируются со скоростью ветра и направлением для определения контуров и расчета потоков.	Реально определяемые потоки в биологически активной области при ежечасных измерениях. $4.4 \times 10^{-7} \text{ кг м}^{-2} \text{ с}^{-1} = 13870 \text{ т км}^{-2}/\text{год}$ (Miles, Davis и Wyngaard 2005)	Можно использовать только на побережье. Проверенная технология. Относительно дешева. Потенциально может использоваться в исследовании больших областей при определении потоков и выявлении утечек. При обнаружении утечки требует детального (с помощью портативных детекторов CO ₂ или почвенных газов) исследования контуров обнаруженной утечки.	Может понадобиться несколько измерительных вышек для покрытия всего необходимого района. При установке на 10-метровую вышку контуры имеют разрешение около 10^4 - 10^6 м^2 . Желательно дальнейшее развитие для автоматизации измерений. Количественное определение потоков может быть ограничено районом или рельефом местности.	Разработано научным сообществом.
Технология накопительных камер, с использованием инфракрасного или лабораторного анализа отобранного газа для измерения потоков (Klusman 2003).	Накопительные камеры известного объема размещаются на поверхности и неплотно прикрепляются к поверхности земли, например, с помощью поднятия окружающей почвы или вставляются в отверстие в почве. Газ периодически отбирается в камеру и анализируется, например, с помощью портативного инфракрасного детектора газа, а далее возвращается в камеру для дальнейшего накопления и перепроверки. Выявляет любые потоки через почву.	Легко выявлять потоки в $0,04 \text{ г CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ день}^{-1} = 14.6 \text{ т/км}^2/\text{год}$ (Klusman 2003a). Основным вопросом является выявления истинных подземных протечек в противопоставлении их к изменчивым биогенетическим фоновым уровням (потенциально, могут помочь индикаторы). Лучше работает зимой, так как сезонные изменения биологической активности во время зимы подавлены.	Технология проверена на Рэнгли (Klusman 2003a, b, c). Мощный и надежный инструмент при использовании в комбинации с анализом других газов и радиоактивных изотопов углерода – это помогает выявлять источники собранного CO ₂ . Газы-индикаторы, добавленные к впрыскиваемому CO ₂ , также могут помочь в этом деле – выявление подвижных индикаторов может дать помощь при предотвращении утечки с помощью изменения рабочих параметров (например, ослабить воздействие на окружающую среду).	Зазоры между точками отбора проб теоретически оставляют возможность существования невыявленных утечек. На нефтяных и газовых месторождениях существует возможность, скорее, микробного окисления CO ₂ из CH ₄ , чем обычных утечек CO ₂ из хранилища.	Разработано научным сообществом.
Анализ подпочвенных вод и газа поверхностных вод.	Отбор образцов и измерение содержания газа в подпочвенных водах и поверхностных водах, таких, как ручьи. Возможности: а) Создается некоторый вакуум над поверхностью жидкости, позволяющий отобрать растворенные газы. Анализ газов с помощью хроматографии, масс-спектрометрии и т.п. б) Для свежих образцов, анализ содержания бикарбоната. По существу, важно то, что проделано на месторождении Уэйберн, на устье скважины (Shevalier и др. 2004). Так как растворенный CO ₂ и содержание бикарбоната связаны, то анализ бикарбоната может быть напрямую связан с содержанием растворенного CO ₂ (с предположением о сбалансированных условиях).	Желательно, чтобы фоновый уровень был в рамках низкого диапазона ppm. Предел чувствительности на бикарбонат находится в диапазоне до 2 ppm.	Используется на побережье. Следует использовать в комбинации с измерениями потоков из почвы в атмосферу, так как они являются альтернативными маршрутами выбросов CO ₂ . Методики измерений хорошо развиты и относительно несложны (например, Evans и др., 2002) но следует учитывать быструю дегазацию CO ₂ из воды (Gambardella и др., 2004).	Следует учитывать меняющиеся водные потоки.	Имеет коммерческое применение

ТАБЛИЦА А 5.4
ТЕХНОЛОГИИ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ СОДЕРЖАНИЯ CO₂ В ВОДЕ И ПОЧВЕ (ВЫЯВЛЕНИЕ УТЕЧЕК)

Технология	Возможности	Пределы чувствительности	Где применяется, стоимость	Ограничения	Текущий технологический уровень
Инфракрасный лазерный анализ протяженных открытых путей	Измеряется абсорбция CO ₂ в воздухе как отдельная часть инфракрасного спектра вдоль лазерного луча, а потом уровень CO ₂ в воздухе около земли. Если это возможно, на основании измерений строится томографическая карта, регистрация слабых следов преобразования в потоки, идущие сквозь почву.	Нуждается в дальнейшем развитии, потенциал оценивается в $\pm 3\%$ от окружающей среды (с.11 ppm) или более.	Используется на побережье. Возможно, обладает наилучшим краткосрочным потенциалом при исследовании нескольких квадратных километров с помощью одного инструмента, а следовательно и при исследовании всей площади месторождения с помощью нескольких инструментов. Стоимость оценивается в \$1000 за каждый инструмент, следовательно, исследование месторождения относительно недорого. При выявлении утечки может потребоваться дополнительное исследование для точного определения ее местоположения (портативный ИК-детектор CO ₂ или почвенных газов).	Пока на стадии разработки. Измерения концентрации CO ₂ производятся на большом протяжении, следовательно, потребуется интерпретация томограммы или более тщательное исследование для установления точного местоположения утечки. Сложно рассчитать потоки или выявить утечки низкого уровня при относительно высоком и изменчивом естественном фоне.	На стадии демонстрации и разработки.
Анализ почвенного газа.	Выявление почвенных потоков из поверхности и их критических отклонений от нормы. Технология измерения уровней CO ₂ и потоков в почве с использованием отбора проб, обычно с глубины 50-100 см а также проб из скважин. Отбор проб обычно с помощью сита. Меньшая часть пробы или тубуса, вставленного в скважину, перфорирована, газ поднимается и анализируется с помощью портативного лазерного ИК-детектора, либо помещается в контейнер для лабораторного анализа.	Портативные ИК-детекторы, используемые при исследовании почвенного газа способны определять изменения концентрации CO ₂ как минимум до $\pm 1-2$ ppm. Абсолютные значения содержания CO ₂ в почвенном газе (0.2-4%) выше, чем в воздухе, но изменчивость естественных потоков под поверхностью меньше, чем над ней, поэтому их легче выявить. Диапазон газов может быть измерен – относительное содержание в сравнении с другими газами и изотопами может дать подсказку в вопросе о происхождении CO ₂ .	Используется на побережье. Технология проверена на месторождениях Уэйбери и Рэнгли а также в вулканических/геотермальный районах. Полезно при проведении детальных измерений, особенно в точках утечки слабых потоков.	Каждое измерение может занять несколько минут. Тщательное исследование больших районов относительно дорого и занимает много времени. На нефтяных и газовых месторождениях существует возможность, скорее, микробинального окисления CO ₂ из CH ₄ , чем обычных утечек CO ₂ из хранилища.	Разработано научным сообществом.
Портативные индивидуальные нацеленные на безопасность инфракрасные анализаторы газа.	Измеряют уровень CO ₂ в воздухе	Разрешение малых портативных устройств для индивидуальной защиты обычно на уровне с. 100 ppm.	Может использоваться как на берегу, так и в море, например, на платформах. Проверенная технология. Стоимость малых портативных устройств для индивидуальной защиты обычно <\$1000 за штуку. Также может быть полезным для точного определения местоположения утечек высокой концентрации, выявленных широко распространенными методами поиска.	Недостаточно точен при мониторинге утечек CO ₂ .	Имеет широкое коммерческое применение
Авиационный инфракрасный лазерный анализ газа	Инфракрасные лазерные детекторы замкнутого или открытого контура монтируются на вертолете или самолете и проводят измерения уровня CO ₂ в воздухе через каждые ~10 м.	Brantley и Koepenick (1995) заявляют о пределе чувствительности примерно ± 1 ppm от естественного фона, это касается оборудования, используемого в технологии с замкнутым контуром. О технологии открытого контура имеется меньше информации, хотя, скорее всего разрешение равно примерно $\pm 1\%$ или меньше.	Используется на побережье. Проверенная технология выявления утечек метана из трубопроводов и CO ₂ из очень крупных точечных источников. Возможно применение для выявления утечек CO ₂ из трубопроводов и инфраструктуры, либо концентрированных утечек из поверхности земли.	Измерения проводятся с высоты как минимум в сотню метров над поверхностью земли, а концентрация на уровне земли скорее всего гораздо выше, чем минимальный определяемый уровень. CO ₂ тяжелее воздуха, поэтому он удерживается на поверхности и его не так-то просто обнаружить, в отличие от метана, при использовании метода авиализмерений.	Имеет коммерческое применение на трубопроводах для природного газа, но не для выявления CO ₂ .
Примечания: Данные получены частично от Schuler & Tang (2005), с учетом разрешения проекта перехвата CO ₂					

ТАБЛИЦА А 5.5
КОСВЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ УТЕЧЕК ИЗ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ХРАНИЛИЩ CO₂

Технология	Возможности	Пределы чувствительности	Где применяется, стоимость	Ограничения	Текущий технологический уровень
Авиационная или спутниковая визуализация	Выявляет аномальные изменения в состоянии растений, которые могут быть вызваны утечками CO ₂ на поверхности земли. Также может выявить трудноуловимые или скрытые трещины, могущие быть маршрутами выхода газа на поверхность земли. Использует части видимого и инфракрасного спектра.	Пространственное разрешение спутниковой и авиационной визуализации составляет 1-3 метра. Не определяет потоки или относительные объемы CO ₂ в воздухе и почвенном газе, но может дать отображение района, который следует подвергнуть отбору проб и детальному исследованию.	Используется на побережье.	Исследование требует определения уровней CO ₂ в почве, которые могут привести к поддающимся выявлению изменениям здоровья растений и распределения. Требуется много повторных исследований для установления (сезонного) изменений состояния природы. Бесполезно в засушливых районах.	На стадии демонстрации и разработки.
Спутниковая интерферометрия	Повторяющиеся исследования изменений уровня поверхности земли с помощью спутниковых радаров потенциально могущих быть вызванными впрыском CO ₂	InSAR (интерферометрический синтезировано-апертурный радар) способен выявить изменения миллиметровых масштабов возвышений.	Используется на побережье.	Изменений возвышений почвы может и не происходить, либо они могут происходить в сезонном цикле, например, при замораживании/оттаивании. Локальные атмосферные и топографические условия могут служить препятствием.	На стадии разработки, для хранилищ CO ₂ еще не использовалась.

Таблица А 5.6
ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА УРОВНЕЙ CO₂ В МОРСКОЙ ВОДЕ И СПОСОБЫ ИХ ВОЗМОЖНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Технология	Возможности	Пределы чувствительности	Где применяется, стоимость	Ограничения	Текущий технологический уровень
Анализ газа осадочных отложений	Отбор образцов и лабораторные измерения содержания газа из отложений морского дна.	Пока не определено, как содержание газа относится к содержанию газа in situ.	Используется на море. Стоимость доставки высока.	Требуется поправка на давлении для данных, до отбора образцов под давлением. Для сбора образцов, при необходимости, могут использоваться ROV и ныряльщики. Стоимость доставки высока.	Разработано научным сообществом для морского газового анализа метана
Анализ газа в морской воде	Отбор образцов и лабораторные измерения содержания газа из отложений морского дна. Существуют протоколы по анализу образцов морской воды.	Пределы чувствительности аналитического оборудования, как правило, находятся в низком ppm-диапазоне или даже ниже. Предел чувствительности на бикарбонат находится в диапазоне до 2 ppm. Возможно выявление утечек на неисследованных месторождениях. Минимальный размер утечки, которую можно выявить, на практике не установлен.	Используется на море. Стоимость доставки высока.	Как и для вышеуказанного	Применяется научным сообществом для верховодки, для глубоких вод используется редко.

Ссылки

- Arts, R., Eiken, O., Chadwick, R.A., Zweigel, P., van der Meer, L.G.H. and Zinszner, B. (2003). 'Monitoring of CO₂ injected at Sleipner using time-lapse seismic data.' Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), J. Gale & Y. Kaya (eds.), 1-4 October 2002, Kyoto, Japan, Pergamon, v. 1, pp. 347-352.
- Bachu, S. and Gunter, W.D. (2005). 'Overview of acid-gas injection operations in Western Canada.' In: E.S. Rubin, D.W. Keith & C.F. Gilboy (Eds.), Greenhouse Gas Control Technologies, Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 5-9 September 2004, Vancouver, Canada. Volume 1: Peer Reviewed Papers and Overviews, Elsevier, Oxford, pp.443-448.
- Benson, S.M., Gasperikova, E. and Hoversten, M. (2004). 'Overview of monitoring techniques and protocols for geologic storage projects.' IEA Greenhouse Gas R&D Programme Report, PH4/29. 99 pages.
- Brantley, S. L. and Koepenick, K. W. (1995). 'Measured carbon-dioxide emissions from Oldoinyo-Lengai and the skewed distribution of passive volcanic fluxes.' *Geology*, v. 23(10), pp. 933-936.
- Chadwick, R.A., Zweigel, P., Gregersen, U., Kirby, G.A., Holloway, S. and Johannesen, P.N. (2003). 'Geological characterization of CO₂ storage sites: Lessons from Sleipner, northern North Sea.' Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), J. Gale and Y. Kaya (eds.), 1-4 October 2002, Kyoto, Japan, Pergamon, v.I, 321-326.
- Evans, W. C., Sorey, M.L., Cook, A.C., Kennedy, B.M., Shuster, D.L., Colvard, E.M., White, L.D., and Huebner, M.A., (2002). 'Tracing and quantifying magmatic carbon discharge in cold groundwaters: lessons learned from Mammoth Mountain, USA.' *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 114(3-4), pp. 291-312.
- Gambardella, B., Cardellini, C., Chiodini, G., Frondini, F., Marini, L., Ottonello, G., Vetusch Zuccolini, M., (2004). 'Fluxes of deep CO₂ in the volcanic areas of central-southern Italy'. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* v. 136 (1-2), pp. 31-52.
- IEA GHG, (2005). 'Permitting issues for CO₂ capture and storage: A review of regulatory requirements in Europe, USA and Australia.' IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Report IEA/CON/04/104, Cheltenham, UK.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2005). Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage [Metz, B., Davidson, O., Meyer, L and de Coninck, H.C (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, USA.
- Jones, D. G., Beaubien, S., Strutt, M. H., Baubron, J.-C., Cardellini, C., Quattrochi, F. and Penner, L. A. (2003). 'Additional soil gas monitoring at the Weyburn unit (2003).' Task 2.8 Report for PTRC. British Geological Survey Commissioned Report, CR/03/326.
- Klusman, R.W. (2003(a)). 'Rate measurements and detection of gas microseepage to the atmosphere from an enhanced oil recovery/sequestration operation, Rangely, Colorado, USA.' *Applied Geochemistry*, v. 18, pp. 1825-1838.
- Klusman, R.W. (2003(b)) 'Computer modelling of methanotrophic oxidation of hydrocarbons in the unsaturated zone from an enhanced oil recovery/sequestration project, Rangely, Colorado, USA.' *Applied Geochemistry*, v. 18, pp. 1839-1852.
- Klusman, R.W., (2003 (c)). 'A geochemical perspective and assessment of leakage potential for a mature carbon dioxide-enhanced oil recovery project and as a prototype for carbon dioxide sequestration; Rangely field, Colorado.' *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, v. 87(9), pp. 1485-1507.
- Miles, N.L., Davis, K.J. and Wyngaard, J.C. (2005). 'Detecting leaks from belowground CO₂ reservoirs using eddy covariance, Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations.' Results from the CO₂ Capture Project, v. 2: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification S.M. Benson (ed.), Elsevier Science, London, pp. 1031-1044.
- Oldenburg, C.M. and A.J. Unger, (2003). 'On leakage and seepage from geologic carbon sequestration sites: unsaturated zone attenuation. Vadose Zone'. *Journal*, 2, 287-296.
- Pruess, K., Garcia, J., Kavscek, T., Oldenburg, C., Rutqvist, J., Steefel, C., and Xu, T. (2004). 'Code intercomparison builds confidence in numerical simulation models for geologic disposal of CO₂'. *Energy*, v. 29, pp. 1431-1444.
- Reeves, S.R., (2005). 'The Coal-Seq project: Key results from field, laboratory and modeling studies.' Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), September 5-9, 2004, Vancouver, Canada, v.II, 1399-1406.

- Scherer, G.W., Celia, M.A., Prevost, J.-H., Bachu, S., Bruant, R., Duguid, A., Fuller, R., Gasda, S.E., Radonjic, M. and Vichit-Vadakan, W. (2005). 'Leakage of CO₂ through abandoned wells: role of corrosion of cement, carbon dioxide capture for storage in deep geologic formations' Results from the CO₂ Capture Project, v. 2: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification, Benson, S.M. (Ed.), Elsevier Science, London, pp. 827–850.
- Schroot, B.M. and Schüttenhelm, R.T.E (2003). 'Expressions of shallow gas in the Netherlands North Sea.' *Netherlands Journal of Geosciences*, v. 82(1), pp. 91-105.
- Schroot, B.M. and Schüttenhelm, R.T.E (2003). 'Shallow gas and gas seepage: expressions on seismic and other acoustic data from the Netherlands North Sea.' *Journal of Geochemical Exploration*, v. 4061, pp. 1-5.
- Shevalier, M., Durocher, K., Perez, R., Hutcheon, I., Mayer, B., Perkins, E., and Gunter, W. (2004). 'Geochemical monitoring of gas-water-rock interaction at the IEA Weyburn CO₂ Monitoring and Storage Project.' Saskatchewan, Canada. GHGT7 Proceedings. At: http://www.ghgt7.ca/papers_posters.php?format=poster.
- Shuler, P. and Tang, Y (2005). 'Atmospheric CO₂ monitoring systems, carbon dioxide capture for storage in deep geologic formations.' Results from the CO₂ Capture Project, v. 2: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification, S.M. Benson (ed.), Elsevier Science, London, pp. 1015–1030.
- Strutt, M.H, Beaubien, S.E., Beabron, J.C., Brach, M., Cardellini, C., Granieri, R., Jones, D.G., Lombardi, S., Penner, L., Quattrocchi F. and Voltatomi, N. (2003). 'Soil gas as a monitoring tool of deep geological sequestration of carbon dioxide: preliminary results from the EnCana EOR project in Weyburn, Saskatchewan (Canada).' Proceedings of the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6), J. Gale and Y. Kaya (eds.), 1–4 October 2002, Kyoto, Japan, Pergamon, Amsterdam, v.I., 391–396.
- Wang, Z. (1997). 'Feasibility of time-lapse seismic reservoir monitoring; the physical basis.' *The Leading Edge*, v. 16, pp. 1327-1329.
- White, D.J., Burrowes, G., Davis, T., Hajnal, Z., Hirsche, I., Hutcheon, K., Majer, E., Rostron, B and Whittaker, S. (2004). 'Greenhouse gas sequestration in abandoned oil reservoirs.' The International Energy Agency Weyburn pilot project. *GSA Today*, 14, 4–10.
- Wilson, M., and Monea, M. (2005). IEA GHG Weyburn Monitoring and Storage Project, Summary Report, 2000–2004. Petroleum Technology Research Center, Regina SK, Canada. In: Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-7), Vol. III, September 5–9, Vancouver, Canada.
- Wright, G. and Majek, A. (1998). 'Chromatograph, RTU System monitors CO₂ injection'. *Oil and Gas Journal*, July 20, 1998.
- Yoshigahara, C, Itaoka, K. and Akai, M. (2005). 'Draft accounting rules for CO₂ capture and storage'. Proceedings of the GHGT-7 Conference.

Прочие ссылки

- Barrie, J., Brown, K., Hatcher, P.R. & Schellhase, H.U. (2005). 'Carbon dioxide pipelines: A preliminary review of design and risks.' In: E.S. Rubin, D.W. Keith & C.F. Gilboay (Eds.), Greenhouse Gas Control Technologies, Proceedings of the 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 5-9 September 2004, Vancouver, Canada. Volume 1: Peer Reviewed Papers and Overviews, Elsevier, Oxford, pp. 315-320.
- Haefeli, S., Bosi, M. and Philibert, C. (2004). 'Carbon dioxide capture and storage issues - accounting and baselines under the United Nations Framework Convention on Climate Change'. IEA Information Paper. IEA, Paris, 36 p.
- Holloway, S., Pearce, J.M., Ohsumi, T. and Hards, V.L. (2005). 'A review of natural CO₂ occurrences and their relevance to CO₂ storage.' IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, UK.
- Oldenburg, Curtis M., Lewicki, Jennifer L., and Hepple, Robert P., (2003). 'Near-surface monitoring strategies for geologic carbon dioxide storage verification.' Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA LBNL-54089.
- Schremp, F.W. and Roberson, G.R. (1975). 'Effect of supercritical carbon dioxide (CO₂) on construction materials.' *Society of Petroleum Engineers Journal*, June 1975, 227–233.