

Что в самом деле означает геологическое хранение CO₂?

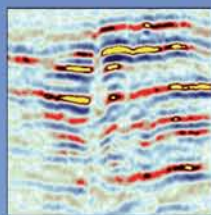
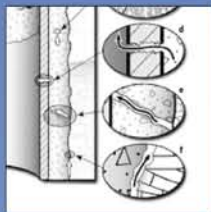
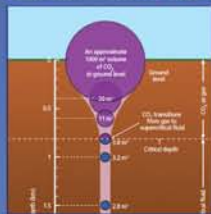
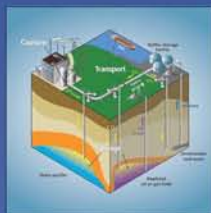
Ответственное
использование
ископаемого топлива

Устранение основного
источника парниковых газов

Возвращение углерода назад в землю

Резерв времени, необходимый, чтобы
разработать благоприятные для климата
источники энергии





Изменение климата и необходимость в геологическом хранении CO₂	4
1. Где и сколько CO₂ мы можем хранить под землёй?	6
2. Как можно транспортировать и закачивать большие количества CO₂?	8
3. Что происходит с CO₂ в коллекторе хранения?	10
4. Может ли CO₂ вытекать из коллектора и, если да, то какими могут быть последствия?	12
5. Как можно контролировать участки хранения в глубине и на поверхности земли?	14
6. Какие критерии безопасности должны быть установлены и учтены?	16
Словарь	18
Что такое CO₂GeoNet?	19

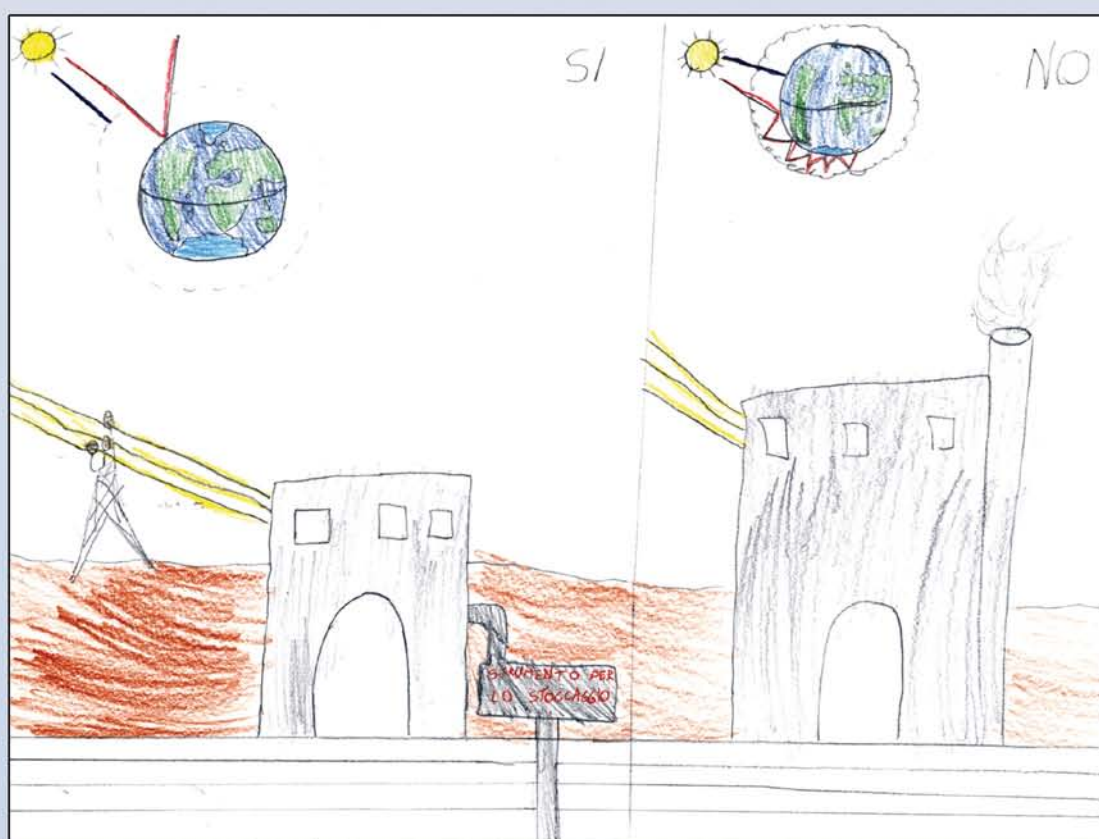
Эта брошюра была подготовлена при сотрудничестве: Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persogila, Gijs Rimmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

Русская версия была переведена Казбулатом Шогеновым и отредактирована Аллой Шогеновой, и Борисом Балясным.

Видение будущего



Больше нет дымящих труб
Труба приносит CO₂ и опускает его под землю
Это хорошо для Земли



© Sapienza URS

Массимо, 10 лет, Рим – Италия

Для наших детей
геологическое хранение CO₂ имеет смысл

Изменение климата и необходимость в геологическом хранении CO₂

Рисунок 1
Во всем мире связанные с человеческой деятельностью выбросы углекислого газа составляют 30 миллиардов тонн (Гт) в год, что соответствует 8,1 Гт углерода: 6,5 Гт от сжигания ископаемого топлива и 1,6 Гт от вырубки лесов и сельскохозяйственной деятельности.

Человечество выпускает в атмосферу слишком много CO₂

Сегодня общепризнанным является тот факт, что человеческая активность пагубно влияет на углеродный цикл нашей планеты. До промышленной революции и ранее – приблизительно 10 000 лет назад, следствием этого полностью сбалансированного цикла, включающего в себя природный обмен углерода между геосферой, биосферой, океанами и атмосферой была низкая концентрация углекислого газа (CO₂) в атмосфере (приблизительно 280 мд (миллионная доля), иными словами 0.028%). Однако, последние 250 лет наше непомерное сжигание

Нетто-оборот CO₂ между почвой и атмосферой в 1997 г. (в миллиардах тонн углерода в год).

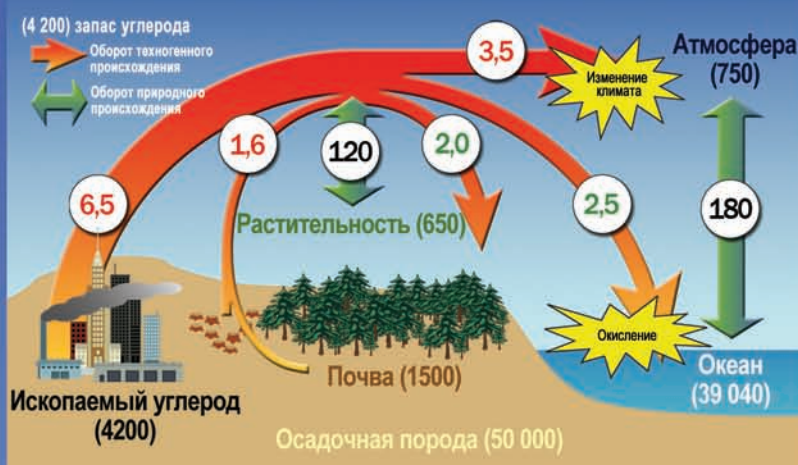
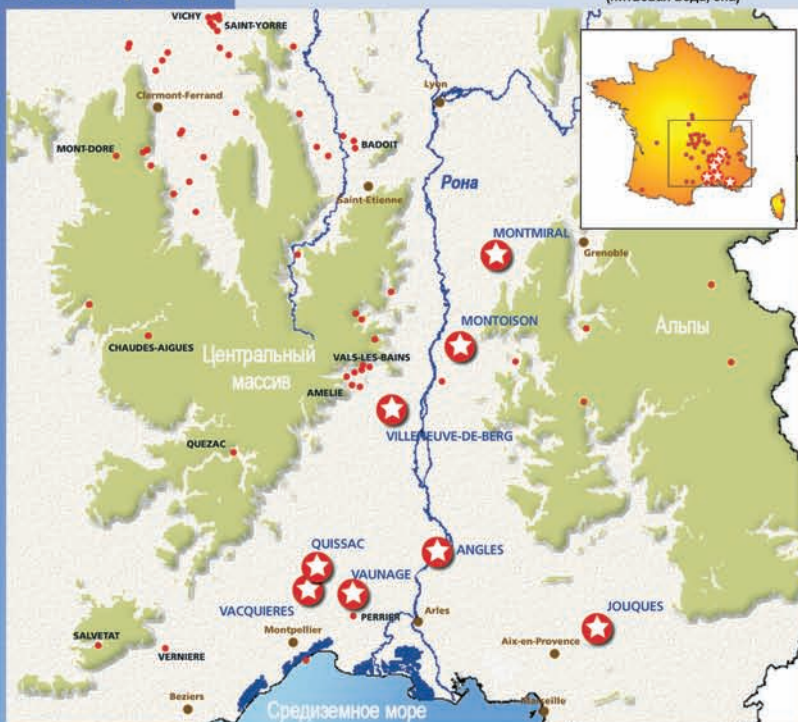


Рисунок 2
Французские углекислогогазовые провинции.

★ **Природные поля CO₂**
● Используемые воды с природным углекислым газом (питьевая вода, спа)



ископаемого топлива (уголь, нефть, газ) для производства энергии, отопления, удовлетворения нужд промышленности и транспорта непрерывно возрастает, что вызывает рост количества углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу (**Рис. 1**). Примерно половина этого произведенного человеком излишка углекислого газа поглощается растительностью и растворяется в океанах, последнее вызывает окисление и связанные с этим негативные влияния на морские растения и животных. Остальное скапливается в атмосфере, и это способствует изменению климата, т.к. углекислый газ – это парниковый газ, который удерживает часть солнечного тепла и способствует нагреванию земной поверхности. Требуется незамедлительные радикальные меры, чтобы остановить рост сегодняшней концентрации углекислого газа в атмосфере, которая составляет 387 мд (а это уже на 38% больше, чем было на доиндустриальном этапе развития человечества), во избежание ее возрастания до критического уровня в 450 мд в течение ближайших десятилетий. Эксперты всего мира согласны с тем, что если превысить этот уровень, то предотвратить самые тяжелые последствия будет уже невозможно.

Возвращение углерода назад в землю

С самого начала индустриальной эры (1750-х годов) наш мир весьма значительно зависит от ископаемого топлива, поэтому нет ничего удивительного в том, что для преобразования сегодняшнего общества в общество, основанное на благоприятных для климата энергетических источниках, потребуются и время, и деньги. Сейчас нам необходимы краткосрочные меры, которые помогут сократить нашу зависимость от ископаемого топлива путем использования его без последующего загрязнения окружающей среды. Это первый шаг, и он даст нам время, необходимое для разработки технологий и инфраструктуры будущего, в котором будет использоваться возобновляемая энергия. Одна из таких возможностей – это создание замкнутого цикла в системе производства энергии, в которой углерод, добытый из земных недр в виде газа, нефти и угля, возвращается в недра, но уже в виде углекислого газа. Интересно, что хранение углекислого газа в недрах земли не изобретено людьми. Это естественный, широко распространенный природный феномен: на нашей планете немало коллекторов* углекислого газа, существующих на протяжении не только тысяч, но и миллионов лет. Одним из примеров этого можно назвать серию из восьми естественных коллекторов углекислого газа, которые обнаружили в процессе поиска нефти в 1960-е годы на юго-востоке Франции (**Рис. 2**). Эти и многие другие природные объекты, расположенные по всему миру, показывают, что геологические структуры способны эффективно и безопасно хранить углекислый газ на протяжении чрезвычайно долгих периодов времени.

Улавливание и хранение CO₂: многообещающие пути смягчения последствий

Из всего спектра мер, которые необходимо срочно начать принимать для смягчения изменения климата и уменьшения окисления мирового океана, улавливание и хранение углекислого газа (УХУ*) может играть решающую

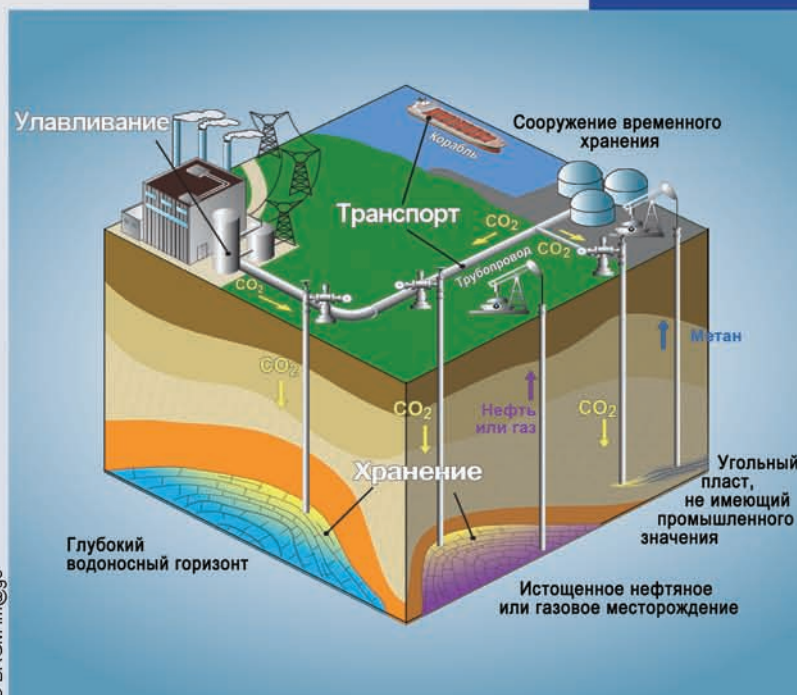
роль, потому что оно могло бы составить 33% от требуемого к 2050 году уменьшения выбросов CO₂. УХУ включает в себя улавливание углекислого газа на угольных или газовых электростанциях и на промышленных объектах (сталелитейные, цементные, нефтеперерабатывающие заводы и т.д.), транспортировку его по трубам или на кораблях (танкерах) к месту хранения и закачку его через скважины* в подходящие геологические формации для длительного хранения (Рис. 3). С учетом роста населения планеты и возрастания потребления энергии в развивающихся странах, а также при отсутствии широкомасштабного использования альтернативных "чистых" источников энергии, продолжающееся сжигание ископаемого топлива в краткосрочной перспективе неизбежно. Так, внедряя УХУ, человечество может продвигаться дружелюбным по отношению к окружающей среде образом, в то же время выстраивая мост к всемирной экономике, основанной на устойчивом производстве энергии.

Всемирное развитие УХУ процветает

Основные научно-исследовательские программы в области УХУ проводятся в Европе, Соединенных Штатах Америки, Канаде, Австралии и Японии, начиная с 1990-х годов. Немалый объем знаний и бесценный опыт уже приобретены во время проведения первых в мире крупномасштабных демонстрационных проектов, где углекислый газ закачивается глубоко под землю в течение нескольких лет: Слейпнер (Sleipner) в Норвегии (около 1 Мт в год, начиная с 1996 г.) (Рис. 4), Вейбурн (Weyburn) в Канаде (около 1,8 Мт в год, начиная с 2000 года) и Айн Салах (In Salah) в Алжире (приблизительно 1 Мт в год, начиная с 2004 года). Международное сотрудничество в области исследований хранения углекислого газа, поддержанное IEAGHG* и CSLF* на этих и других участках, является чрезвычайно важным для расширения нашего понимания и развития всемирного научного сообщества, нацеленного на решение этой проблемы. Прекрасный пример – специальный отчет IPCC* (МГЭК) по улавливанию и хранению углекислого газа (2005), описывающий наработанные знания и опыт, а также препятствия, которые необходимо преодолеть для широкомасштабного внедрения этой технологии. Надежная техническая экспертиза уже существует, и сейчас мир уверенно движется к демонстрационной фазе. В дополнение к техническому развитию, начинают создаваться законодательные, нормативные, экономические и политические рамки, а также проводится оценка общественного мнения и поддержки. Целью Европы является запуск к 2015 году и возможность дальнейшей эксплуатации 12-ти крупномасштабных демонстрационных проектов для реализации широкого коммерческого внедрения их к 2020 году. Для достижения этой цели в январе 2008 Европейская Комиссия разработала пакет законов, названный "Действие климата и пакет по возобновляемой энергии", в котором предлагается Директива о геологическом хранении CO₂ и другие меры, способствующие развитию и безопасному использованию УХУ.

Ключевые вопросы о геологическом хранении CO₂

Европейское Сообщество Экспертов CO₂ГеоНет было создано при поддержке Европейской Комиссии как группа исследовательских организаций, способных вывести

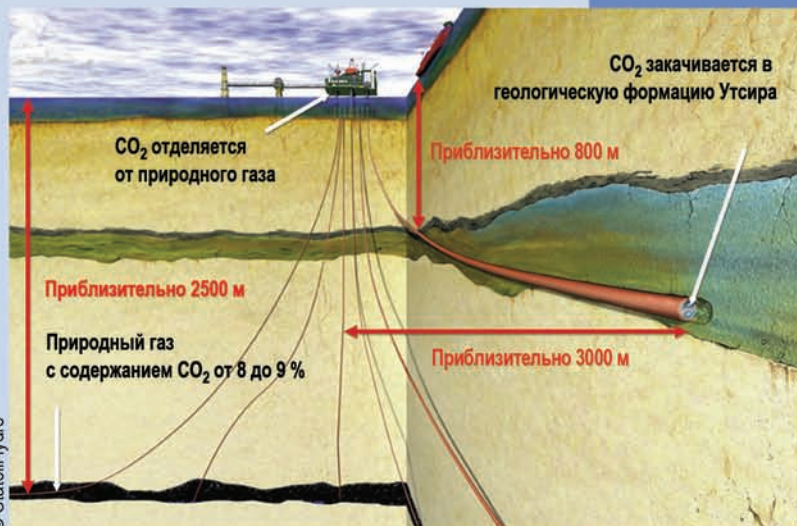


© BRGM im@gé

Европу на передовые позиции крупномасштабных международных исследований. Одной из целей CO₂ГеоНет является объединение чисто научной информации с техническими аспектами геологического хранения CO₂. Чтобы способствовать диалогу по особо существенным аспектам этой жизненно важной технологии, исследователи CO₂ГеоНет подготовили основные ответы на некоторые, чаще всего задаваемые вопросы. Далее мы объясним, как и в каких условиях возможно геологическое хранение CO₂, и каковы критерии для его безопасного и эффективного внедрения.

Рисунок 4
Вертикальный разрез участка хранения CO₂ Слейпнер (Sleipner), Норвегия. В природном газе, добытом на глубине 2500 метров содержится несколько процентов CO₂, который нужно удалять для соблюдения коммерческих стандартов. Вместо того, чтобы выпускать его в атмосферу, сжатый CO₂ закачивают почти на 1000-метровую глубину в песчаный водоносный горизонт* Утсира (Utsira).

Рисунок 3
На электростанциях CO₂ улавливается путем отделения его от других газов. После чего он сжимается и транспортируется по трубопроводу или на кораблях до участка геологического хранения: в глубоких соленых водоносных горизонтах, истощенных нефтяных и газовых месторождениях, не имеющих промышленного значения угольных пластах.



© StatoilHydro

Где и сколько CO₂ мы можем хранить под землей?

CO₂ не может быть просто закачан в любое место под землей. Сначала нужно определить подходящие вмещающие горные породы. Потенциальные коллекторы для геологического хранения CO₂ существуют по всему миру и их емкости вполне достаточны для внесения значительного вклада в дело смягчения техногенного изменения климата.

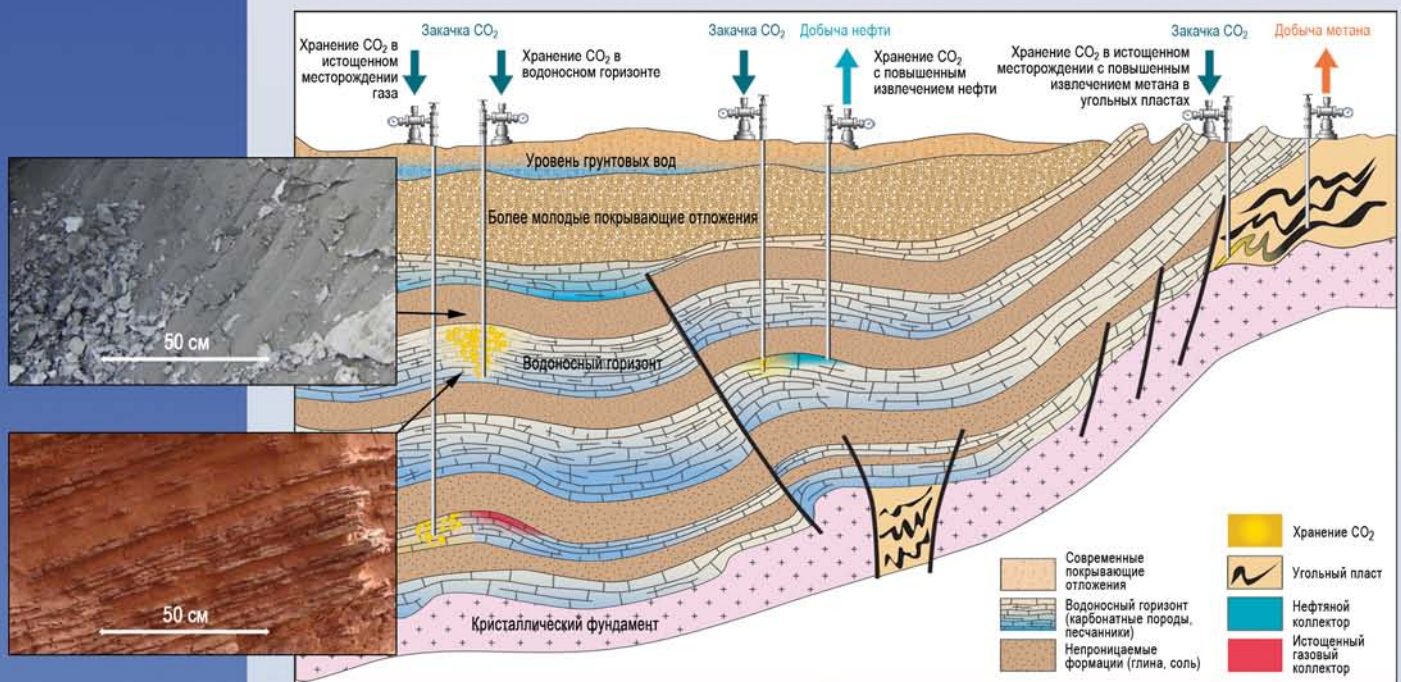


Рисунок 1
CO₂ закачивают в глубокие геологические слои пористых и проницаемых горных пород (см. песчаник в нижней вставке), которые перекрываются непроницаемыми породами (см. глинистую породу на верхней вставке), препятствующими выводу углекислого газа на поверхность. Основные возможности хранения представляют:

1. Истощенные нефтяные/газовые коллекторы с повышенным извлечением нефти/газа там, где это возможно;
2. Водоносные горизонты¹, содержащие соленую воду, непригодную для потребления человеком;
3. Глубокие, не имеющие промышленного значения угольные пласты, местами связанные с повышенным извлечением метана.

Существует три основные возможности хранения CO₂ (Рис. 1):

1. Истощенные нефтяные и газовые месторождения – хорошо известные благодаря разведке и разработке углеводородов, предлагают непосредственные возможности для хранения CO₂.
2. Соленые водоносные горизонты – предлагают больший потенциал для хранения, но обычно не так хорошо изучены.
3. Не имеющие промышленного значения угольные пласты – вариант будущего, когда проблема закачки огромных объемов CO₂ в низкопроницаемый* уголь будет решена.

Коллекторы

После помещения под землю в подходящую горную породу-коллектор, CO₂ скапливается в порах между зернами и в трещинах, таким образом вытесняя и замещая любые присутствующие там флюиды, такие как газ, вода или нефть. Поэтому подходящие для геологического хранения CO₂ вмещающие горные породы должны обладать высокой пористостью и проницаемостью. Подобные формации горных пород, являющиеся результатом осадконакопления в геологическом прошлом, в основном расположены в так называемых "осадочных бассейнах". В местах своего залегания эти проницаемые формации чередуются с непроницаемыми породами, которые могут слу-

жить водо- и газоупорными слоями. Осадочные бассейны часто содержат коллекторы углеводородов и месторождения природного углекислого газа, что доказывает их способность удерживать флюиды в течение долгих периодов времени. Естественные ловушки нефти, газа и даже чистого CO₂ удерживают в себе эти флюиды на протяжении миллионов лет.

На рисунках, иллюстрирующих возможные варианты хранения CO₂, подземное строение часто изображается слишком упрощенным, однородным, по своей структуре напоминающим слоеный пирог. В реальности, однако, оно состоит из неравномерно распределенных и местами разорванных трещинами формаций горных пород, комплекса образованного коллекторами и породами-покрышками, неоднородных структур. Углубленные знания объекта исследований и геологический научный опыт необходимы для оценки пригодности подземных структур, которые предлагаются для долговременного хранения углекислого газа.

Потенциальный коллектор для хранения CO₂ должен соответствовать многим критериям, основными из которых являются:

- значительная пористость, проницаемость горных пород и емкость хранилища;
- наличие перекрывающего непроницаемого слоя горной породы – так называемой "породы-покрышки" (например, глина, аргиллит, мергель, каменная соль), которая препятствует проникновению CO₂ из недр;

- присутствие “улавливающих структур” – иными словами наличие функций, присущих куполообразной породе-покрышке, которая может контролировать степень миграции CO₂ в формации хранения;
- залегание глубже, чем 800 метров, где давление и температуры достаточно высоки, чтобы хранить CO₂ в уплотненном жидком состоянии и тем самым максимально увеличивать хранящееся количество;
- отсутствие питьевой воды: CO₂ не будет закачиваться в воду, пригодную для потребления и использования человеком.

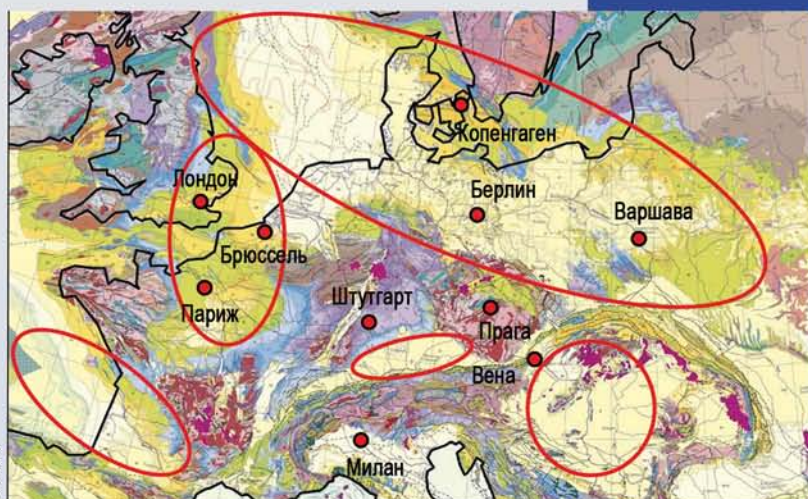
Где найти участки хранения в Европе

Осадочные бассейны широко распространены по всей Европе, например, на шельфе Северного моря или на суше вокруг горной цепи Альп (Рис. 2). Многие формации европейских осадочных бассейнов соответствуют критериям, необходимым для геологического хранения и в настоящее время картируются и характеризуются исследователями. Другие европейские области состоят из древней твердой коры, такой, из которой сложена большая часть Скандинавии и которая не содержит горных пород, подходящих для геологического хранения CO₂. Одним из примеров перспективного для хранения района является Южный Бассейн Пермского возраста, который простирается от Англии до Польши (представлен на Рисунке 2 самым большим эллипсом). На осадки воздействовали порообразующие процессы, которые оставили некоторое количество порового пространства заполненного соленой водой, нефтью или природным газом. Глинистые прослои, располагавшиеся между пористыми песчаниками, были уплотнены в низкопроницаемые слои, которые препятствуют продвижению флюидов. Большинство структур песчаника расположены на глубинах между 1 и 4 км, где давление достаточно велико для хранения CO₂ в плотной фазе. Содержание солей в подземных водах возрастает в этом интервале глубин от 100 г/л до 400 г/л, другими словами, это значительно солонее, чем морская вода (35 г/л). Движения в бассейне вызвали пластические деформации каменной соли, создавая сотни куполообразных структур, которые впоследствии стали ловушками для природного газа. Это те самые ловушки, которые изучаются как возможные участки хранения CO₂ и могут быть использованы в пилотных проектах.

Емкость хранилища

Знания о емкости хранилища углекислого газа нужны политикам, законодательным органам и операторам хранилищ. Оценки емкости хранилища обычно весьма приблизительны и основаны на пространственных размерах потенциально подходящих формаций пород. Емкость может быть рассчитана в разных масштабах, от национального масштаба для приблизительных оценок до масштаба бассейна и коллектора, т.е. для более детальных расчетов, в которых учитываются неравномерность и сложность строения реальной геологической структуры.

Объемная емкость: Опубликованные данные о национальных емкостях хранилищ основаны, главным образом, на расчетах объема пор в породах. Теоретически емкость хранилища для данной формации может быть рассчитана путем умножения ее площади на мощность, ее среднюю пористость и среднюю плотность CO₂ в условиях глубины залегания коллектора. Однако, т.к. объем пор уже занят водой, то лишь малая часть может быть использована для хранения, как принято считать, приблизительно 1-3%. Этот коэффи-



© BGR

циент емкости хранения затем применяется при оценке объемной емкости.

Реалистичная емкость: Более реалистичные оценки емкости можно сделать в отдельных местах хранения путем детальных исследований. Мощность структуры не постоянна, и свойства коллектора могут меняться и на небольших отрезках. Знания о размере, форме и геологических свойствах структур позволяют уменьшить неточности при вычислениях объема. Основанное на этих данных компьютерное моделирование может быть использовано для прогнозирования закачки CO₂ и его движения внутри коллектора, для того, чтобы оценить реалистичную емкость хранилища.

Реализуемая емкость: Емкость - это не только вопрос физики горной породы. Социально-экономические факторы также влияют на то, будет ли использоваться подходящее место хранения. Например, перемещение CO₂ от источника до места хранения будет регулироваться затратами на транспортировку. Емкость будет зависеть и от чистоты CO₂, т.к. присутствие других газов уменьшит в коллекторе объем, доступный для CO₂. И наконец, политические взгляды и признание общественности могут стать решающими в вопросе, будет ли на самом деле эксплуатироваться имеющаяся емкость коллектора.

Завершая сказанное, отметим: мы знаем, что емкость хранения CO₂ в Европе - большая, даже учитывая неуверенность, связанную со сложностью строения коллектора и его неоднородной структурой, а также и социально-экономическими факторами. Европейский проект GESTCO (GESTCO*) оценил емкость хранения CO₂ месторождений углеводородов в Северном море и вокруг него в объеме 37 Гт, что могло бы позволить большим установкам в этом регионе закачивать туда CO₂ в течение нескольких десятилетий. Обновление данных и последующее картирование емкости хранилищ в Европе является предметом текущих исследований в отдельных странах-членах Евросоюза и было исследовано в рамках проекта ЕС Геоемкость (EU Geosaracity*) для всей Европы.

Рисунок 2
Геологическая карта Европы показывающая расположение основных осадочных бассейнов (красные эллипсы), в которых могут быть найдены подходящие коллекторы для хранения CO₂ (на основе геологической карты Европы масштаба 1:5 000 000).



Как можно транспортировать и закачивать большие количества CO₂?

После улавливания на промышленных объектах CO₂ сжимают, транспортируют и затем закачивают в породу-коллектор через одну или несколько скважин. Вся цепочка должна быть оптимизирована для возможного хранения нескольких миллионов тонн CO₂ в год.

Сжатие

CO₂ сжимается до состояния плотной жидкости, которая занимает значительно меньше места, чем газ.

В результате отделения CO₂ от газа на электростанциях или промышленных объектах, высоко концентрированный поток CO₂ подвергают дегидратированию (обезвоживанию) и сжатию, способствуя более эффективной транспортировке и хранению (**Рис. 1**). Дегидратация, необходимая во избежание коррозии оборудования и поврежденной инфраструктуры, производится под большим давлением с образованием гидратов (кристаллов твердого льда, которые могут закупорить оборудование и трубы). Компрессия (сжатие) производится одновременно с дегидратацией, это многоступенчатый процесс: циклы сжатия, охлаждения и отделения воды повторяются. Давление, температура и содержание воды – все должно быть адаптировано применимо к виду транспортировки и требованиям к давлению в месте хранения. Ключевыми факторами для разработки компрессионного оборудования являются скорость потока, давление всасывания и нагнетания, теплоемкость газа и производительность компрессора. Технология для компрессии имеется и уже широко применяется во многих промышленных сферах.

ные источники CO₂ расположены очень далеко от подходящего коллектора. Суда, используемые для транспортировки сжиженного углеводородного газа (СУГ), пригодны и для транспортировки CO₂. В частности, полухлаждающие системы сжимают и охлаждают, и таким образом CO₂ может транспортироваться в жидком виде. Вместимость новейших кораблей СУГ составляет более 200 000 м³, они способны перевезти 230 000 тонн углекислого газа. Тем не менее, морской транспорт не может обеспечить непрерывной плавной логистики, и в порту необходимо иметь оборудование для промежуточного хранения и перезагрузки CO₂.

Транспортировка по трубопроводу на сегодняшний день используется для больших объемов CO₂, преимущественно нефтяными компаниями, применяющими методiku повышенного извлечения нефти* (в мире существует почти 3000 км трубопровода для CO₂, в основном в Соединенных Штатах). Это экономичнее, чем транспортировка судами, и дает преимущество непрерывного потока, движущегося от установки улавливания до места хранения. Все существующие трубопроводы для CO₂ эксплуатируются при высоком давлении в сверхкритических условиях для CO₂, в которых он ведет себя как газ, но имеет плотность жидкости. Три важных фактора определяют работу трубопровода: его диаметр, давление по всей длине и, соответственно, толщина его стенок.

Рисунок 1
Этапы геологического хранения CO₂. Чтобы доставить CO₂ от места его выброса к месту его безопасного и долговременного хранения, необходимо пройти всю цепочку операций, включая улавливание, сжатие, транспортировку и закачку.

Транспортировка

CO₂ можно транспортировать морским судном или по трубопроводу. Транспортировка CO₂ кораблями в настоящее время производится только в очень маленьких объемах (10 000-15 000 м³) для промышленных целей, но в будущем это может стать привлекательной возможностью для проектов по УХУ в тех случаях, когда прибреж-

Закачка

Когда CO₂ прибывает на участок хранения, он под давлением закачивается в коллектор (**Рис. 2**).

Давление закачивания должно быть значительно выше, чем давление в коллекторе, чтобы вытеснить из точки закачки CO₂ находящиеся в коллекторе флюиды. Количество закачивающих скважин зависит от количества предназначенного для хранения CO₂, от скорости закачивания (объем CO₂, закачанного в час), проницаемости и мощности коллектора, максимально безопасного давления закачки и типа скважины. Так как основной целью является долгосрочное удерживание CO₂, мы должны быть уверены в гидравлической целостности геологической структуры. Большие скорости закачки могут вызвать возрастание давления в точке закачивания, особенно в низкопроницаемых структурах. Как правило, давление закачки не должно превышать давления разрыва горной породы, т.к. это может вызвать повреждения коллектора или перекрывающего слоя. Геомеханический анализ и модели используются для определения максимально допустимого давления, которое позволит избежать трещиноватости формации. Химические процессы могут влиять на скорость, с которой CO₂ можно закачивать в формацию. В зависимости от типа породы-коллектора, состава флюидов и условий в коллекторе (таких как



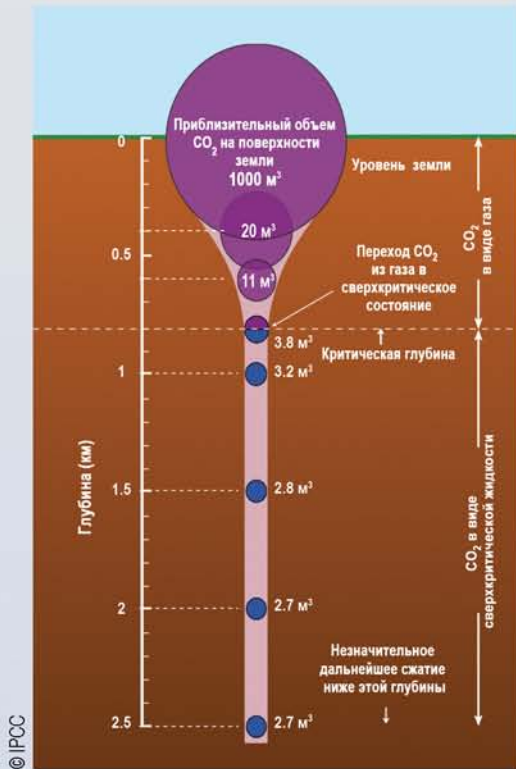


Рисунок 2
После закачки под землю, CO_2 приобретает плотное сверхкритическое* состояние примерно на глубине 0,8 км. Его объем значительно уменьшается от 1000 м^3 на поверхности до $2,7 \text{ м}^3$ на глубине 2 км. Это одна из причин, по которой геологическое хранение больших количеств CO_2 выглядит так привлекательно.

температура, давление, объем, концентрация и т.д.), около скважин могут начаться процессы растворения и осаждения минералов. Это может привести к увеличению или уменьшению скоростей закачки. После того как CO_2 закачан, часть его растворяется в соленой воде коллектора и pH* понемногу понижается, поддерживаясь растворением карбонатных минералов, имеющихся во вмещающей породе. Карбонаты первыми из минералов начинают растворяться, т.к. их скорость реакции очень высока и растворение начинается сразу же после начала закачки. Процесс растворения может увеличить пористость горных пород и закачиваемость*. Однако, после растворения карбонатные минералы могут осадиться повторно и цементировать породу вокруг скважины. Высокие скорости потока могут быть использованы для ограничения уменьшения проницаемости вблизи скважины, тем самым вытесняя области геохимического равновесия осаждения дальше. Высушивание – это другой феномен, вызванный закачкой. После окислительной фазы остаточная вода вокруг скважины, через которую производилось закачивание, растворяется в закачанном сухом газе, который, в свою очередь, концентрирует химические частицы в соляном растворе*. Минералы (такие как соли) могут осадиться, когда раствор достаточно сконцентрирован, таким образом уменьшая проницаемость вокруг скважины. Эти результаты закачиваемости зависят от сложных взаимодействующих процессов, которые происходят локально вокруг скважины, что также сильно зависит от вре-

мени и расстояния до скважины. Для оценки таких эффектов используется цифровое моделирование. Для предотвращения процессов, которые могут ограничить закачку желаемого количества CO_2 , необходимо тщательно установить скорости закачиваемого потока.

Состав потока CO_2

Состав и чистота потока CO_2 , являющиеся результатом процесса улавливания, оказывают значительное влияние на все последующие аспекты проекта хранения CO_2 . Присутствие нескольких процентов других веществ, таких как вода, сероводород (H_2S), окислы серы и азота (SO_x , NO_x), азот (N_2) и кислород (O_2) будет влиять на физические и химические свойства CO_2 , и скажется на его поведении и воздействиях. Поэтому присутствие подобных веществ должно быть тщательно учтено при проектировании этапов компрессии, транспортировки и закачки, а также при регулировании эксплуатационных условий и оборудования.

В заключение можно сказать, что транспортировка и закачка больших количеств CO_2 уже возможна. Тем не менее, если геологическое хранение CO_2 будет широко применяться, все перечисленные стадии должны быть спланированы для каждого отдельного проекта хранения. Ключевыми параметрами являются термодинамические свойства потока CO_2 (Рис. 3), скорость потока и условия в коллекторе и над ним.

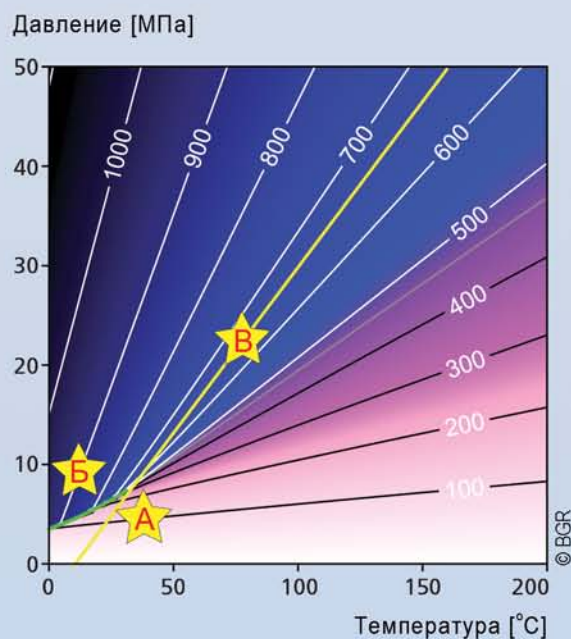


Рисунок 3
Плотность чистого CO_2 (кг/м^3) как функция температуры и давления. Желтая линия соответствует типичному градиенту давления и температуры в осадочном бассейне. На глубине более 800 м (~8 МПа), условия резервуара способствуют высоким плотностям (синий оттенок). Зеленая дуга – это граница между газообразной и жидкой фазой CO_2 . Типичные условия давления и температуры для улавливания, транспортировки и хранения отмечены буквами А, Б и В.

Что происходит с CO₂ в коллекторе хранения?

Как только CO₂ закачан в коллектор, он начинает активно заполнять поровое пространство под породой покрывшкой. С течением времени часть CO₂ растворится и в конечном счете превратится в минералы. Эти процессы происходят в разных масштабах времени и способствуют непрерывному удерживанию.

Механизмы удерживания

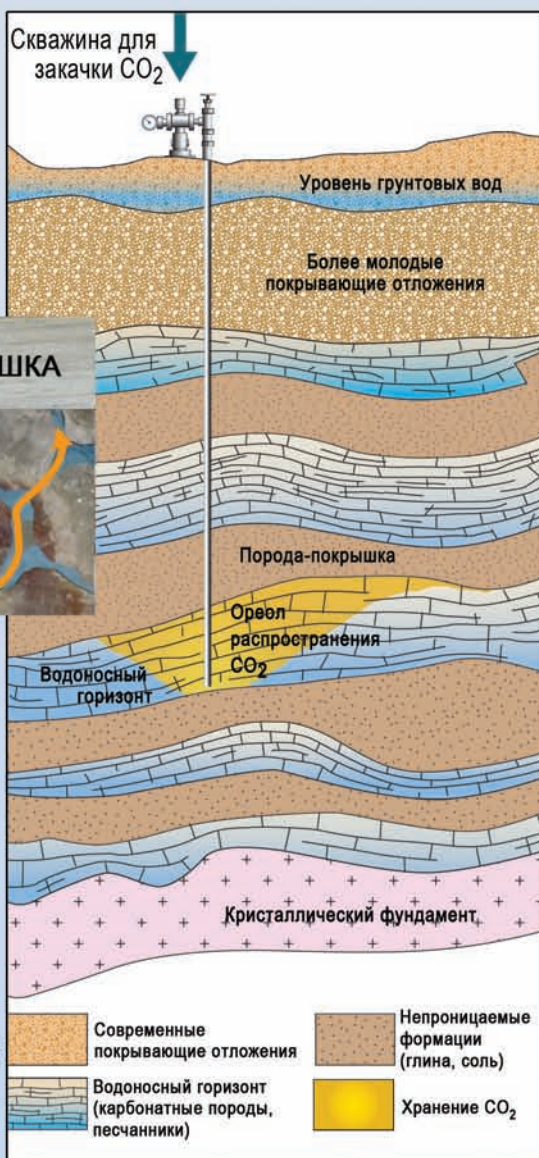
Когда CO₂ закачан в коллектор, он заполняет поровое пространство горных пород, которое в большинстве случаев уже заполнено соляными растворами, то есть соленой водой.

После закачивания CO₂ начинают действовать следующие механизмы. Первый считается самым важным и препятствует выходу CO₂ на поверхность. Остальные три имеют тенденцию со временем увеличивать эффективность и безопасность хранения.

Вид под микроскопом.



Рисунок 1
Закачанный CO₂, который легче воды, как правило поднимается и останавливается перекрывающими непроницаемыми породами.



1. Накопление под породой-покрывшкой (структурное удерживание)

Так как плотный CO₂ легче воды, он начинает подниматься вверх. Это движение прекращается, когда CO₂ встречается со слоем непроницаемой породы, так называемой "породой-покрывшкой". В основном состоящая из глины или соли, эта порода-покрывшка действует как ловушка, препятствующая поднятию CO₂ куда-либо дальше, что приводит к его накоплению непосредственно под ней. **Рисунок 1** иллюстрирует восходящее движение CO₂ через поровое пространство горной породы (голубой цвет) до того, как он достигнет породы-покрывшки.

2. Связывание в мелких порах (остаточное удерживание)

Остаточное связывание происходит, когда поровое пространство в породе-коллекторе такое узкое, что CO₂ не может более двигаться вверх, несмотря на разницу в плотности с окружающей водой. Этот процесс проявляется, в основном, во время миграции CO₂ и обычно может связать несколько процентов закачанного CO₂, в зависимости от свойств горной породы-коллектора.

3. Растворение (удерживание путем растворения)

Малая часть закачанного CO₂ растворяется или переносится в раствор через соленую воду, которая уже присутствует в поровом пространстве коллектора. Результатом растворения является то, что вода с растворенным в ней CO₂ тяжелее, чем вода без него, и это приводит к опусканию воды с растворенным CO₂ на дно резервуара. Скорость растворения зависит от интенсивности контакта CO₂ с раствором. Количество CO₂, которое может раствориться, ограничено максимальной концентрацией. Однако, из-за движения закачанного CO₂ вверх и воды с растворенным в ней CO₂ вниз, происходит постоянное обновление контакта между раствором и CO₂, что увеличивает количество CO₂, которое может быть растворено. Эти процессы относительно медленны, т.к. происходят в узких порах. Приблизительные оценки в проекте Слейпнер показывают, что примерно 15% закачанного CO₂ растворилось в течение 10 лет после закачки.

4. Минерализация (минеральное удерживание)

CO₂, в особенности в комбинации с соляным раствором в коллекторе, может вступать в реакции с минералами, слагающими горную породу. Определенные минералы могут растворяться, в то время как другие могут осадаться в зависимости от pH и минералов, слагающих породу (**Рис. 2**). По некоторым оценкам на Слейпнере только относительно малая часть CO₂ будет связана путем минерализации через очень длительный период времени. Через 10 000 лет только 5% закачанного CO₂ должно было бы минерализоваться,



Рисунок 2
Плотный CO₂ поднимается вверх (светло-голубые пузырьки), растворяется и вступает в реакцию с зернами породы, что приводит к осаждению карбонатных минералов на поверхности зерен (белье).

тогда как 95% было бы растворено без оставшегося в виде отдельной плотной фазы CO₂.

Относительное значение этих механизмов удерживания зависит от характеристик каждого конкретного объекта исследования. Например, в куполообразных коллекторах, CO₂ должен оставаться, в основном, в плотной фазе даже спустя очень длительное время, тогда как в плоском коллекторе, каким является Слейпнер, большая часть закачанного CO₂ будет растворена или минерализована. Изменение пропорций CO₂ в различных механизмах удерживания на примере Слейпнера показана на **Рисунке 3**.

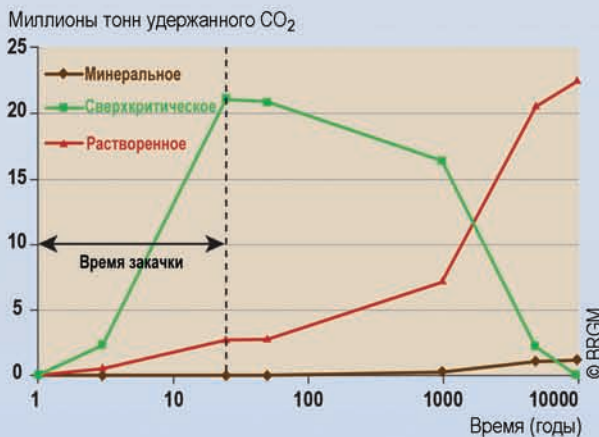


Рисунок 3
Развитие CO₂ в его различных формах в коллекторе Слейпнер согласно моделированию потока. CO₂ удерживается в сверхкритическом состоянии механизмами 1 и 2, в растворенном состоянии – механизмом 3, и в минеральной форме механизмом 4.

Откуда мы все это знаем?

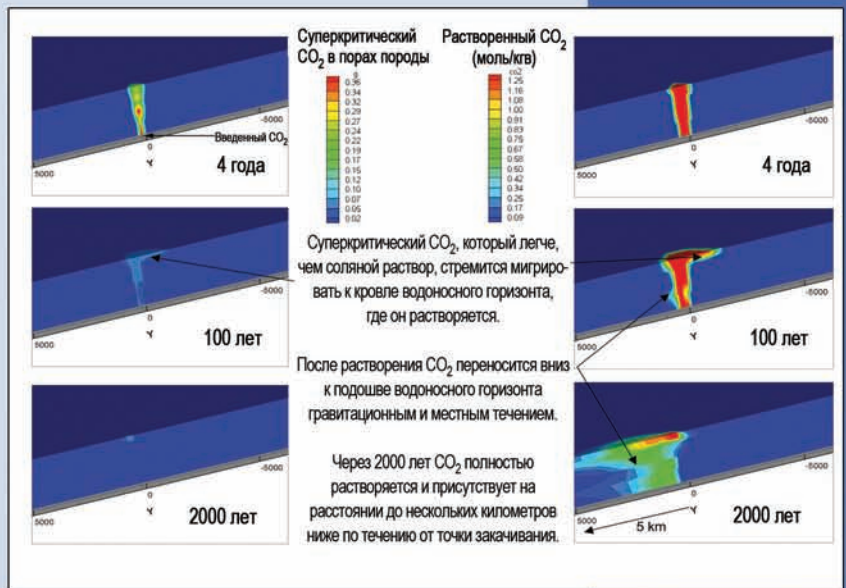
Знания об этих процессах набираются из четырех основных источников информации:

- **Лабораторные измерения:** мелкомасштабные эксперименты в области минерализации, потока и растворения могут быть проведены на образцах горных

пород, позволяя понять кратковременные и мелкомасштабные процессы.

- **Цифровое моделирование:** вычислительные программы были разработаны для того, чтоб использовать их для предсказания поведения CO₂ на протяжении более длительного промежутка времени (**Рис. 4**). Лабораторные эксперименты используются для калибровки цифрового моделирования.
- **Изучение природных коллекторов CO₂**, в которых CO₂ (в основном вулканического происхождения) удерживался под землей в течение долгих периодов времени, зачастую миллионов лет. Подобные условия называют “природным аналогом”*. Эти объекты обеспечивают нас информацией о поведении газа и очень долгосрочных последствиях присутствия CO₂ под землей.
- **Наблюдение за существующими местами хранения CO₂ в демонстрационных проектах**, таких как Слейпнер (в открытом море Норвегии), Вейбуэн (Канада), Айн Салах (Алжир) и K12-Б (в открытом море в Нидерландах). Результаты краткосрочного моделирования можно сравнить с настоящими полевыми данными, что поможет совершенствованию моделей.

Рисунок 4
Трёхмерное моделирование движения CO₂ в водоносном горизонте, после закачки 150000 тонн спустя 4 года в водоносном горизонте структуры Доугер во Франции. Здесь изображены CO₂ в сверхкритическом состоянии (слева) и CO₂, растворенный в соленой воде (справа) через 4, 100 и 2000 лет после начала закачки. Модель основана на данных полевых исследований и экспериментах.



Только благодаря постоянной привязке и перепроверке этих четырех источников информации можно собрать надежные знания обо всех процессах, происходящих под нашими ногами – на глубине в 1000 метров.

В заключение отметим, что безопасность мест хранения CO₂ имеет тенденцию со временем увеличиваться. Самая важная задача – это найти коллектор с подходящей породой-покрышкой сверху, которая будет удерживать CO₂ (структурное удерживание). Все процессы относящиеся к растворению, минерализации и остаточному улавливанию служат для предотвращения выхода CO₂ на поверхность.

Может ли CO₂ вытекать из коллектора и, если да, то какими могут быть последствия?

На основании исследований природных систем, предполагается, что на тщательно выбранных местах хранения не произойдет какой-либо значительной утечки. Природные коллекторы, содержащие газ, помогают нам понять условия, при которых газ удерживается или выпускается. Кроме того, места выхода газа помогают нам понять, к каким последствиям могут привести возможные утечки CO₂.

Пути утечки

В основном потенциальные пути утечки либо созданы человеком (например, глубокие скважины), либо являются природными (например, системы трещин и разломов). Как в действующих, так и заброшенных скважинах пути утечек могут возникать потому, что, во-первых, они образуют прямое соединение между поверхностью и резервуаром, и во-вторых, они состоят из искусственных материалов, которые могут подвергаться коррозии спустя длительные периоды времени (Рис. 1). Дополнительная сложность состоит в том, что разные скважины созданы с использованием разных технологий, и поэтому более новые скважины в основном безопаснее старых. В любом случае, предполагается, что опасность утечки через скважины низка, т.к. и более новые, и старые скважины можно очень эффективно контролировать, используя чувствительные геохимические и геофизические методы, и потому что в нефтяной промышленности для любых коррективных мер уже существует необходимая технология. С утечками по природным разломам и трещинам, которые могут существовать в породе-покрышке или в перекрывающих породах* уже сложнее, потому что мы имеем дело с непостоянными, площадными свойствами с переменной проницаемостью. Хорошее научное и техническое понимание как протекающих, так и непротекающих систем, позволит разрабатывать проекты хранения CO₂ с такими же характеристиками, что и у природных естественных коллекторов, удерживающих CO₂ и метан

Рисунок 1
Возможные пути для CO₂ в скважине.
Выход через измененный материал (в, г, д) или вдоль границ раздела (а, б, е).



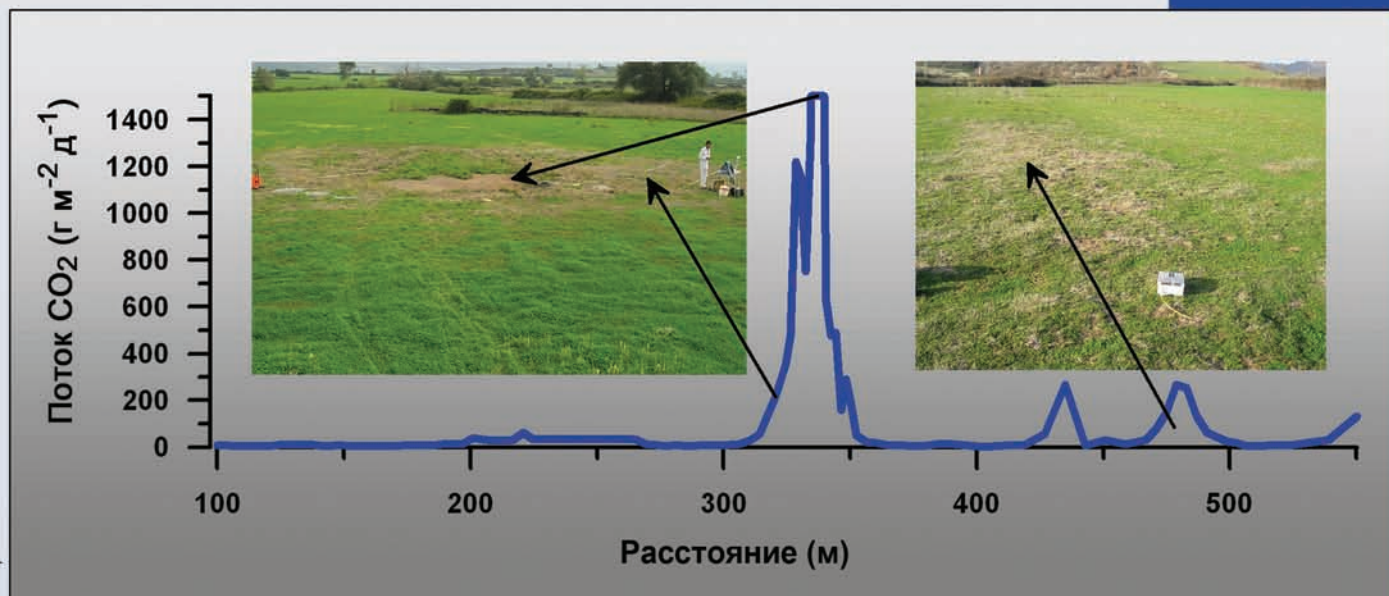
на протяжении временных периодов от тысяч до миллионов лет.

Природные аналоги: извлеченные уроки

Природные системы (так называемые "аналоги") – это бесценные источники информации для улучшения нашего понимания движения газа глубоко под землей и природного газообмена между землей и атмосферой. Основные выводы, полученные при исследованиях многочисленных протекающих и непротекающих природных газовых коллекторов:

- при подходящих геологических условиях природный газ может удерживаться на протяжении сроков от сотен тысяч до миллионов лет;
- изолированные газовые резервуары и карманы существуют даже в наименее благоприятных геологических условиях (вулканических районах);
- перемещение сколько-нибудь значительного количества газа требует адвекции (т.е. управляемого давлением потока), потому что диффузия – это очень медленный процесс;
- для появления адвекции условия жидкостей в коллекторе должны быть близкими к литостатическому давлению*, чтобы разломы и трещины оставить открытыми или механически создать новые пути;
- территории, на которых природный газ выходит на поверхность, расположены почти исключительно в сильно трещиноватых вулканических или сейсмически активных районах, с газовыми выходами, расположенными вдоль активных или недавно активизированных разломов;
- значительная утечка газа случается лишь изредка и имеет тенденцию происходить в сильно трещиноватых вулканических и геотермальных областях, где CO₂ непрерывно производится в результате природных процессов;
- газовые аномалии на поверхности обычно появляются как локализованные пятна, которые имеют ограниченное пространственное влияние на приповерхностную окружающую среду.

Таким образом, для того чтобы произошла утечка, необходимо сочетание ряда конкретных условий. Следовательно, очень маловероятно, что на хорошо выбранном и тщательно спроектированном геологическом участке для хранения CO₂ произойдет утечка. Несмотря на то, что возможность утечки мала, изучение связанных с ней процессов и возможных их последствий должно быть полным, с целью правильного выбора, проектирования и эксплуатации максимально безопасного геологического участка для хранения CO₂.



Влияние на людей

Мы вдыхаем CO_2 все время. CO_2 опасен для здоровья людей только в очень больших концентрациях со значениями свыше 50 000 мд (5%), он вызывает головные боли, головокружение и тошноту. Значения выше этого уровня могут привести к смерти, если воздействие будет слишком долгим, особенно из-за асфиксии, когда концентрация кислорода в воздухе падает ниже 16%-ного уровня, необходимого для поддержания человеческой жизни. Однако, если CO_2 вытекает на открытых или пологих участках, он быстро рассеивается в воздухе даже при слабых ветрах. Потенциальный риск для населения, таким образом, ограничивается утечкой в закрытых средах и топографических впадинах, где концентрации могут возрасти, потому что CO_2 плотнее воздуха и имеет тенденцию скапливаться близко к земле. Знания свойств зоны дегазации полезно для предотвращения рисков и управления ими. В реальности многие люди живут в областях, характеризующихся ежедневной эманацией природного газа. Например, в Италии, в Чампино близ Рима дома расположены всего лишь в 30 метрах от мест газовых выходов на поверхность, где концентрация CO_2 в почве достигает 90% и приблизительно 7 тонн CO_2 ежедневно попадает в атмосферу. Местные жители избегают какой-либо опасности соблюдением простых мер безопасности, таких как не спать в подвале и держать дома хорошо проветриваемыми.

Влияние на окружающую среду

Потенциальные влияния на экосистемы могут отличаться в зависимости от того, находится ли участок хранения в открытом море или на суше.

В морских экосистемах основным эффектом от утечки CO_2 становится местное понижение pH и связанное с этим влияние, в первую очередь, на животных, которые живут на морском дне и не могут покинуть мест обитания. Тем не менее, последствия пространственно ограничены и экосистема проявляет признаки восстановления вскоре после того, как утечка ослабевает. Влияние на наземную экосистему в целом можно охарактеризовать следующим образом:

- **растительность** – хотя наличие газообразного CO_2 в почве при его концентрации до 20-30% на самом деле может благоприятно влиять на плодородность и увеличивать скорость роста определенных растений, значения выше этого порога могут оказаться смертельными для некоторых, но не для всех растений. Это эффект локальный и особо проявляется вокруг мест выхода газа на поверхность, однако растительность остается высокой и здоровой только на расстоянии далее нескольких метров от выхода газа (Рис. 2).
- **качество подземных вод** – химический состав подземных вод может изменяться из-за добавления CO_2 , так как вода становится более кислой и элементы из горных пород и минералов водоносного горизонта могут высвободиться и попадать в воду. Даже если CO_2 просочится в водоносный горизонт с питьевой водой, эффект останется локальным, его количественное влияние в настоящее время изучается учеными. Интересно, что многие водоносные горизонты Европы обогащены природным CO_2 , и эта вода на самом деле разливается по бутылкам и продается как "газированная минеральная вода".
- **целостность пород** – закисление грунтовых вод может привести к растворению пород, снижению структурной целостности и образованию провалов. Тем не менее, этот тип влияния может произойти только при очень специфических геологических и гидрогеологических условиях (тектоническая активность, высокая скорость потока водоносных горизонтов, богатая карбонатами минералогия), которые вряд ли могут возникнуть над местом искусственного геологического хранения.

В заключение можно отметить, что поскольку влияние любой гипотетической утечки CO_2 будет зависеть от конкретного участка, доскональное знание конкретных геологических и структурных условий позволит нам определить любые возможные пути миграции газа, выбрать места с наименьшей возможностью утечки CO_2 , предсказать поведение газа и таким образом оценить и предотвратить любое значительное влияние на людей и экосистему.

Рисунок 2
Влияние на растительность утечки CO_2 с повышенным (слева) и пониженным (справа) потоком. Влияние ограничено территорией, на которой CO_2 выходит наружу.

Как можно контролировать участки хранения в глубине и на поверхности земли?

Все участки хранения CO₂ необходимо контролировать для производственных целей, безопасности, по экологическим, социальным и экономическим причинам. Стратегия должна быть составлена таким образом, чтобы определить, что именно будет контролироваться и как.

Зачем нам нужен мониторинг?

Мониторинг эффективности участка будет иметь решающее значение для достижения главной цели геологического хранения CO₂, а именно длительной изоляции антропогенного CO₂. Причин для мониторинга участков хранения много, в том числе:

- **Производственные:** для контроля и оптимизации процесса закачивания CO₂.
- **Безопасность и окружающая среда:** для снижения или предотвращения любого воздействия на людей, дикую природу и экосистему в окрестностях участка хранения и для уверенности в смягчении последствий глобального изменения климата.
- **Социальные:** представлять общественности информацию, необходимую для понимания безопасности участка хранения и, чтобы помочь получить общественное доверие.
- **Финансовые:** создание доверия рынка к технологии УХУ и для подтверждения объемов закачанного CO₂, чтобы они были учтены как «непроизведенные выбросы» на следующих этапах работы Европейской Системы Торговли Выбросами (СТВ).

Мониторинг как начального состояния окружающей среды (так называемого «базового»), так и последующей характеристики участка хранения является важным нормативным требованием Директивы ЕС по УХУ, опубликованной 23-го апреля 2009 года. Операторы должны уметь продемонстрировать, что характеристика участка хранения соответствует законам и будет продолжать соответствовать им в долгосрочной перспективе. Мониторинг – это важный компонент, который будет уменьшать неясности в характеристике участка хранения, он всегда

Каковы цели мониторинга?

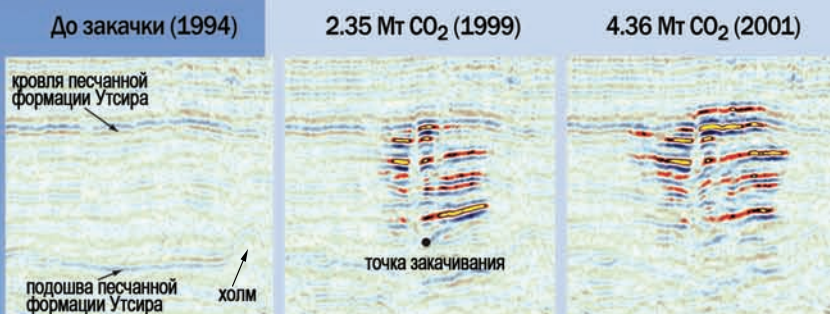
Мониторинг может быть направлен на достижение различных целей и действий в различных частях участка хранения, таких как:

- Отображение ореола распространения – отсле-

живание передвижения CO₂ от участка закачки. Это позволяет получить ключевые данные для настройки моделей, которые предсказывают будущее распространение CO₂ на участке хранения. Множество готовых методов уже имеются, особенно рекомендуются повторные исследования методом сейсмической разведки, которые успешно применялись в нескольких демонстрационных и экспериментальных проектах (Рис. 1).

- Целостность перекрывающей породы. Необходимо оценить, изолирован ли CO₂ в коллекторе хранилища и обеспечить раннее предупреждение о любых неожиданных передвижениях CO₂ вверх. Это может быть особенно важным в проекте на этапе закачки, когда давление в коллекторе значительно, но временно, возрастает.
- Целостность скважины. Это важный момент, т.к. глубокие скважины могут потенциально обеспечивать прямой путь для миграции CO₂ вверх. За скважинами закачивания CO₂, любыми наблюдательными или уже существующими заброшенными скважинами необходимо должным образом следить в течение стадии закачивания и в дальнейшем во избежание внезапного выхода CO₂ наружу. Мониторинг используется и для подтверждения того, что все скважины были эффективно запечатаны, если в них более нет необходимости. Существующие геохимические и геофизические системы мониторинга, являющиеся обычной практикой в нефтяной и газовой индустрии, могут быть установлены в скважинах или над ними для обеспечения раннего предупреждения и безопасности.
- Миграция в перекрывающих отложениях. На участках хранения, где дополнительные перекрывающие сверху горные породы обладают свойствами, схожими со свойствами пород-покрышек, перекрывающих отложения, могут формировать ключевой компонент в уменьшении риска попадания CO₂ в море или в атмосферу. Если в ходе мониторинга коллектора или вокруг породы-покрышки обнаружится внезапная утечка через породу-покрышку, мониторинг перекрывающих пород будет необходим. Многие методы, используемые для отображения ореола распространения или мониторинга целостности перекрывающей породы, могут быть использованы для перекрывающих пород.
- Утечки с поверхности, определение и измерение состояния атмосферы. Для того, чтобы быть уверенным, что закачанное CO₂ не мигрировало на поверхность, весь диапазон геохимических, биохимических методов и методов дистанционного зондирования применяют для обнаружения утечки, оценки и мониторинга распространения CO₂ в почве и рассеивания его в атмосфере или в морской среде (Рис. 2).

Рисунок 1
Сейсмическое изображение для мониторинга ореола распространения CO₂* в пилотном проекте Слейпнер до закачки (которая началась в 1996) и после закачки (соответственно спустя 3 и 5 лет).



- Количество закачанного CO₂ для законодательного и финансового контроля. Хотя количество закачанного CO₂ можно легко измерить у основания скважины, количественные замеры в коллекторе технически очень проблематичны. Если происходит утечка рядом с поверхностью, то количество высвободившегося CO₂ должно быть посчитано для национального реестра парниковых газов и будущих планов СТВ.
- Движение грунта и микросейсмичность*. Возросшее из-за закачивания CO₂ давление в коллекторе в особых случаях может увеличить вероятность микросейсмической активности и маломасштабных передвижений грунта. Методы микросейсмического мониторинга и дистанционные методы (разведка с самолетов или спутников) дают возможность измерять даже очень маленькие искривления грунта.

Как производится мониторинг?

Широкий спектр методов мониторинга уже был применен в действующих демонстрационных и исследовательских проектах. Они включают прямые методы наблюдения за CO₂ и те, которые косвенно измеряют эффект его воздействия на горные породы, жидкости, газы и экологию. Прямые измерения включают в себя анализы жидкостей из глубоких скважин или измерения концентраций газа в почве или атмосфере. Косвенные методы включают геофизическую разведку и мониторинг изменений давления в скважинах или изменений pH в подземных водах.

Мониторинг необходим как для участков хранения на суше, так и в открытом море. Выбор подходящего метода мониторинга будет зависеть от технических и геологических характеристик участка, и от целей мониторинга. Уже существует широкий спектр методов мониторинга (**Рис. 3**), многие из которых общепризнаны в нефтяной и газовой промышленности; эти методы адаптируются к ситуации с CO₂. Исследования с целью оптимизации существующих методов или развития инновационных методов также ведутся с целью улучшения точности измерений и их надежности, удешевления, автоматизации производства и демонстрации эффективности.

Стратегия мониторинга

При разработке стратегии мониторинга должно быть принято много решений, зависящих от геологических и инженерных условий, специфических для каждого конкретного участка хранения, таких как геометрия коллектора и глубина, ожидаемое распространение ореола CO₂, возможные пути утечки, перекрывающая геология, время закачивания и скорость потока, а также поверхностные характеристики, такие как топография, плотность населения, инфраструктура и экосистемы. Сразу после принятия решений относительно наиболее подходящих методов и мест измерения, базовые исследования должны проводиться до начала операций по закачиванию, чтобы служить уровнем отсчета для всех будущих измерений. Наконец, каждая программа мониторинга должна быть гибкой, чтобы она могла развиваться даже в том случае, если будет меняться сам проект хранения. Стратегия мониторинга, способная интегрировать все эти вопросы, в то же время, повышая эффективность затрат, образует важнейший компонент в анализе рисков и в подтверждении безопасности участка и его эффективности.

В заключение отметим: мы знаем, что мониторинг участков хранения CO₂ проводят с использованием различных методов, имеющихся на рынке или находящихся в стадии разработки. В настоящий момент исследования ведутся не только в области развития нового оборудования (например, для использования на морском дне), но также для оптимизации эффективности мониторинга и уменьшения расходов.



© CO₂-GeoNet

Рисунок 2
Буй для мониторинга энергоснабжающими солнечными батареями, плот и устройство для взятия образцов газа со дна моря.

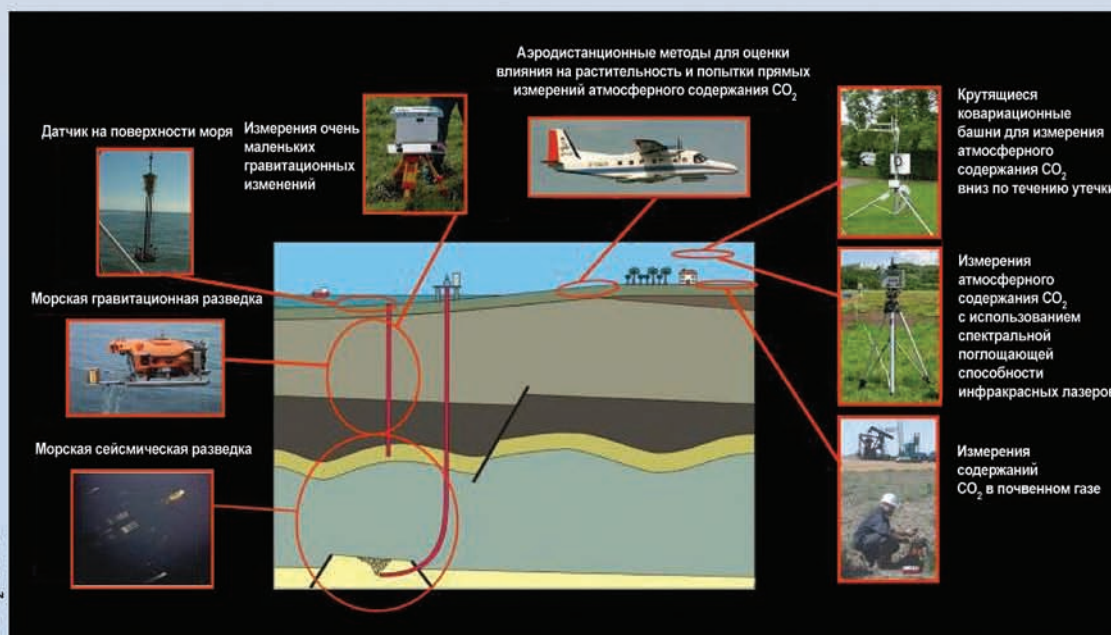


Рисунок 3
Небольшая выборка, показывающая спектр методов, имеющихся для мониторинга различных компонентов системы хранения CO₂.

Какие критерии безопасности должны быть установлены и учтены?

В целях обеспечения безопасности и эффективности хранения, условия для разработки и производства проекта должны быть установлены законодательными органами и учтены операторами.

Несмотря на то, что геологическое хранение CO₂ в настоящее время широко признано как надежный вариант для смягчения изменения климата, критерии безопасности с учетом человеческого здоровья и местной окружающей среды должны быть урегулированы до того, как начнутся работы в промышленном масштабе. Такие критерии могут быть установлены как требования, введенные законодательными органами для операторов – для большей уверенности в том, что влияния на здоровье местного населения, безопасность и окружающую среду (включая грунтовые воды) будут незначительными в ближайшей, средней и долгосрочной перспективе.

Одним из ключевых вопросов геологического хранения CO₂ является то, что оно должно быть постоянным, следовательно, на участках хранения не предполагается утечек. Тем не менее, “что если?” - сценарий означает, что риски должны быть оценены, и от обслуживающих компаний требуется соблюдение мер, предотвращающих какую-либо утечку или аномальное поведение участков хранения. Согласно МГЭИК, закачанный CO₂ должен оставаться под землей по крайней мере 1000 лет, которые позволят содержанию CO₂ в атмосфере стабилизироваться или сократиться путем природного обмена с водами океана, тем самым понижая рост температуры поверхности земли из-за глобального потепления. Однако локальные последствия должны быть оценены по шкале времени от дней до тысяч лет. Можно определить несколько основных моментов, особо важных в течение существования проекта хранения CO₂ (**Рис. 1**). Безопасность будет обеспечена во всех отношениях, если использовать и соблюдать:

- тщательный выбор и характеристику участка хранения;
- оценку безопасности;

примеси, не удаленные в процессе улавливания. Это важно для предотвращения любого неблагоприятного взаимодействия со скважиной, коллектором, породой-покрышкой и, в случае утечки, любыми вышележащими подземными водами.

Критерии безопасности для разработки проекта

Безопасность необходимо продемонстрировать до начала работ. Выбирая участок, необходимо проверить следующие основные компоненты:

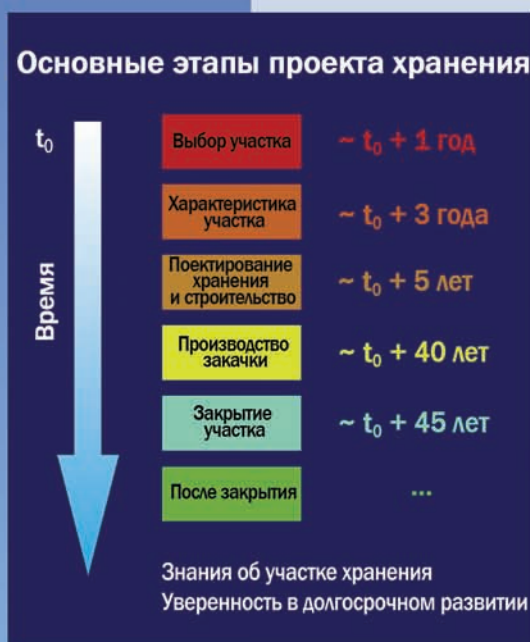
- породу коллектор и породу покрышку;
- перекрывающие породы, в частности, непроницаемые слои, которые могут выступать в качестве вторичного изолирующего слоя;
- присутствие проницаемых разломов или скважин, которые могут послужить путями выхода на поверхность;
- водоносные горизонты питьевой воды;
- ограничения на поверхности, связанные с населением и экологией.

Методы разведки месторождений нефти и газа используются для оценки геологии и геометрии мест хранения. Моделирование потока жидкости, химическое и геомеханическое моделирование CO₂ в пределах резервуара позволяет предсказать поведение CO₂ и долгосрочные последствия, а также определить параметры для эффективного закачивания. В результате, тщательного определения характеристик участка хранения, можно определить необходимый сценарий “нормального” режима хранения, соответствующий участку, подходящему для хранения, где мы будем уверенными в том, что CO₂ останется в коллекторе.

Затем оценка рисков требует рассмотрения менее вероятных сценариев будущего состояния хранилища, в том числе и непредвиденные случаи. Особенно важно предусмотреть любые возможные пути утечки газа и возможные последствия этого (**Рис. 2**). Все сценарии утечек должны быть проанализированы экспертами и там, где это возможно, должно быть применено цифровое моделирование для оценки вероятности возникновения утечки и потенциальных трудностей, связанных с этим. Например, развитие ореола распространения CO₂ нужно внимательно картировать для определения любых связей с зоной разлома. Чувствительность к изменениям вводимых параметров и неопределенности должны быть тщательно установлены при оценке рисков. Оценку возможных эффектов воздействия CO₂ на человека и окружающую среду следует рассматривать в рамках исследования оценки воздействия, которая обычно практикуется в любом процессе лицензирования промышленного объекта. В этом процессе и нормальный сценарий, и сценарий утечки будут изучаться для оценки любого возможного риска, связанного с объектом.

Краткосрочная и долгосрочная программы мониторинга

Рисунок 1
Различные этапы проекта хранения.



- правильное обслуживание;
- подходящий план мониторинга;
- план восстановительных мероприятий, отвечающий требованиям.

Сопутствующие важнейшие цели:

- гарантировать, что CO₂ останется в коллекторе;
- поддерживать целостность скважины;
- сохранять физические свойства коллектора (включая пористость, проницаемость, закачиваемость) и непроницаемую природу породы-покрышки;
- учитывать состав потока CO₂, обращая особое внимание на любые

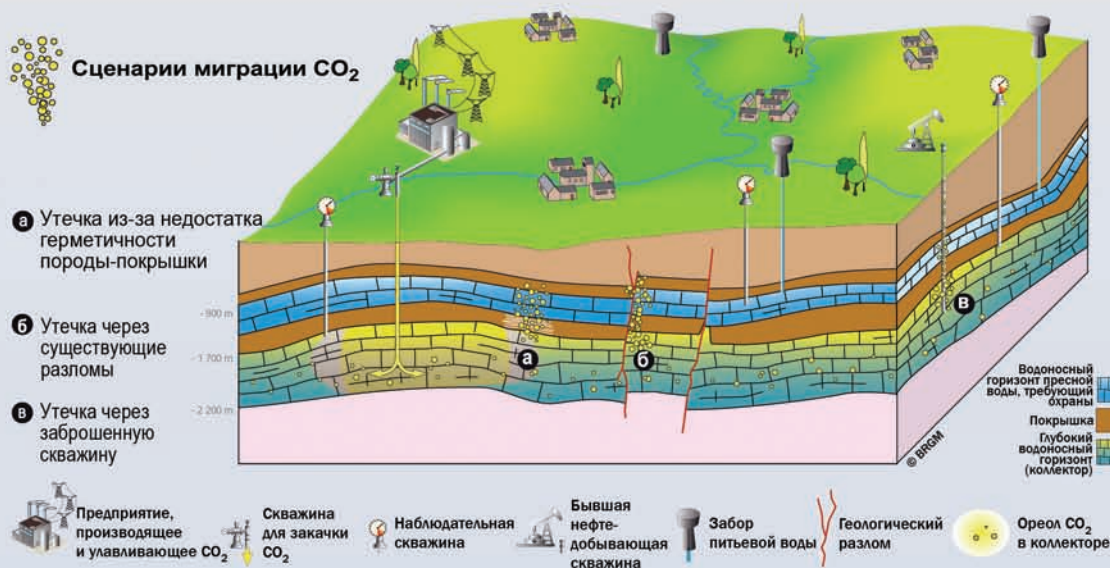


Рисунок 2
Пример возможных сценариев утечки.

должны быть установлены с учетом анализа оценок рисков и должны контролировать важные параметры, определенные в различных сценариях. Основными целями такого мониторинга являются: изображение ореола распространения CO_2 , проверка целостности скважины и породы-покрышки, обнаружение любой утечки CO_2 , оценка качества подземных вод и уверенность в том, что CO_2 не достигнет поверхности. План восстановления и смягчения последствий – последний компонент оценки безопасности направлен на детализацию списка коррективных мер, применяемых в случае утечки или аномального поведения. Это включает целостность перекрывающих пород, обрушение скважин во время закачки газа и после ее окончания, кроме того рассматриваются и экстремальные решения по восстановлению хранилища, в том числе и такие как обратимость хранения. Существующие ноу-хау включают в себя стандартные методы для нефти и газа, такие как капитальный ремонт скважин по завершению закачки, уменьшение давления закачки, частичный или полный отток газа, забор воды для уменьшения давления, извлечение газа на мелких глубинах и т.д.

Критерии безопасности в процессе производства и после его завершения

Главный аспект безопасности связан со стадией разработки: после окончания закачки, падение давления делает хранилище более безопасным.

Уверенность в возможности закачивания и хранения CO_2 безопасным способом основана на опыте промышленных компаний. CO_2 является довольно распространенным продуктом, используемым в различных отраслях промышленности, таким образом, при обращении с этим веществом не возникнет никаких новых проблем. Разработка и контроль производства будут основаны преимущественно на опыте нефтяной и газовой промышленности, в частности, на сезонном хранении природного газа или повышении извлечения нефти (ПИН). Основные параметры, требующие контроля:

- давление закачивания и скорость потока – первое должно поддерживаться ниже уровня давления трещиноватости, то есть давления, при превышении которого образуются трещины в породе-покрышке;
- объем закачанного газа должен соответствовать прогнозам, составленным с помощью моделирования;

- состав закачанного потока CO_2 ;
- целостность скважин(ы) закачивания и любой скважины, расположенной в ореоле распространения CO_2 , или рядом с ним;
- ореол распространения CO_2 и определение любых утечек;
- устойчивость почвы.

В процессе закачки необходимо регулярно сравнивать поведение закачанного CO_2 с прогнозируемым. Это позволит постоянно совершенствовать наши знания об участке хранения. Если любое аномальное поведение будет замечено, то программа мониторинга должна быть обновлена и при необходимости применены коррективные меры. В случае подозрения на утечку, соответствующие методы мониторинга могут быть нацелены на определенное пространство участка хранения в диапазоне от коллектора до поверхности. Они способны обнаружить поднимающийся CO_2 и, более того, любое неблагоприятное воздействие, которое может быть вредным для водоносных горизонтов питьевой воды, окружающей среды и в конечном счете для человека.

После окончания закачки начинается стадия закрытия: скважины должны быть правильно закрыты и ликвидированы, программа моделирования и мониторинга обновлена, и, при необходимости, применены коррективные методы для уменьшения рисков. Когда уровень рисков будет рассматриваться как достаточно низкий, ответственность за хранение будет передана национальным органам и план мониторинга может быть приостановлен или доведен до минимума.

Директива Европейского Союза устанавливает правовую основу, гарантирующую, что улавливание и хранение CO_2 - это имеющееся в распоряжении средство для смягчения последствий, которое можно использовать безопасно и ответственно.

В заключение отметим, что критерии безопасности являются неотъемлемой частью успешного промышленного внедрения хранения CO_2 . Они должны быть адаптированы к условиям каждого конкретного участка хранения. Эти критерии будут особенно важными для общественного признания и необходимы в процессе лицензирования, для которых регулирующие органы должны определить уровень детализации требований безопасности.

Водоносный горизонт: проницаемое тело породы, содержащее воду. В самых неглубоких водоносных горизонтах содержится пресная вода, используемая для потребления человеком. Те, которые находятся на больших глубинах, заполнены соленой водой, непригодной ни для каких человеческих нужд. Они называются солеными водоносными горизонтами.

Закачиваемость: характеризует легкость, с которой жидкость (как CO₂) может быть закачана в геологическую формацию. Она определяется как частное от деления скорости закачки на разницу давлений между точками закачки внутри у основания скважины и формации.

Коллектор: тело горной породы или осадков, которое достаточно пористо и проницаемо для размещения и хранения CO₂. Песчаник и известняк – наиболее распространенные породы коллекторов.

Литостатическое давление: сила, оказывающая давление на породу перекрывающимися породами, расположенными ниже поверхности земли. Литостатическое давление возрастает с глубиной.

Микросейсмичность: несвязанные с землетрясениями слабые сотрясения или вибрации земной коры, которые могут быть вызваны различными природными или искусственными факторами.

Ореол CO₂: пространственное распространение суперкритического CO₂ в горных породах.

Повышенное извлечение нефти (ПИН): метод, улучшающий производство нефти путем закачивания жидкостей (таких как поток воды или CO₂), что помогает мобилизовать нефть в коллекторе.

Порода-покрышка: непроницаемый слой пород, который служит барьером для движения жидкостей и газов, и образует ловушку, если перекрывает коллектор.

Природный аналог: существующий в природе коллектор CO₂. Существуют как утекающие так и неутекающие участки, их изучение может улучшить наше понимание судьбы CO₂ в глубоких геологических системах в долгосрочной перспективе.

Перекрывающие породы: геологические слои, лежащие между породой-покрышкой коллектора и поверхностью земли (или морским дном).

Проницаемость: свойство или способность пористой породы пропускать жидкость; это мера относительной легкости протекания жидкости под градиентом давления.

Скважина: круглая выработка, произведенная путем бурения, главным образом, глубокая скважина малого диаметра, такая как нефтяная скважина.

метра, такая как нефтяная скважина.

Соляной раствор: очень соленая вода с высокой концентрацией растворенных солей.

Сверхкритический: состояние жидкости при давлениях и температурах выше критических значений (31.03 °C и 7.38 Мра для CO₂). Свойства таких жидкостей постоянно меняются от более газообразных при низком давлении до более жидкообразных при высоких давлениях.

УХУ: улавливание и хранение CO₂.

CSLF: Руководящий Форум По Удалению Углерода (РФУУ). Международная инициатива по изменению климата, направленная на развитие улучшенных экономических технологий отделения и улавливания диоксида углерода для его транспортировки и долгосрочного безопасного хранения.

EU Geoscapacity: завершенный Европейский научно-исследовательский проект, который оценил общую геологическую имеющуюся в Европе емкость для хранения антропогенных выбросов CO₂.

GESTCO: завершенный Европейский научно-исследовательский проект, который оценил возможности геологического хранения CO₂ в 8 странах (Норвегия, Дания, Великобритания, Бельгия, Нидерланды, Германия, Франция и Греция).

IEAGHG: программа по исследованию парникового газа Международного Энергетического Агентства (МЭА). Международное сотрудничество, поставившее перед собой цели: оценить технологии уменьшения выбросов парниковых газов, распространить результаты этих исследований, определить объекты исследования, развития и демонстрации и поддерживать соответствующую работу.

IPCC: Межправительственная группа экспертов по изменению климата (МГЭК). Эта организация была основана в 1988 г. Всемирной Метеорологической Организацией (ВМО) и Программой по Окружающей Среде Организации Объединенных Наций для получения научной, технической и социально-экономической информации, подходящей для понимания изменения климата, его потенциальных влияний и возможностей для адаптации и смягчения. МГЭК и Ал Гор были награждены Нобелевской Премией Мира за 2007 год.

pH: мера кислотности раствора, где pH 7 соответствует нейтральной среде.

Для дальнейшего чтения:

Специальный Отчет по УХУ Межправительственной Группы Экспертов по Изменению Климата (МГЭК):

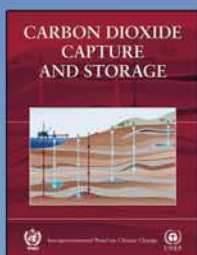
http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

Страница Климатических Действий Европейской Комиссии по УХУ, включая информацию по Законодательным Рамкам и Внедрение Директивы по УХУ:

http://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs_en.htm

Интернет-страница МЭА по методам мониторинга:

http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html



Что такое CO₂GeoNet?

CO₂GeoNet – это Европейское научное сообщество, в которое можно обратиться для получения ясной и исчерпывающей информации о геологическом хранении CO₂, передовой и жизненно необходимой технологии смягчения последствий изменения климата. CO₂GeoNet была создана по инициативе Европейской Комиссии как Сеть Экспертов в рамках 6-й Рамочной Программы (ЕК РП6 контракт 2004 – 2009). Она объединяет 13 институтов из 7 европейских стран, у каждого из которых достаточно высокий международный уровень и уникальный опыт в области исследований геологического хранения CO₂. В 2008 году CO₂GeoNet была зарегистрирована как некоммерческая ассоциация в соответствии с французским законодательством – для продолжения деятельности после окончания финансирования ЕК.

У CO₂GeoNet имеется большой опыт научно-исследовательских проектов в следующих областях: породы коллекторы и покрышки, потенциальные возможности для миграции CO₂ на поверхность, методы мониторинга, возможные влияния на людей и экосистему, общественное признание и связи. CO₂GeoNet предлагает различные услуги в четырех основных областях: совместные исследования; обучение и создание потенциала; научные консультации; информация и связи.

CO₂GeoNet стремительно набирает силу и становится прочной научной компетентной европейской инстанцией, способной обеспечивать необходимую научную поддержку для широкомасштабного и безопасного внедрения геологического хранения CO₂. Расширение этого сообщества для удовлетворения всеевропейских потребностей осуществляется посредством проекта ГХУ Европа (CGS Europe), координационной деятельности, финансируемой РП7 ЕС (2010-2013).

ГХУ Европа объединяет сильнейшее ядро Ассоциацию CO₂GeoNet и другие исследовательские организации (21), которые представляют 28 государств Европы (24 государства - члена и 4 ассоциированные страны). Для этого задействована команда из нескольких сотен ученых, способных заниматься всеми аспектами геологического хранения CO₂, благодаря междисциплинарной интеграции. Нашей целью является предоставление заинтересованным сторонам и общественности независимой и научно обоснованной информации о геологическом хранении CO₂.



CO₂GeoNet: Европейская Сеть Экспертов в области геологического хранения CO₂

BGR (Германия); **BGS** (Великобритания); **BRGM** (Франция); **GEUS** (Дания); **HWU** (Великобритания); **IFPEN** (Франция); **IMPERIAL** (Великобритания); **NIVA** (Норвегия); **OGS** (Италия); **IRIS** (Норвегия); **SPR** (Норвегия); **TNO** (Нидерланды); **URS** (Италия).



www.co2geonet.eu

ГХУ Европа: Общеевропейская координационная деятельность в области геологического хранения CO₂

CO₂GeoNet (13 членов, указанных выше); **CzGS** (Чехия); **GBA** (Австрия); **GEOCOMAR** (Румыния); **GEO-INZ** (Словения); **G-IGME** (Греция); **GSI** (Ирландия); **GTC** (Литва); **GTK** (Финляндия); **LEGMC** (Латвия); **ELGI** (Венгрия); **LNEG** (Португалия); **METU-PAL** (Турция); **PGI-NRI** (Польша); **RBINS-GSB** (Бельгия); **SGU** (Швеция); **SGUDS** (Словакия); **S-IGME** (Испания); **SU** (Болгария); **TTUGI** (Эстония); **UB** (Сербия); **UNIZG-RGNF** (Хорватия).



www.cgseurope.net

CO₂GeoNet получила широкое признание на европейской и международной арене

CO₂GeoNet одобрена Руководящим Форумом По Удалению Углерода (РФУУ).



CO₂GeoNet сотрудничает с программой по исследованию парникового газа Международного Энергетического Агентства (МЭА).



О брошюре

В целях повышения осведомленности общества в области геологического хранения CO₂, CO₂GeoNet задалась всеобъемлющим вопросом: "Что в самом деле означает геологическое хранение CO₂?". Команда выдающихся ученых из CO₂GeoNet подготовила ответы на шесть соответствующих вопросов о современном состоянии дел, основанных на исследованиях и опыте, собранных по всему миру. Целью работы было предоставить ясную и беспристрастную научную информацию для широкой аудитории и способствовать диалогу о существенных вопросах, касающихся технических аспектов геологического хранения CO₂. Эта работа, собранная в данной брошюре, была представлена на семинаре "Обучение и Диалог", проходившем в Париже 3-го октября 2007 года. "Что в самом деле означает геологическое хранение CO₂?" представлена на многих языках по адресу:

www.co2geonet.com/brochure

CO₂GeoNet

Европейская Сеть Экспертов в области геологического хранения CO₂



www.co2geonet.eu

Секретариат: info@co2geonet.com

BGS Natural Environment Research Council-British Geological Survey, **BGR** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **BRGM** Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **GEUS** Geological Survey of Denmark and Greenland, **HWU** Heriot-Watt University, **IFPEN** IFP Energies nouvelles, **IMPERIAL** Imperial College of Science, Technology and Medicine, **NIVA** Norwegian Institute for Water Research, **OGS** Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, **IRIS** International Research Institute of Stavanger, **SPR SINTEF** Petroleumsforskning AS, **TNO** Netherlands Organisation for Applied Scientific Research, **URS** Università di Roma La Sapienza-CERI.

Эта русскоязычная версия была переведена в рамках проекта РП7 ЕС „CGS Europe – общеевропейская координационная акция по геологическому хранению CO₂“ Институтом Геологии Таллиннского Технического Университета.



ISBN: 978-9949-23-247-5

