

Какво означава в действителност геоложкото съхранение на CO₂?

**Отговорно използване
на изкопаемите горива**

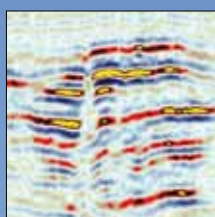
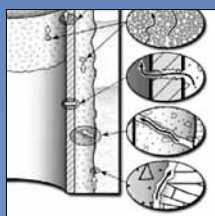
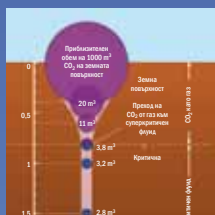
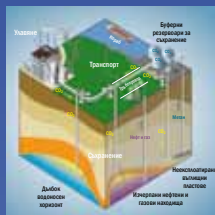
**Отстраняване на
основния източник
на парникови газове**

**Връщане на въглерода
обратно в земята**

**Дайте ни нужното време
да развием благоприятни
за климата енергийни източници**



CO₂GeoNet Европейска Приоритетна Мрежа



Промяната на климата и нуждата от геоложко съхранение на CO₂ 4

1. Къде и колко CO₂ можем да съхраняваме под земята? 6

2. Как можем да транспортираме и инжектираме големи количества CO₂? 8

3. Какво става с CO₂ постъпил в съхраняващия резервоар? 10

4. Може ли CO₂ да изтече от резервоара и ако се случи, какви са последствията? 12

5. Как да контролираме мястото на съхранение в дълбочина и на повърхността? 14

6. Какви безопасни критерии трябва да бъдат наложени и спазвани? 16

Терминологичен речник 18

Какво е CO₂GeoNet? 19

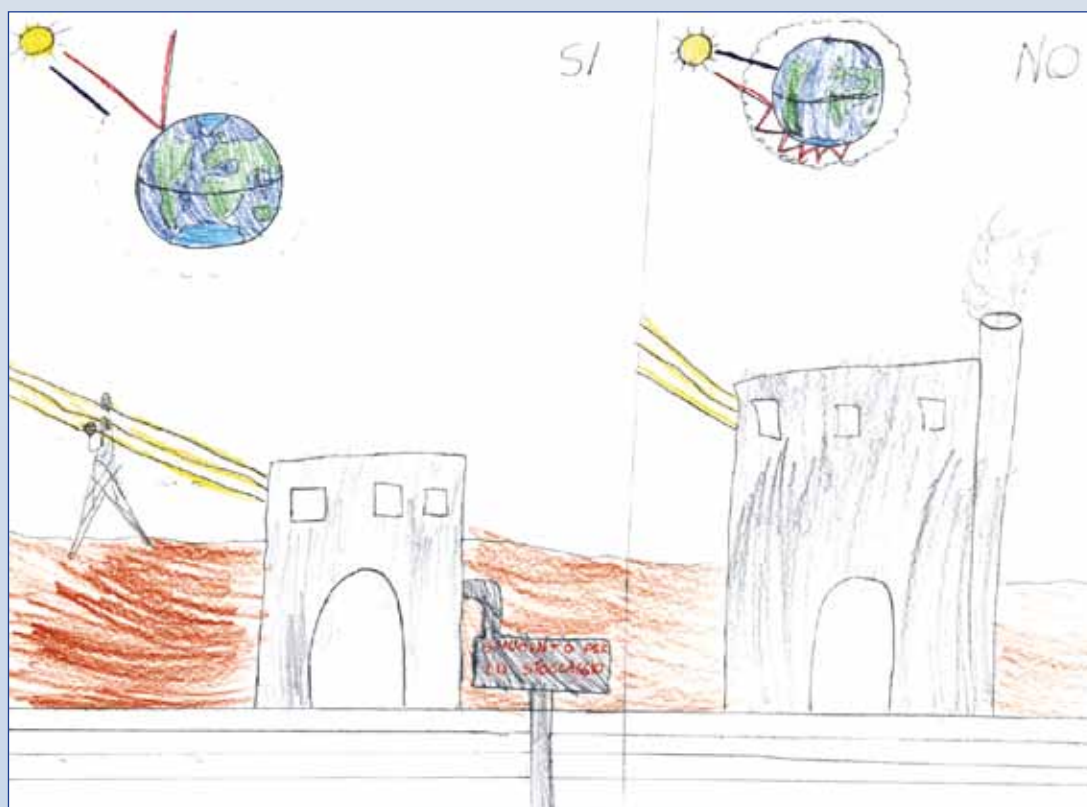
Тази брошура беше съставена от:

Роб Артс, Стенли Бобиен, Тжирк Бенедиктус, Изабел Чернишовски-Лориол, Хуберт Фабриол, Мари Гастин, Осгур Гундоган, Гари Кирби, Салвадоре Ломбарди, Франц Маи, Джонатан Пирс, Сержио Персогиа, Жилс Ремелтс, Ник Рилей, Мехран Сохраби, Ровена Сед, Самуела Версели, Олга Визика-Кавадас.

Българска версия: превод - Г. Георгиев и А. Илиева, редакция - Р. Йорданова, техническо оформление - Рекламна къща Янкулов

Поглед в бъдещето

**Няма вече пушещи комини
Тръбопровод докарва CO₂ и го складира
в земните недра
Това е добре за Земята**



© Sapienza URS

Масимо, 10 години, Рим - Италия

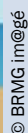
**За нашите деца
геоложкото съхранение на CO₂ има смисъл**



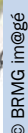
Човечеството изпуска големи количества CO₂ в атмосферата

последните 250 години увеличаващото се изгаряне на изкопаеми горива (въглища, нефт, газ) за производство на енергия, отопление, индустрия и транспорта бързо е повишило концентрацията на CO_2 в атмосферата (**Фиг. 1**). Около половината от тези причинени от хората излишъци са ре-абсорбирани от растенията и разтворени в океаните. Последното предизвиква окисление и свързаното с него потенциално негативно влияние върху морските растения и животни. Останалата част се натрупва в атмосферата и предизвиква климатичните промени, тъй като CO_2 е парников газ, който улавя част от слънчевата топлина и предизвиква затопляне на земната повърхност. Необходими са радикални мерки за спиране растежа на днешните концентрации от 387 ppm на CO_2 в атмосферата (почти +38% повишение в сравнение с нивата от прединдустриалния период) и предотвратяване достигането на критичните нива от 450 ppm през следващите десетилетия. Експерти от целия свят смятат, че над тези нива може би няма да е възможно да се справим с драстичните последствия.

Връщане на въглерода обратно в земята



- Природни находища на CO_2
- Използувани води с CO_2 (за пиене, спа и др.)



Нашият свят е много зависим от изкопаемите горива от началото на индустриалната епоха през 1750 г. Следователно, не е изненада, че за трансформацията на нашето общество в ново, базирано на използването на благоприятни за климата енергийни източници, ще са нужни много време и пари. Това, от което се нуждаем е краткосрочно решение, което да помогне да намалим нашата зависимост от изкопаемите горива, като за начало ги използваме по незамърсяващ околната среда начин. Така ще се осигури необходимото време за развиване на технологиите и инфраструктурата за обзиримо енергийно бъдеще. Една такава възможност е създаването на затворен цикъл в системата за производство на енергия, в който въглеродът, извлечен от земята под формата на природен газ, нефт и въглища да се върне обратно там под формата на CO_2 . Подземното съхранение на CO_2 не е човешко изобретение, а е изцяло природен широко развит феномен, свързан с резервоарите на CO_2 , които съществуват от хиляди и милиони години. Един такъв пример е серията от осем природни резервоара за CO_2 в югоизточна Франция, открити по време на нефтените проучвания през 60-те години (**Фиг. 2**). Тези и много други природни залежи от CO_2 по света доказват, че геоложките формации са подходящи за съхраняват ефективно CO_2 и безопасно за много дълги периоди от време.

Улавянето и съхранението на CO₂: надежден начин за решаване на проблема

Сред мерките, които трябва незабавно да се предприемат за ограничаване на климатичните промени и окис-

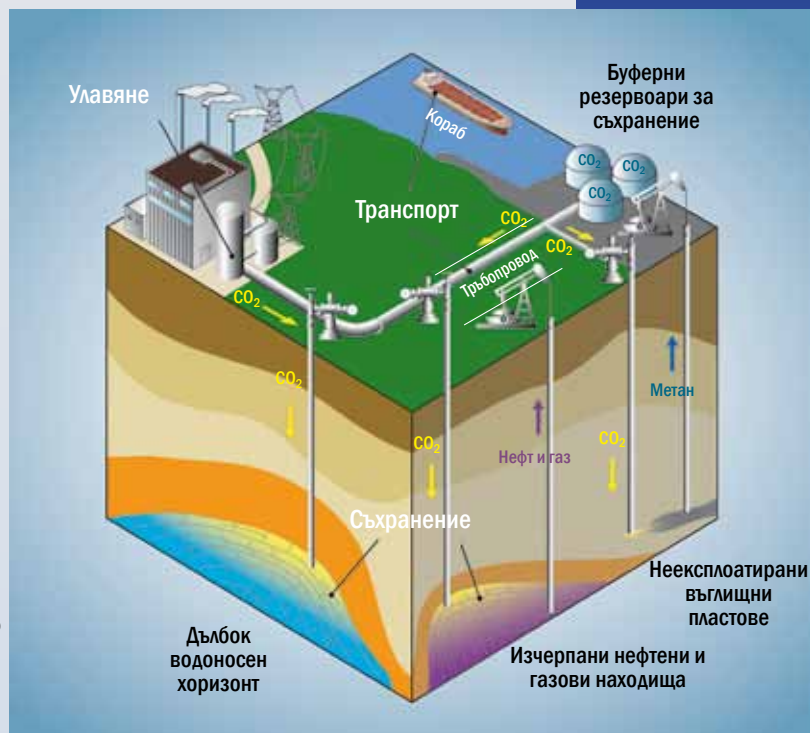
лението на океаните, улавянето и съхранението на CO_2 (CCS^*) може да изиграе решаваща роля, тъй като би могло да осигури 33% от необходимото намаляване на CO_2 . Улавянето и съхранението на CO_2 включва улавянето на CO_2 от въглищни и газови електроцентрали, и индустриални съоръжения (металургични и циментови заводи, рафинерии и др.), транспортирането му по газопроводи или с кораби до мястото на съхранение, и нагнетяването му чрез сондажи* в подходящи за дълго съхранение геоложки формации (Фиг. 3). С оглед на нарастващото световно население и повишеното търсене на енергия в развитите страни, както и на недостига на алтернативни „чисти“ енергийни източници, продължаващото използване на изкопаеми горива в близкото бъдеще е неизбежно. Едновременно с улавянето и съхранението на CO_2 човечеството би могло да се развива в по-екологична посока, като в същото време изгражда мост към световна икономика, базирана на устойчиво енергийно производство.

Развитието на улавянето и съхранението на CO_2 в световен мащаб е благоденстващо

Масштабни проучвателни проекти по улавянето и съхранението на CO_2 се осъществяват от 90-те години в Европа, САЩ, Канада, Австралия и Япония. Много знания са придобити от първите големи демонстративни проекти, в които от няколко години CO_2 се инжектира дълбоко под земята: Слейпнер в Норвегия (около 1 Мт/г от 1996 г.) (Фиг. 4), Уейбърн в Канада (около 1,8 Мт/г от 2000 г.) и Ин Салах в Алжир (около 1 Мт/г от 2004 г.). Международното сътрудничество в изследванията за съхранение на CO_2 в тези и други места, подпомагано от Международната Енергийна Агенция (IEAGHG*) и Ръководния форум за отстраняване на CO_2 (CSLF*), е особено важно за разширяване на нашето разбиране и за развитието на световна научна общност, към която е насочена и тази брошура. Отличен пример за това е специалния доклад на Междуправителствената експертна група по климатичните промени (IPCC*) за улавяне и съхранение на CO_2 (2005), който описва настоящия етап на познанията и обстоятелствата, които трябва да се преодолеят, за да стане възможно широкото приложение на тази технология. Вече съществува ясна техническа експертиза и светът се движи уверено към демонстрационната фаза. В допълнение към техническото развитие са създадени законови, регулаторни, икономически и политически рамки, и е получена обществена подкрепа и одобрение. В Европа целта е да има поне 12 големи демонстрационни проекта до 2015 г., което да позволи да се направи широко промишлено приложение до 2020 г. С тази цел Европейската комисия издаде през януари 2008 г. „Климатични промени и възстановим енергиен пакет“, с което се предлага Директива за геоложкото съхранение на CO_2 и други мерки за насърчаване развитието и сигурността на улавянето и съхранението на CO_2 .

Основни въпроси за геоложкото съхранение на CO_2

Експертната мрежа CO_2GeoNet беше създадена под покровителството на Европейската комисия като група от



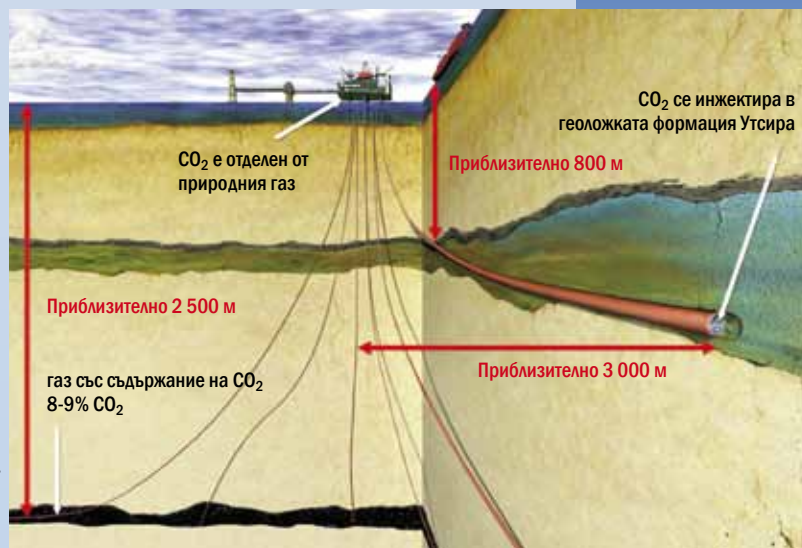
© BRMG im@gé

институции, способна да поддържа Европа в предните редици на широко-машабните международни изследвания. Една от целите на CO_2GeoNet е комуникацията между чисто научна информация и техническите аспекти на геоложкото съхранение на CO_2 . За да подобрят диалога върху важни аспекти от тази жизнено важна технология, изследователите от CO_2GeoNet подготвиха основните отговори на някои често задавани въпроси. На следващите страници вие ще намерите обяснения като: как ще се извърши геоложкото съхранение на CO_2 , при какви обстоятелства е възможно то и какви са критериите за неговото сигурно и ефективно осъществяване.

Фигура 4

Вертикален разрез на находището Слейпнер, Норвегия. Природния газ, добит от дълбочина 2 500 м съдържа няколко процента CO_2 , който трябва да се отдели съгласно търговските стандарти. Вместо да се изпусне в атмосферата, отделеният CO_2 се инжектира на дълбочина 1 000 м в пясъчливия водоносен хоризонт* Утсира.

Фигура 3
В електроцентралите CO_2 се отделя от другите газове. След това той се компресира и транспортира по тръбопровод или с кораб до мястото на съхранение: дълбок водоносен хоризонт, изчерпани нефтени и газови находища, не експлоатирани въглищни пластовете.

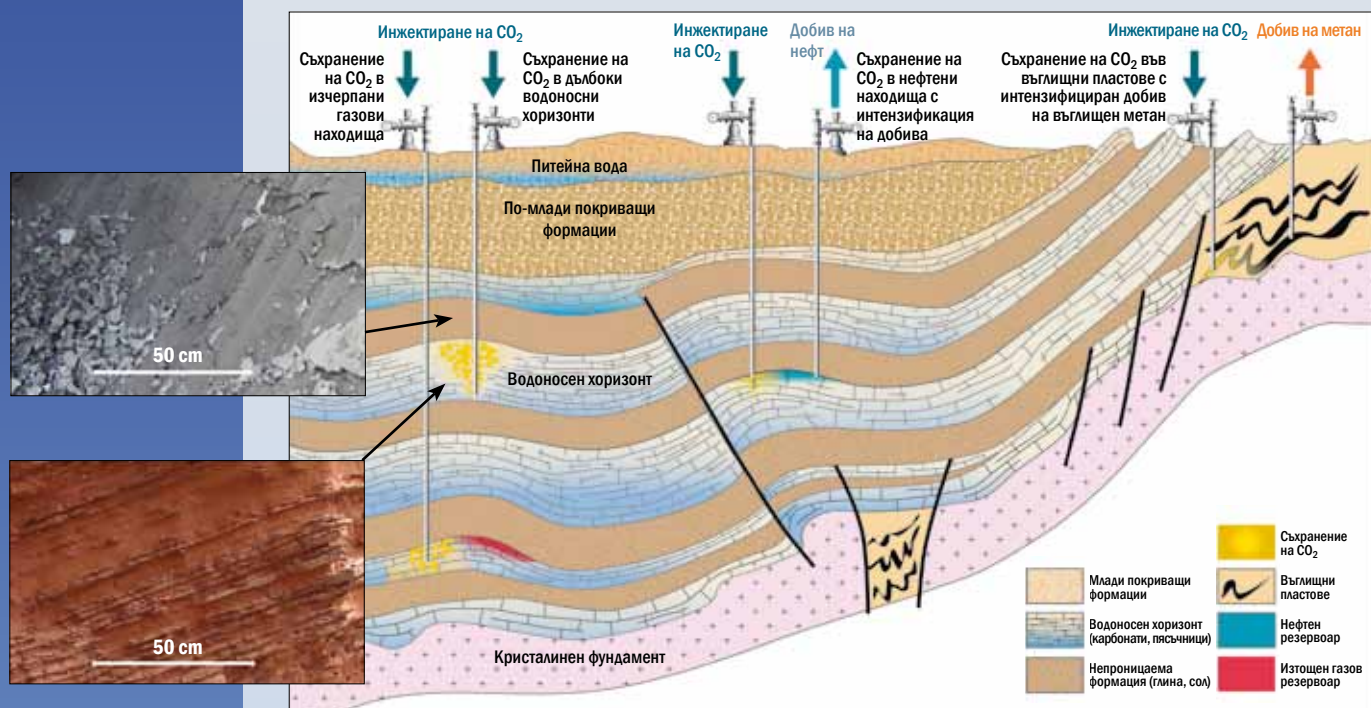


© StatoilHydro

* виж терминологичния речник в края

Къде и колко CO₂ можем да съхраняваме под земята?

CO₂ не може да бъде инжектиран където и да е под земята. Първо трябва да бъдат намерени подходящи скални формации. Потенциални резервоари за геоложко съхранение на CO₂ има по целия свят и те предлагат достатъчен капацитет за значително ограничаване на климатичните промени, причинени от човека.



Фигура 1
CO₂ се инжектира в дълбоки геоложки пластове от порести и проницаеми скали (като пясъчници в долната притурка), покрити от непроницаеми скали (като глинни в горната притурка), които пречат на миграцията на CO₂ нагоре към земната повърхност. Основните възможности за съхранение на CO₂ са:
1. Изчерпани нефтени/газови резервоари с интензификация на добива.
2. Акюифери (водоносни хоризонти), съдържащи сомени води, негодни за консумация;
3. Дълбоки неексплоатируеми въглищни пластове, екално в асоциация с добив на въглищен метан.

Три са основни възможности за съхранение на CO₂ (Фиг. 1):

1. Изчерпани газови и нефтени находища - доброто им познаване, дължащо се на дългогодишните им проучвания и добив, предлага веднага възможности за съхранение на CO₂.
2. По-дълбоки водоносни хоризонти наречени „акюифери“ - имат по-голям потенциал за съхранение, но като цяло не са толкова добре изучени.
3. Неексплоатируеми въглищни пластове - това е бъдеща възможност, когато се разреши проблемът как да се инжектират големи количества CO₂ в слабо проницаемите* въглищни пластове.

Резервоарите

Инжектираният под земята в подходящи резервоарни скали CO₂ се натрупва в порите между зърната и в пукнатините, което води до изместване и заместване на наличния флуид в тях, като газ, вода или нефт. Следователно, подходящите скали за геоложко съхранение на CO₂ трябва да имат висока порестост* и проницаемост. Такива скални формации, отложени в геоложкото минало, обикновено са локализиран в т.нар. „седиментни

басейни“. На места тези проницаеми скални комплекси се редуват с непроницаеми скали, които могат да играят роля на непрониклива покривка. Седиментните басейни съдържат често въглеродородни резервоари и природни находища на CO₂, което доказва способност та им да задържат флуиди за дълго време, след като залежите от нефт, газ и дори чист CO₂ в тях са от милиони години. Дълбочинната обстановка за възможните опции за съхранение на CO₂, често се изобразява на илюстрациите като твърде опростено и хомогенно редуване на пластове. В действителност обаче, тя е изградена от неравномерно разпределени и локално разломени скални формации, резервоари и покривки, което формира сложен и хетерогенен строеж. За да се направи оценка на подходящи структури, които да се предложат за дългосрочно съхранение на CO₂, се изисква задълбочено познаване на геоложката ситуация и научен опит.

Потенциалните резервоари за съхранение на CO₂ трябва да отговарят на много критерии, от които най-важните са:

- достатъчни порестост, проницаемост и вместимостен капацитет;
- наличие на отгоре-лежащи непроницаеми скали, наречени „покривки“ (напр. глинни, аргилити, мергели, солни седименти), които да попречат на за възмож-

ните опции за съхранение на CO₂ да мигрира нагоре към повърхността;

- наличие на „улавящи структури“ или „капани“, например куполовидни структурни форми, които да могат да контролират обхвата на миграцията на за възможните опции за съхранение на CO₂ в резервоара;
- дълбочини, по-големи от 800 м, където наляганията и температурите са достатъчно високи за да осигурят съхранението на за възможните опции за съхранение на CO₂ в компресирана флуидна фаза и така да се увеличи съхраняваното количество;
- отсъствие на питейна вода: за възможните опции за съхранение на CO₂ не трябва да бъде инжектиран във води, които са подходящи за човешки консумации и дейности.

Къде да намерим места за съхранение в Европа

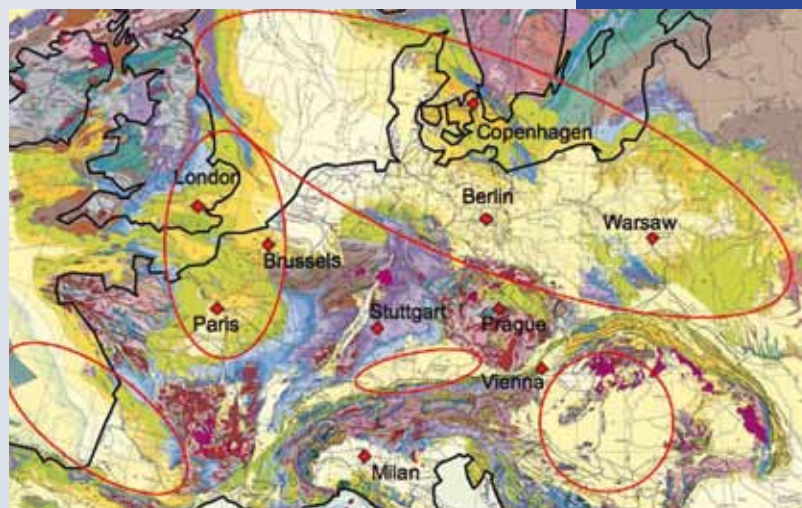
Седиментните басейни са широко развити в Европа, напр. Северно море или на сушата около планинска верига на Алпите (Фиг. 2). Много формации седиментни те басейни на Европа отговарят на критериите за геолошко съхранение и вече са маркирани и изследвани. Други европейски райони са изградени от по-старо консолидирана земна кора, както е в по-голямата част от Скандинавия. В тях няма подходящи скали за съхранение на CO₂.

Пример за район с потенциал за съхранение на CO₂ е Южния Пермски басейн, който се простира от Англия до Полша (показан е на фигура 2 с най-голямата елипса). Седиментите са довели до присъствие на солена вода, нефт или природен газ в част от поровото пространство. Глинестите пластове между порестите пясъчници са силно уплътнени и слабо проницаемие, което спира вертикалното движение на флуидния поток. Повечето от пясъчниковите формации се намират на дълбочини между 1 и 4 км, където налягането е достатъчно високо за съхранение на CO₂ в плътна течна фаза. Солното Съдържанието на соли в пластовите води нараства в този дълбочинен интервал от около 100 г/л до 400 г/л, с други думи те са значително по-солени от морската вода (35 г/л). Движенията в басейна са причинили пластична деформация на солните комплекси, което е образувало стотици куполообразни структури, които впоследствие могат да улавят природен газ. Именно тези капани са изучавани за евентуално съхранение на CO₂ и осъществяване на пилотни проекти.

Капацитет за съхранение

Знанието на капацитета за съхранение на CO₂ е необходимо на политиките, регулаторните институции и операторите по съхранението. Оценка на капацитета за съхранение обикновено са с голямо приближение и се основават на пространствения обем на потенциално-подходящите формации. Капацитетът може да бъде оценяван в различни мащаби - от националния мащаб за по-груби оценки до басейновия и резервоарния мащаб за по-прецизни изчисления, в които се отчита хетерогенността и сложността на реалния геоложки строеж.

Обемен капацитет: Публикуваните национални капацитети за съхранение се основават главно на изчислениния обем на поровото пространство в скалите. На теория



© BGR

капацитетът за съхранение в дадена формация може да бъде изчислен като се умножи нейната площ по дебелината ѝ, средната ѝ порестост и средната плътност на CO₂ при съответните дълбочини. Но тъй като поровото пространство вече е запълнено с вода, само малка част от него може да бъде използвана за съхранение на CO₂, приемат се 1-3%. Този коефициент се използва за оценката на обемен капацитет за съхранение.

Реалистичен капацитет: По-реалистични оценки за капацитета могат да бъдат направени за отделни структурни за съхранение след детайлни техни изследвания. Дебелината на резервоарните формации не е постоянна, а резервоарните им характеристики могат да се променят на къси разстояния. Знанията за размера, формата и геоложките характеристики на структурите ни позволяват да намалим неточността при обемните изчисления. На базата на тази информация могат да бъдат проведени компютърни моделирания за прогнозиране на инжектирането на CO₂, за движението му в резервоара, и така да се оцени по-реално капацитетът за съхранение.

Осъществим капацитет: Капацитетът не е само въпрос, свързан с физиката на скалата. Социално-икономическите фактори също са от значение дали ще бъде използвана дадена подходяща структура. Например, транспортът на CO₂ от източника до мястото за съхранение ще зависи разходите. Капацитетът също ще зависи от чистотата на CO₂ - присъствието на други газове ще намали свободния обем на резервоара за CO₂. И накрая политическият избор и общественото приемане ще имат последната дума дали даден капацитет ще бъде използван.

В заключение, ние знаем, че капацитетът за съхранение на CO₂ в Европа е голям, въпреки съществуващата несигурност породена от сложността и хетерогенността на резервоара, и от социално-икономически фактори. Европейският проект GESTCO* оцени капацитета за съхранение на CO₂ в находищата от нефт и газ в Северно морския регион и около него на 37 млрд. т., което би могло да позволи на големи инсталации да инжектират CO₂ няколко десетилетия. Актуализирането и по-нататъшното уточняване на Европейския капацитет на CO₂ беше направено с проучвания в отделни страни и с общоевропейския проект EU Geoscapacity*.

Фигура 2
Геоложка карта на Европа, показваща локализацията на главните седиментни басейни (червените елипси), в които могат да бъдат намерени подходящи резервоари за съхранение на CO₂ (по геоложката карта на Европа в мащаб 1:5 000 000).



Как можем да транспортираме и инжектираме големи количества CO₂?

След индустриалното му отстраняване (улавяне) CO₂ се компресираща, транспортира и след това инжектира в резервоарните комплекси чрез един или няколко сондажа. Целият процес трябва да бъде оптимизиран, за да се осигури съхранението на няколко милиона тона CO₂ годишно.

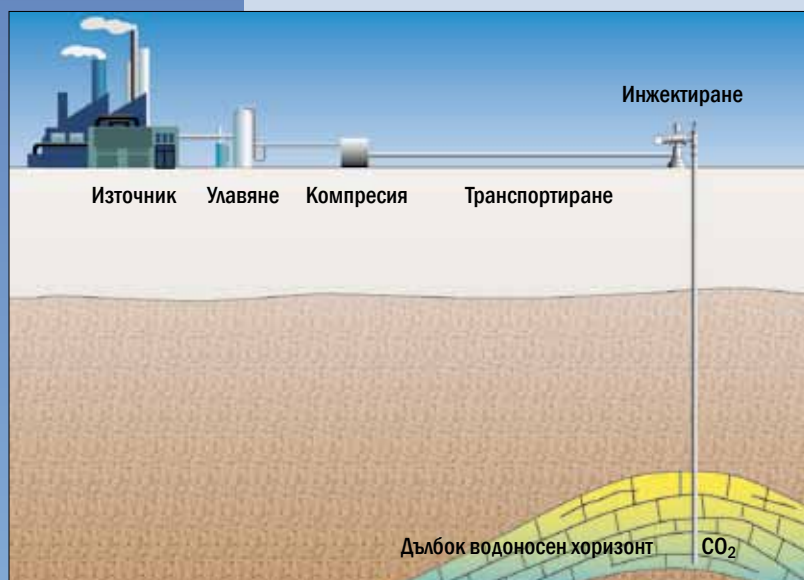
Компресиране

CO₂ се компресираща до плътна течна фаза, чийто обем е значително по-малък от този на газа.

След като CO₂ се отдели от дима в електроцентралата или индустриалното съоръжение, полученият високо концентриран поток от CO₂ се дехидратираща (обезводнява) и компресираща, което прави транспорта и съхранението му по-ефективни (**Фиг. 1**). Дехидратиращането е необходимо за да се избегне корозията на съоръженията и инфраструктурата, и формирането при високо налягане на т.н. „хидрати“ (масивни, подобни на лед кристали, които могат да запушат съоръженията и тръбите).

Компресиращането и дехидратиращането се извършва заедно с многоетапен процес: повтарящи се цикли на компресия, охлаждане и водо-отделяне. Налягането, температурата и съдържанието на вода трябва да бъдат съобразени с вида на транспорта и с изискванията за налягане в мястото за съхранение. Ключови фактори за конструкцията на компресорната инсталация са: обема на газовия поток, всмукателното и изпускателното налягане, топлинния капацитет на газа и ефективността на компресора. Технологиията на компресиране е известна и вече се прилага широко в много индустриални области.

Фигура 1
Етапи в геоложко съхранение на CO₂. За да се пренесе CO₂ от източника му до мястото за неговото безопасно и трайно съхранение, трябва да се премине през цяла верига от операции, включващи улавяне, компресиране, транспорт и нагнетяване.



Транспорт

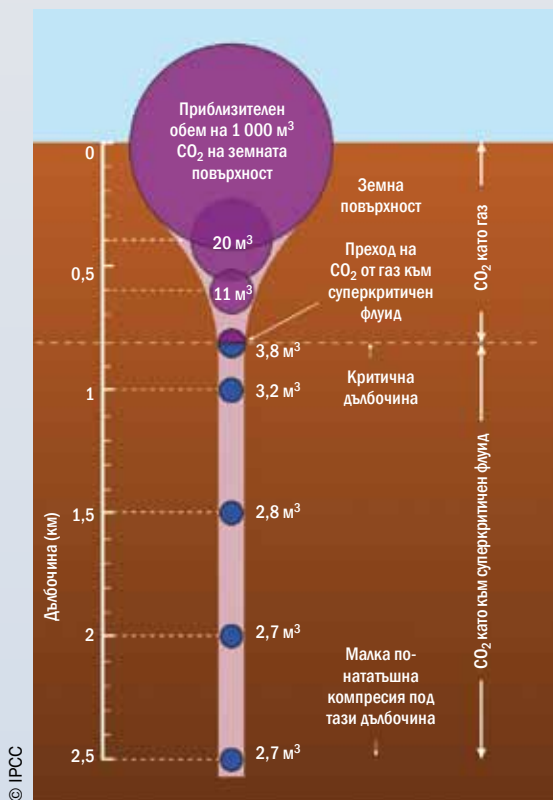
CO₂ може да бъде транспортиран с кораб или тръбопровод. Транспортиращането на CO₂ с кораб се извършва засега в много малки мащаби (10 000-15 000 м³) за индустриални цели. Но може да стане много удобен вариант за бъдещите проекти за улавяне и съхранение на CO₂, в случаите когато индустриалният източник е разположен близо до морския бряг и е много отдалечен от подходящия резервоар за съхранение. Използваните танкери за транспортиране на втечен газ са подходящи и за транспортиране на CO₂. В частност, полузамразените системи са едновременно компресиращи и охлаждат, и така CO₂ може да бъде транспортиран в течна фаза. Най-новите танкери за пренос на втечен газ са с обем 200 000 м³ и са способни да транспортират 230 000 т CO₂. Обаче транспортът с кораби не осигурява постоянен приток и са необходими междинни съоръжения в пристанищата за събиране и натоварване на CO₂.

Тръбопроводният транспорт се използва засега за големи количества CO₂, използван от големите нефтени компании за повишаване на нефтените добиви* (приблизително 3 000 км тръбопровода за CO₂ има в света, повечето са в САЩ). Това е по-евтин транспорт от този с кораби и има предимството да осигурява постоянен поток от завода за улавяне до мястото за съхранение. Всички съществуващи тръбопроводни за CO₂ работят при високи налягания и супер-критични условия за CO₂, при които той се държи като газ, но има плътността на течност. Три важни фактора определят количеството, което тръбопроводът може да транспортира: неговия диаметър, работното му налягане и следователно дебелината на стените.

Нагнетяване (инжекциране)

След като CO₂ пристигне до мястото за съхранение, той се нагнетява под налягане в резервоара (**Фиг. 2**).

Налягането при нагнетяване трябва да бъде значително по-голямо от налягането в резервоара, за да избухне флуида в резервоара далеч от точката на нагнетяване. Броят на нагнетателните сондажи зависи от количеството CO₂, което трябва да бъде съхранено, дебита на нагнетяването (обема CO₂, инжектиран за 1 час), проникваемостта и дебелината на резервоара, максималното безопасно налягане на нагнетяване и типа на сондажа. Тъй като главната цел е дългосрочното съхранение на CO₂, ние трябва да бъдем сигурни в херметичността на скалната



Фигура 2

Когато е инжектиран под земята, CO_2 става плътен, суперкритичен* флуид на около 0,8 км дълбочина. Неговият обем значително се намалява от 1 000 m^3 на повърхността до 2,7 m^3 на дълбочина 2 км. Това е един от факторите, който прави съхранението на големи количества CO_2 толкова привлекателно.

формация. Високите дебити на нагнетяване могат да предизвикат увеличаване на налягането в точката на инжектиране, особено в слабо проникваемите комплекси. Налягането на нагнетяване обикновено не трябва да превишава налягането в пукнатините на скалите, тъй като това може да разруши резервоара или отгоре лежащата покривка. Геомеханични анализи и модели са използвани за да се определи максималното налягане на нагнетяване, при което допълнително напукване на резервоара няма да има.

Химични процеси могат да влияят върху количеството CO_2 , което може да бъде инжектирано в резервоара. В зависимост от скалния тип на резервоара, състава на флуидите и резервоарните условия (като температура, налягане, обем, концентрация и т.н.), процеси на минерално разтваряне и утаяване могат да протичат около сондажния ствол. Това може да доведе до повишаване или намаляване на скоростта на нагнетяване. След като CO_2 е инжектиран, част от него се разтваря в солената вода на резервоара и рН* слабо намалява, което се компенсира с разтварянето на карбонатните минерали в скалата. Карбонатите първите се разтварят, тъй като те реагират много бързо и разтварянето им започва веднага след като започне нагнетяването. Този процес на разтваряне може да увеличи порестостта на скалата и възможностите за инжектируемост*. Обаче след разтварянето, карбонатните минерали могат да се утаят и да циментират резервоарното пространство около сондажа. С увеличаване на инжектираните количества от CO_2 може да се ограничи намаляването на проникваемостта в

близост до сондажа, след като те могат да отдалечат зоната на геохимичното равновесие при утаяване.

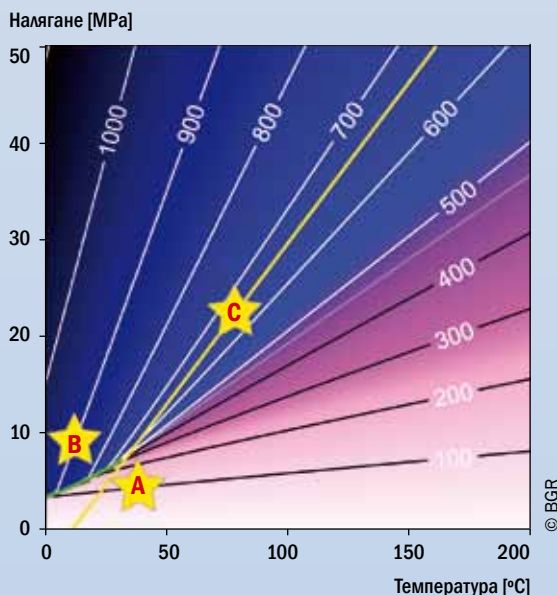
Изсушаването е друг феномен, предизвикан от инжектирането. След фазата на окисляване, остатъчните води около нагнетателния интервал се разтварят в инжектирания сух газ, който от своя страна концентрира химичните съединения в солен разтвор*. Минералите (като соли) могат да се утаят, когато разтворът повиши значително концентрацията си и това ще намали проникваемостта около сондажа.

Тези условия на нагнетяване зависят от сложни, взаимодействащи помежду си процеси, които протичат локално около нагнетателния сондаж и са силно зависими от времето и разстоянието от сондажния ствол. За оценка на тези ефекти са използвани множество моделирания. Нагнетяваните количества трябва да бъдат внимателно проследени за да се избегнат процеси, които могат да ограничат нагнетяването на желаните обеми CO_2 .

Състав на потока от CO_2

Съставът и чистотата на потока от CO_2 , които се получава в процеса на улавяне, имат значително влияние върху всички последващи аспекти на проекта за съхранение на CO_2 . Присъствието на няколко процента от други субстанции, като вода, водороден сулфид или сероводород (H_2S), серни и азотни оксиди (SO_x , NO_x), азот (N_2) и кислород (O_2), ще повлияе на физичните и химичните характеристики на CO_2 и респективно на неговото поведение и влияние. Затова присъствието на такива субстанции трябва да бъде внимателно следено при моделиране на етапите на компресиране, транспорт и нагнетяване, а също и при настройване на работните условия и съоръженията.

В заключение, транспортът и нагнетяването на големи количества CO_2 вече е осъществимо. Обаче, ако геоложкото съхранение на CO_2 намери широко приложение, всичките етапи в него трябва да се съобразяват поотделно за всеки един проект за съхранение. Ключовите параметри са: термодинамичните характеристики и дебити на потока от CO_2 (Фиг. 3), дебити на потока (количествата) и резервоарните условия.



Фигура 3
Плътност на чистия CO_2 (в kg/m^3) като функция от температурата и налягането. Жълтата линия показва нормалното изменение на налягането и температурния градиент в седиментния басейн. На дълбочини по-големи от 800 м (~ 8 MPa), резервоарните условия благоприятстват по-големи плътности (син фон). Зелената линия е фазовата граница между газообразния и течния CO_2 . Типичните налягания и температурни условия за улавяне, транспорт и съхранение са показани съответно с А, В и С.

Какво става с CO₂ постъпил в съхраняващия резервоар?

Веднъж инжектиран в резервоара, CO₂ ще запълва постепенно поровите пространства под покривката. С течение на времето част от CO₂ ще се разтвори и евентуално ще се трансформира в минерали. Тези процеси протичат по различно време и допринасят за постоянното съхранение.

Механизми за съхранение

Когато се инжектира в резервоара, CO₂ запълва скалното порово пространство, което в повечето случаи вече е запълнено със солена вода.

След инжектирането на CO₂ започват да действат следните механизми. Първият е считан за най-важен и предпазва издигането и излизането на CO₂ на повърхността. Другите три механизма повишават ефективността и сигурността на съхранение във времето.

1. Акумулация под покривката (Структурно улавяне)

Плътният CO₂ е по-лек от водата и започва да се издига нагоре. Това движение спира, когато CO₂ достигне скален пласт, който е непроницаем и се нарича „покривка“. Покривката, обикновено изградена от глина или сол, действа като капан, който пречи на всяко движение на CO₂ нагоре, което осигурява неговото натрупване точно под нея. **Фигура 1** показва движението на CO₂ нагоре по поровото пространство в резервоара (показано в синьо) докато достигне покривката.

2. Задържане в малки пори (Остатъчно улавяне)

Остатъчното натрупване се получава, когато поровите пространства в резервоара са толкова малки, че CO₂ не може да продължи движението си нагоре независимо от разликата в плътността със заобикалящата вода. Този процес се случва главно по време на миграцията на CO₂ и обикновено може да задържи няколко процента от инжектирания CO₂ в зависимост от характеристиките на резервоарната скала.

3. Разтваряне (Разтварящо улавяне)

Малка част от инжектирания CO₂ е разтворен или е започнал да се разтваря в соления разтвор, наситил поровите пространства на резервоара. Следствие от разтварянето е, че водата с разтворен CO₂ е по-тежка от водата без CO₂ и това причинява потъването ѝ към дъното на резервоара. Степента на разтваряне зависи от контакта между CO₂ и соления разтвор. Количеството CO₂, което може да се разтвори се ограничава от максимална концентрация. Обаче вследствие на движението на инжектирания CO₂ нагоре и на водата с разтворен CO₂ надолу, има непрекъснато обновяване на контакта между соления разтвор и CO₂ и това повишава количеството, което може да бъде разтворено. Тези процеси са относително бавни, защото протичат в тесни порови пространства. Приблизителните оценки в проекта Слейпнер показват, че около 15% от инжектирания CO₂ е разтворен след 10 години инжектиране.

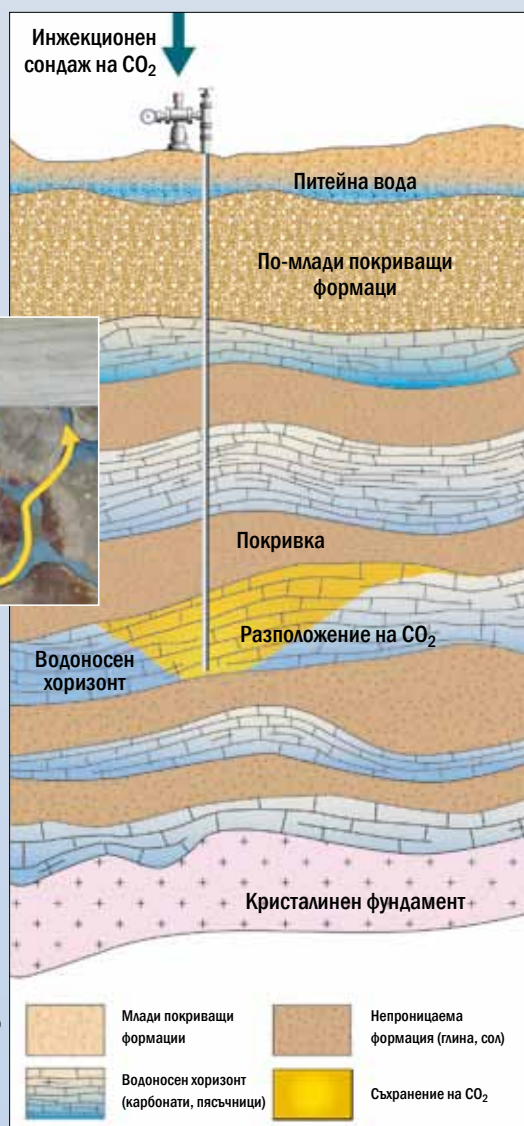
4. Минерализация (Минерално улавяне)

CO₂, особено в комбинация със соления разтвор в резервоара, може да реагира с минералите, изграждащи скалата. Някои минерали могат да се разтворят, докато други могат да се утаят, всичко зависи от pH и минералите, изграждащи резервоарната скала (**Фиг. 2**). Оценките в Слейпнер показват, че от

Микроскопски образец



Фигура 1
Инжектираният CO₂, който е по-лек от водата, мигрира нагоре и е спрял от непроницаеми скали.





Фигура 2
Плътният CO_2 мигрира нагоре (светло-сините мехурчета), разтваряйки и реагирайки със зърната на скалата, което довежда до утаяване на карбонатни минерали по повърхността на зърната (в бяло).

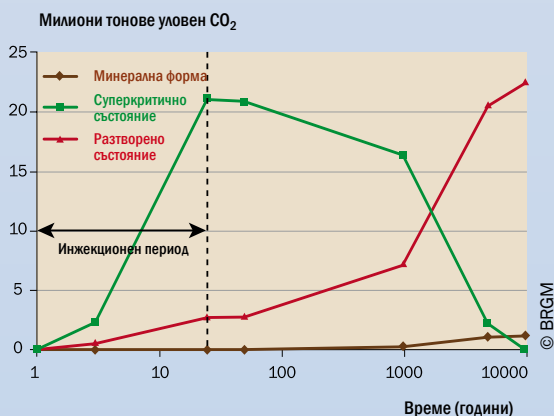
носително малка част от CO_2 ще бъде задържана от протичащата минерализация след много дълъг период от време. След 10 000 години само 5% от инжектирания CO_2 ще бъде минерализиран, докато 95% ще бъде разтворен без да остане CO_2 в самостоятелна плътна фаза.

Относителната важност на тези улавящи механизми е специфична за всеки случай, т.е. зависи от характеристиките на всяко място за съхранение. Например в куполообразните резервоари CO_2 ще остане предимно в плътна фаза дори след много дълго време, докато в пластовите резервоари като Слейпнер, повечето от инжектирания CO_2 ще се разтвори или минерализира. Развитието на пропорциите от CO_2 в различните улавящи механизми за находището Слейпнер е показано на **Фигура 3**.

Как знаем всичко това?

Познаването на тези процеси идва главно от четири информационни източника:

- **Лабораторни изследвания:** локални експерименти за минерализация, приток и разтваряне могат да бъдат



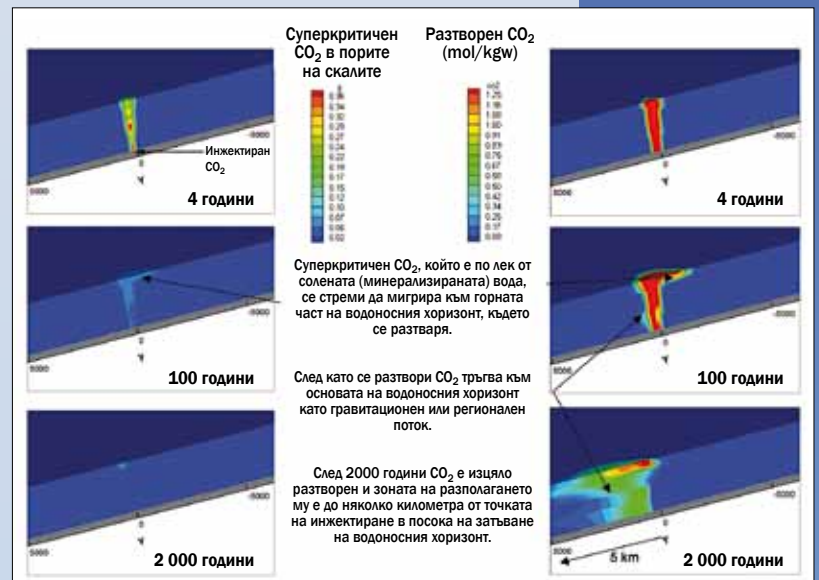
Фигура 3
Различни форми на съхранение на CO_2 в резервоара на Слейпнер според моделирания на потока. CO_2 е уловен в суперкритично състояние от механизми 1 и 2, в разтворено състояние от механизъм 3 и в минерална форма от механизъм 4.

извършени върху скални образци - те ще дадат представа за краткосрочни и локални процеси.

- **Цифрови моделирания:** има компютърни модели, които могат да бъдат използвани за предсказване на поведението на CO_2 за много по-дълги периоди от време (**Фиг. 4**). Лабораторните изследвания са използвани за калибриране на цифровите моделирания.
- **Изучаване на естествените резервоари на CO_2 под земята,** в които CO_2 (основно с вулкански произход) е уловен за дълъг период от време, често милиони години. Такива случаи се отбелязват като „естествен аналог“*. Тези места ни дават информация за поведението на газа и последствията от много дългото присъствие на CO_2 под земята.
- **Мониторинг на съществуващи демонстрационни проекти за геоложко съхранение на CO_2 ,** като Слейпнер (в акваторията на Норвегия), Уейбърн (Канада), Ин Салах (Алжир) и К12-Б (в акваторията на Холандия). Резултатите от краткосрочните моделирания могат да бъдат сравнени с реалните полеви данни, което би помогнало за повишаване достоверността на моделите.

Само с непрекъснато сравняване на информацията от тези четири източника е възможно да се получи достоверно познаване на всички процеси, протичащи на дълбочина около 1 000 м.

Фигура 4
3D моделиране на миграцията на CO_2 в акюифер (водоносен хоризонт) след инжектиране на 150 000 т за 4 години в акюифера „Догер“ във Франция. Показани са суперкритичен CO_2 (в ляво) и разтворен CO_2 в солени разтвор (в дясно) 4, 100 и 2000 години след започване на инжектирането на CO_2 . Моделирането е направено по полеви данни и експерименти.



В заключение, ние знаем, че безопасността на съхранението на CO_2 трябва да се повишава с течение на времето. Най-критичният момент е намирането на резервоар с подходяща покривка над него, която може да задържи CO_2 (структурно улавяне). Процесите, свързани с разтваряне, минерализация и остатъчно улавяне, работят за възпрепятстване на миграцията на CO_2 към повърхността.

Може ли CO₂ да изтече от резервоара и ако се случи, какви са последиците?

Основавайки се на изучаването на природните системи, не се очаква да се прояви някакво по-значително изтичане на CO₂ от внимателно подбраните места за съхранение. Природните резервоари, съдържащи газ, ни помагат да разберем условията, при които газът се улавя в тях или изтича. Местата на изтичане ни помагат да разберем какви може да бъдат вероятните влияния на изтичащия CO₂.

Пътища на изтичане

Най-общо потенциалните пътища за изтичане са или създадени от човека (като дълбоките сондажи), или природни (като пукнатинни системи и разломи). Както действащите, така изоставените сондажи могат да представляват пътища на изтичане, защото: (1) те формират директна връзка между земната повърхност и резервоара, и (2), те са изградени от материали произведени от човека, които могат да корозират с течение на времето (Фиг. 1). Допълнително усложнение е, че не всички сондажи са прокарани с една и съща технология. Новите сондажи са по-сигурни в сравнение със старите. Във всеки случай се счита, че рискът от изтичане на CO₂ през сондажите е малък, защото и новите, и старите сондажи могат да бъдат наблюдавани много ефективно, като се използват чувствителни геохимични и геофизични методи, и защото в петролната индустрия вече съществува технология за всякакви аварийни действия, които може да са необходими. Изтичането по естествени разломи и пукнатини, каквито може да има в покривката или покриващия скален комплекс* е по-сложен процес, защото те имат незаконо-

мерна геометрия и променлива проницаемост. Доброто изучаване и техническо познаване на изпускащите и неизпускащите природни системи ще ни позволи да разработим проекти за съхранение на CO₂, които имат същите характеристики, както тези в природните резервоари, които са уловили и съхраняват природния газ и CO₂ в продължение на хиляди и милиони години.

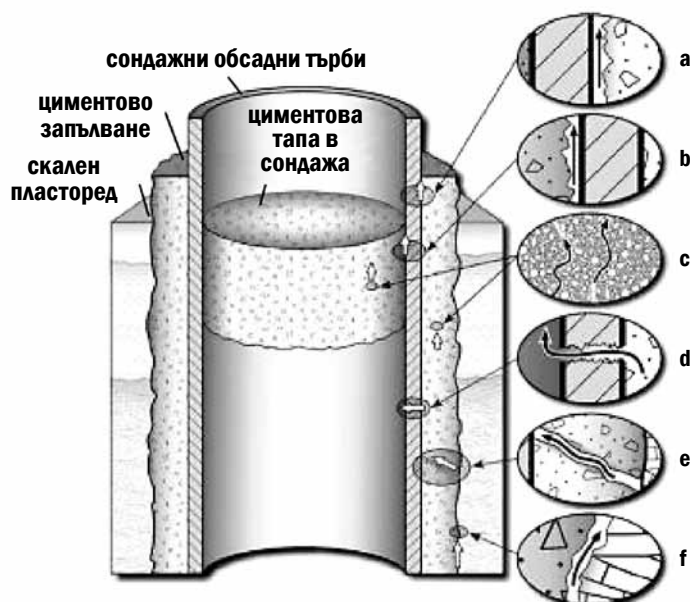
Природните аналози са научените уроци

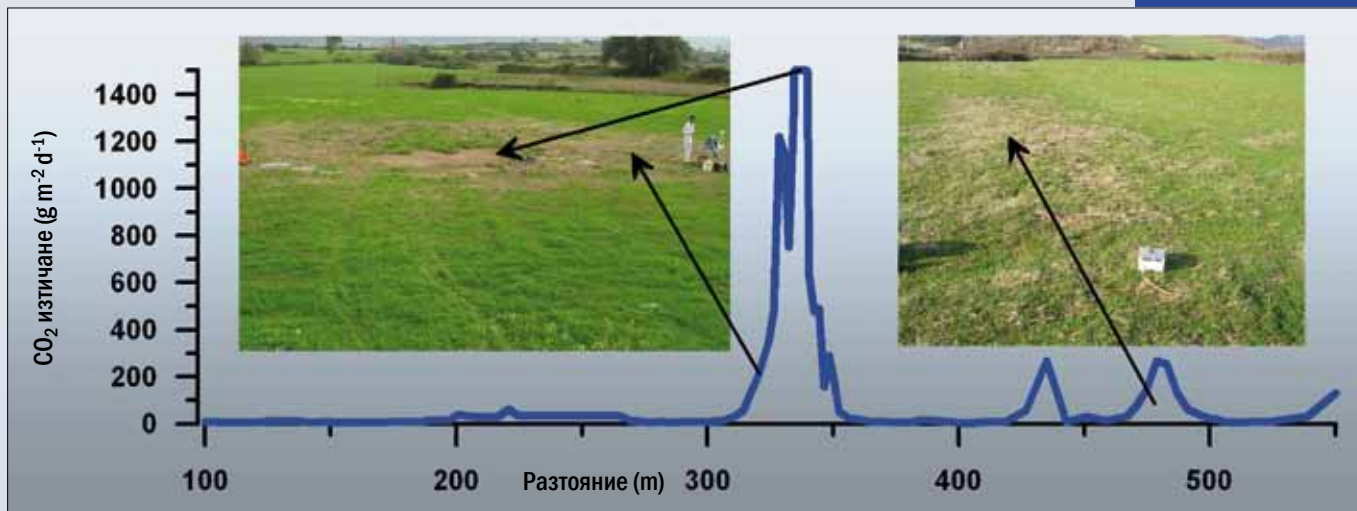
Природните системи (наречени „аналози“) са безценни източници на информация за подобряване на нашите разбирания за дълбочинната миграция на газа и природната газова обмяна между земята и атмосферата. Основните изводи, направени от проучването на множество изпускащи и неизпускащи природни газови резервоари са:

- в подходящи геоложки условия природно-образуваният газ може да се съхранява в продължение на стотици хиляди до милиони години;
- изолирани газови резервоари и джобове даже съществуват в най-неблагоприятните геоложки обстановки (вулканските зони);
- миграцията на значително количество газ изисква адвекция (т.е. поток, движен от налягането), защото дифузията е много бавен процес;
- за да се създаде адвекция, флуидните условия в резервоара трябва да бъдат близки до геостатичното налягане* за да се държат разломите и пукнатините отворени или за да създадат механично нови пътища;
- зоните, в които природно образуваният газ излиза на земната повърхност, са разположени основно само в много разломени вулканични и сеизмични райони с газови изтичания, разположени по протежението на активни или доскоро активни разломи;
- значителни газови изтичания се срещат много рядко и са ограничени само във много разломени вулкански и геотермални райони, където непрекъснато се образува CO₂ от природни процеси;
- газовите аномалии на земната повърхност обикновено се проявяват локално и имат ограничено влияние върху близката до земната повърхност среда.

Следователно, необходима е комбинация от много специфични условия преди да започне изтичане. Затова е

Фигура 1
Възможни пътища за CO₂ в сондажа. Изтичане през променен материал (с, d, e) или по протежение на ствола (a, b, f).





много малко вероятно добре подбрано и внимателно изградено геоложко хранилище за CO_2 да пропуска. Въпреки, че вероятността за изтичане е малка, трябва много добре да изучим предизвиканите процеси и потенциалните опасности. Това ще ни помогне да изберем, проектираме и експлоатираме най-безопасните места за геоложко съхранение на CO_2 .

Влияние върху хората

Ние дишаме CO_2 през цялото време. CO_2 е опасен за човешкото здраве само в много високи концентрации, със стойности до 50 000 ppm (5%), като причинява главоболие, виене на свят и гадене. По-голяма концентрация може да причини смърт, ако влиянието е твърде продължително, или задушаване, когато концентрацията на кислород във въздуха падне под 16%, т.е. под необходимото ниво за поддържане на човешкия живот. Обаче, ако CO_2 изтече в отворен или равнинен район, той бързо се разсейва във въздуха, дори при слаб вятър. Тогава потенциалният риск за населението се свежда до затворени райони или топографски депресии, в които концентрацията може да се повиши, защото CO_2 е по-плътен от въздуха и се утаява близо до земната повърхност. Познаването на природните характеристики в районите с възможна дегазация е необходимо за превантивни мерки и управление на риска. Реално много хора живеят в райони, характеризиращи се с ежедневни еманации на природен газ. Например в Чампино, близо до Рим, къщите се намират само на 30 м от зоната с природна дегазация, в която концентрациите на CO_2 в почвата достигат 90%, и около 7 т CO_2 се освобождават ежедневно в атмосферата. Местните жители избягват всякаква опасност като спазват строго някои прости правила - да не спят на приземните етажи и да поддържат къщите си добре вентилирани.

Влияние върху околната среда

Потенциалното влияние върху екосистемите варира в зависимост от това дали хранилището за CO_2 се намира на сушата или в морската акватория. В морските екосистеми главният ефект от изтичането на

CO_2 е локалното понижаване на pH и асоциираното влияние предимно върху животните, които живеят на морското дъно и не могат да се преместят. От там обаче, последствията са ограничени в пространството и екосистемата показва признаци на бързо възстановяване след като газовото изтичане затихне.

В сухоземните екосистеми влиянието може да бъде обобщено така:

- **растителност** - макар че концентрации на CO_2 в почвата до около 20-30% могат всъщност да помогнат за наторяването и така да ускорят растежа на отделни видове. Но при стойности по-високи от посочените някои от растителните видове могат да загинат. Този ефект е изключително локализиран в зоната на природната дегазация, като само на няколко метра от нея растителността остава силна и здрава (Фиг. 2).
- **качество на подземните води** - химичният състав на подземните води може да бъде променен при постъпване на CO_2 в тях. Водата се окислява и може в нея да се появят елементи от скалите и минералите на водоносния хоризонт. Дори CO_2 да изтече в хоризонт с питейна вода, ефектът ще остане локализиран и влиянието му се следи непрекъснато от изследователи. Интересно е, че много водоносни хоризонти в Европа са природно обогатени с CO_2 и тази вода всъщност се бутилира и продава като „газирана минерална вода“.
- **компактност на скалите** - окисляването на подземните води може да увеличи разтваряне на скалите, да намали структурната им компактност и да разшири тяхната порестост. Обаче този вид влияние се проявява само в много специфични геоложки и хидрогеоложки условия (тектонска активност, високи дебити на потока във водоносния хоризонт, карбонатен скален състав), които не се очаква да присъстват в избраните места за съхранение на CO_2 .

В заключение, понеже влиянието на всяко хипотетично изтичане на CO_2 ще зависи от специфичната геоложка обстановка, то пълното познаване на геоложката и структурна обстановка в дълбочина ще ни позволи да идентифицираме всички възможни пътища за миграция, да избираме места с ниска вероятност от изтичане на CO_2 , да прогнозираме поведението на газа и да оценяваме и предотвратяваме всяко по-значително влияние върху хората и екосистемите.

Фигура 2
Влияние на изтичането на CO_2 върху растителността при високо (ляво) и намалено (дясно) изтичане. Влиянието е ограничено в зоната на изтичане на CO_2 .

Как да контролираме мястото на съхранение в дълбочина и на повърхността?

Всички места за съхранение на CO₂ трябва да бъдат контролирани за тяхното действие, сигурност и влияние върху околната среда, обществото и икономиката. Трябва да бъде изградена стратегия какво точно ще бъде контролирано и как.

Защо имаме нужда от мониторинг?

Извършването на мониторинг в мястото за съхранение ще бъде решаващо за постигане на принципната цел за геоложкото съхранение на CO₂, а именно дългосрочно премахване от атмосферата на антропогенния CO₂. Причините за мониторинг са много, в това число:

- **Работни:** да се контролира и оптимизира процеса на инжектиране.
- **Безопасност и околна среда:** да се минимизира и предотврати всякакво влияние върху хората, дивата природа и екосистемите в близост до хранилището; да се постигне глобално намаляване на климатични промени.
- **Социални:** да се осигури необходимата обществена информация за разбиране на сигурността и безопасността на хранилищата, което ще спомогне за спечелване на общественото доверие.
- **Финансови:** да се изгради пазарно доверие към технологията за улавяне и съхранение на CO₂ и да се утвърдят съхранените обеми CO₂ като „намалени емисии“ в бъдещото развитие на схемата за търговия с вредни емисии в Европейския съюз.

Контролът на първоначалното състояние на околната среда (т.н. „основна линия“) и последващата промяна на обстановката е важно регулаторно изискване в Директивата на ЕС за улавяне и съхранение на CO₂, публикувана на 23 април 2009 г. Операторите трябва да покажат, че обстановката за съхранение отговаря на наредбата и така ще бъде дълго време. Мониторингът е важен елемент за намаляване на не-сигурността в поведението на хранилището и трябва да бъде здраво свързан с управлението на дейностите по безопасност.

Какви са целите на мониторинга?

Мониторингът може да бъде фокусиран върху различни цели и процеси в различни части на хранилището, като:

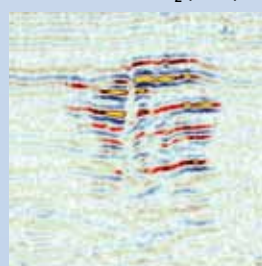
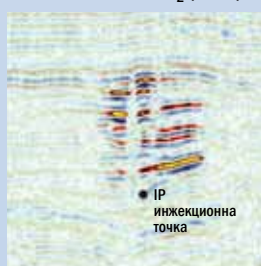
- Изобразяване на процеса - проследяване на движението на CO₂ от точката на инжектирането му. Това осигурява ключови данни за калибриране на моделите, които показват бъдещото разпределение на CO₂ в мястото за съхранение. Има много утвърдени технологии, повечето значително повтарят сеизмичните наблюдения, които бяха успешно използвани в няколко демонстрационни и пилотни проекта (Фиг. 1).
- Компактност на покривката - необходимо е да се оцени дали CO₂ е изолиран в резервоара за съхранение и да се осигури ранно предупреждение за всякакво неочаквано мигриране на CO₂ нагоре. Това може да е много важно по време на инжектиращата фаза от проекта, когато наляганията в резервоара са значително повишени, но временно.
- Компактност на сондажа. Това е важно условие, тъй като дълбоките сондажи могат потенциално да осигурят директен път за миграция на CO₂ към земната повърхност. Сондажите за инжектиране на CO₂, както и всички наблюдателни сондажи, или по-стари изоставени сондажи, трябва да бъдат внимателно наблюдавани по време на инжекционния етап и след това, за да се предотврати внезапното изтичане на CO₂. Мониторингът също се използва и за проверка дали всички сондажи са ефективно запечатани, след като са били ликвидирани. Съществуващите геофизични и геохимични системи за мониторинг, които са стандартна практика в нефтената и газовата индустрия, могат да бъдат инсталирани в или над сондажите за да осигурят ранно предупреждение и безопасност.
- Миграция в отгорележащите скали. В местата за съхранение, в които по-плитко залегащите скални комплекси имат сходни качества с тези на покривката, отгорележащите скали могат да бъдат ключов компонент в намаляването на риска от изтичане на CO₂ в атмосферата или морето. Ако наблюдението в резервоара и покривката покаже неочаквана миграция нагоре, ще бъде необходимо наблюдение и на отгорележащите скални комплекси. Много от техниките, използвани при изобразяването на процеса и наблюдението на компактността на покривката могат да бъдат използвани и при наблюдението на отгорележащите скални комплекси.
- Изтичане на земната повърхност и атмосферно измиване. За да се уверим, че инжектирания CO₂ не е мигрирал към земната повърхност, има налични редица геохимични, биохимични и дистанционни технологии, които могат да локализируют изтичания и да оценят разпределението на CO₂ в почвата и неговата дисперсия в атмосферата и в морската вода (Фиг. 2).

Фигура 1
Сензично изображение на наблюдаваното разположение на CO₂* в пилотния проект Слейпнер преди инжектирането (което започва през 1996) и след инжектирането (съответно 3 и 5 години по-късно).

Преди инжектирането (1994)

2.35 млн. тона CO₂ (1999)

4.36 млн. тона CO₂ (2001)



- Количество на съхранения CO_2 за регулиращи и фискални цели. Въпреки, че обемът на инжектирания CO_2 може да бъде замерен на устието на сондажа, определянето на неговото количество в резервоара е голямо предизвикателство от техническа гледна точка. Ако се проявява изтичане нагоре, то останалото съхранено количество трябва да бъде определено за отчитане в националната инвентаризация на вредните емисии и за бъдещите схеми на емисионното търгуване.
- Движения на земята и микросейсмичност*. Повишеното налягане в резервоара, получено от инжектирането на CO_2 , при определени ситуации би могло да увеличи потенциалната опасност за микросейсмичност и малки движения на земните маси. Има техники за микросейсмичен мониторинг и дистанционни методи (изследвания от самолет или сателити), които могат да забележат и измерят дори най-дребните деформации на земната повърхност.

Как се извършва мониторинга?

Широк спектър от мониторингови техники вече е използван в провежданите демонстрационни и проучвателни проекти. Те включват методи, които директно следят CO_2 , или индиректно измерват неговите ефекти върху скалите, флуидите и околната среда. Директните измервания включват анализи на флуидите от дълбоките сондажи, или измервания на концентрациите на газ в почвата и атмосферата. Индиректните методи включват геофизични изследвания, както и наблюдение за промените на налягането в сондажите или промените на pH в подземните води.

Мониторинг ще е необходим за всички хранилища, независимо дали са в морето или на сушата. Подборът на подходяща мониторингова техника ще зависи от техническите и геоложки характеристики на хранилището и целите на наблюдение. Широк спектър от мониторингови техники вече съществува (Фиг. 3), много от тях са утвърдени в нефтената и газова промишленост. Тези техники бяха адаптирани и за съхранението на CO_2 .

Провеждат се изследвания за оптимизация на съществуващите методи и развитие на иновативни технологии с цел подобряване на резолюцията и надеждността, понижаване на цените, автоматизиране на операциите и показване на ефективността.

Мониторингова стратегия

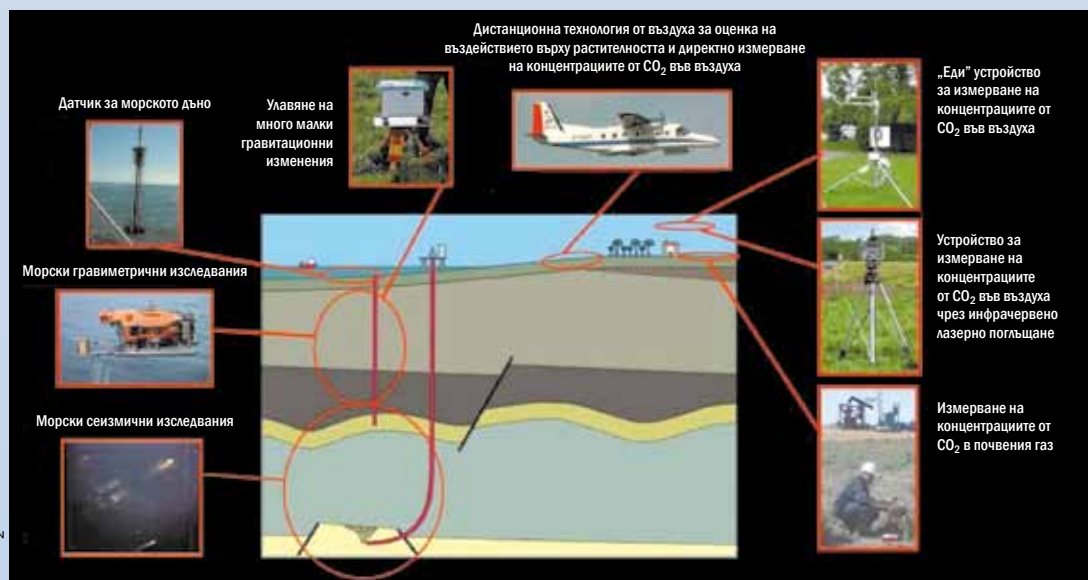
При съставянето на мониторингова стратегия трябва да бъдат взети много решения, които зависят от геоложките и инженерните условия, специфични за всяко хранилище, като: геометрия и дълбочина на резервоара, очаквано разпространение на струите от CO_2 , възможни пътища на изтичане, покриващия геоложки строеж, време и дебит на инжектиране, както и повърхностни характеристики, като: топография, гъстота на населението, инфраструктура и екосистеми. След като са взети решения за най-подходящи измервателни техники и места за тяхното разполагане, трябва да бъдат проведени контролни изследвания преди да започне инжектирането, които да служат като еталон за всички бъдещи измервания. И накрая, всяка мониторингова програма трябва да бъде гъвкава, така че да може да се включи според изискванията дадения проект. Мониторинговата стратегия трябва да може да обедини всички тези изисквания, докато в същото време подобряването на ценовата ѝ ефективност ще формира критичния компонент в анализа на риска, безопасността и ефективността на хранилището.

В заключение, ние знаем, че мониторинга при съхранението на CO_2 вече е възможен чрез много технологии, които са на пазара или са в процес на разработка. Провежданите изследвания сега целят не само развитие на нови техники (особено за разполагане на морското дъно), но и подобрене изпълнението на мониторинга и неговата себестойност.



© CO₂GeoNet

Фигура 2
Мониторингова шамандура със соларни панели за енергийно обезпечаване, лодка и устройство за взимане на газови проби от морското дъно.



Фигура 3
Малка селекция, показваща разнообразието от съществуващи технологии за наблюдение на различните компоненти в системата за съхранение на CO_2 .

Какви безопасни критерии трябва да бъдат наложени и спазвани?

За да се осигури сигурност и ефективност на съхранението трябва да бъдат наложени условия за неговото проектиране и работа от регулаторните власти, които да се спазват от операторите.

Въпреки, че геоложкото съхранение на CO₂, като надеждна опция за смекчаване на климатичните промени, вече е широкоприето, остава да бъдат утвърдени критериите за безопасност по отношение здравето на хората и локалната околната среда преди да се разгърне индустриалното му приложение. Тези критерии трябва да бъдат определени като изисквания, наложени на операторите от регулаторните власти, за да е сигурно, че локалното влияние върху здравето на хората и околната среда (включително подземните води) ще бъдат незначително за къс, среден и дълъг период от време.

Един от ключовите моменти при геоложкото съхранение на CO₂ е, то да бъде дълготрайно, и следователно хранилищата не трябва да пропускат. Обаче, сценарият „какво ако?“ означава, че рискът трябва да бъде оценен и операторите трябва вземат мерки срещу изтичане или аномално поведение на хранилищата. Според IPCC*, инжектираният CO₂ трябва да остане под земята поне 1000 години, което ще позволи на атмосферните концентрации от CO₂ да се стабилизират или да намалют чрез природния обмен с океанската вода и по този начин ще се намали повишението на температурата на земята, дължащо се на глобалното затопляне. Обаче, локалните влияния трябва да бъдат оценени за време от няколко дни до много хиляди години.

Няколко основни стъпки трябва да бъдат определени за времето на реализацията на проекта за съхранение на CO₂ (Фиг. 1). Безопасността ще бъде осигурена чрез:

- внимателен избор и характеристика на мястото за съхранение;
- оценка на сигурността;
- правилни действия;

на изтичане и с всякакви по-плитко залягащи водоносни хоризонти;

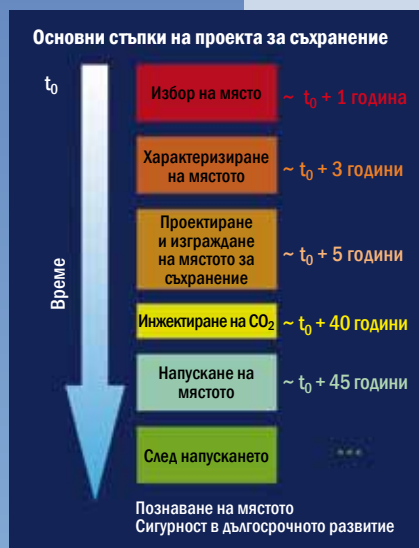
Критерии за сигурност при проектирането

Безопасността трябва да бъде показана преди реализацията на проекта. По отношение избора на хранилище трябва да бъдат изучени следните главни компоненти:

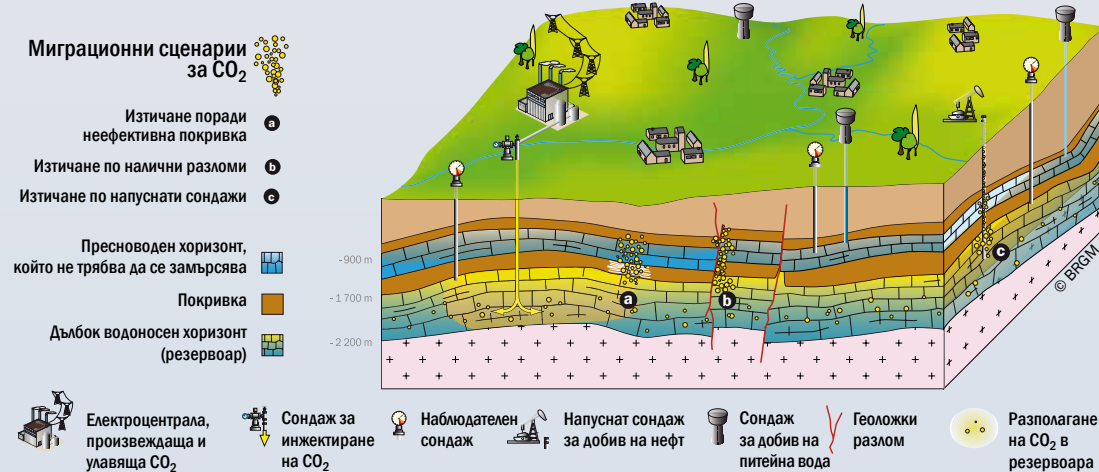
- резервоарът и покривката;
- отгорележащите скални комплекси и особено непроницаемите от тях, които могат да служат като второстепенни покривки;
- присъствието на проникваеми разломи или сондажи, които могат да бъдат пътища за миграция към земната повърхност;
- питейно-водоносни хоризонти;
- население и околна среда.

Технологиите за проучване на нефт и газ се използват за оценка на геологията и геометрията на хранилището. Флуидният поток, химичното и гео-механично моделиране на CO₂ в резервоара ще позволят да се прогнозира поведението на CO₂ и дългосрочните последиствия, както и да се определят параметрите за ефективно инжектиране. Като резултат, внимателната характеристика на хранилището трябва да позволи да се определи сценария за „нормално“ поведение при съхранение, свързан с подходящото за съхранение място, за което ние сме убедени, че CO₂ ще остане в резервоара. Оценка на риска след това е необходимо да предвиди по-малко възможни сценарии за бъдещото състояние на хранилището, включващи неочаквани събития. Особено е важно да се предвидят всякакви възможни пътища за изтичане, излизане на повърхността и съответните ефекти (Фиг. 2). Всеки сценарий за изтичане трябва да бъде анализиран от специалисти, а където е възможно, да се приложи количествено моделиране за оценка на вероятността да се случи и на потенциалните трудности. Като пример, развитието на разполагането на CO₂ трябва внимателно да бъде картографирано, за да се види всяка възможна връзка с разломна зона. При анализа на риска трябва да бъдат внимателно оценени възможните промени във входните параметри и несигурността. Възможните ефекти на CO₂ върху хората и околната среда трябва да бъдат определени чрез оценка на въздействието върху околната среда (ОВОС), което е обичайна практика за всеки лицензионен процес на индустриално съоръжение. В този процес и двата сценария (нормалният и изтичащият) ще бъдат изследвани, за да се оцени всеки потенциален риск.

Фигура 1
Различните етапи на проекта за съхранение.



- подходящ план за мониторинг;
 - адекватен аварийен план;
- Свързаните с тях критични задачи са:
- сигурност, че CO₂ остава в резервоара;
 - поддържане компактността на сондажа;
 - запазване на физичните характеристики на резервоара (порестост, проникваемост, инжектируемост) и непроницаемите свойства на покриващите скали;
 - внимателен мониторинг на потока от CO₂, обръщайки специално внимание на всякакви примеси, които не са отстранени в процеса на неговото отделяне. Това е важно за да се избегне всякакво неблагоприятно взаимодействие със сондажа, резервоара, покривката, а в случай



Фигура 2
 Пример за потенциални сценарии на изтичане.

Краткосрочната и дългосрочна мониторингова програма трябва да бъде изготвена според анализа на рисковата оценка и трябва да контролира критичните параметри, определени в различните сценарии. Нейните главни цели са да следи разположението и миграцията на CO₂ в хранилището и компактността на сондажа и покривката, да открива всяко изтичане на CO₂, да оценява качеството на подземните води и да потвърждава, че никакъв CO₂ не достига до земната повърхност. Плановите за ограничаване на климатичните промени и бързо реагиране са последният елемент от оценката на безопасността и имат за цел детайлизиране на списъка с аварийни действия, които трябва да бъдат предприети в случаи на евентуално изтичане или аномално поведение. Това включва компактността на покривката и сондажа по време на инжектирането на CO₂ и след това, и екстремни мерки за бързо реагиране, като обратимост на съхранението. Съществуващото ноу-хау обхваща стандартните нефто-газови технологии, като: прекратяване на дейностите, намаляване на налягането на инжектиране, частично или пълно извличане на газа, изпомпване на вода за облекчаване на налягането, извличане на плитко разположения газ и т.н.

Критерии за безопасност по време на операциите и след завършването им

Главната грижа за безопасността е свързана с нагнетателната фаза: след като спре инжектирането, намаленото налягане ще направи мястото за съхранение по-сигурно. Увереността във възможността да инжектираме и съхраняваме CO₂ по безопасен начин се дължи на опита на индустриалните компании. CO₂ е донякъде обикновен продукт, използван в различни индустрии, така че работата с този продукт не трябва да създава нови проблеми. Проектирането и контролът на операциите ще се основава главно на познанията от нефтената и газова индустрия, по-точно на сезонното съхранение на природния газ в подземни хранилища или интензифицирания добив на нефт. Основните параметри, които трябва да бъдат контролирани, са:

- инжекционното налягане и дебит - първото трябва да бъде поддържано по-ниско от налягането, което предизвиква напукване в покривката;
- инжектирания обем, за да се оправдаят очакванията, дефинирани при моделирането;

- състава на инжектирания поток от CO₂;
- компактността на нагнетателния сондаж(и) и всички сондажи в близост до зоната на разпространение на CO₂;
- площта на разпространение на CO₂ и откриване на всяко изтичане;
- земната стабилност.

По време на нагнетяването, реалното поведение на инжектирания CO₂ непрекъснато трябва да бъде сравнявано с предвижданията. Ако се установи някакво аномално поведение, програмата за наблюдение трябва да се подобри и ако е необходимо да се коригира. В случай на подозрително изтичане, подходящи уреди за мониторинг трябва да бъдат разположени в специфичната част от хранилището, в пространството от подземния резервоар до земната повърхността. Това би открило всяко повишено присъствие на CO₂ и още повече, всяко нежелано влияние, което би било вредно за питейните водоносни хоризонти, околната среда и съответно хората. Когато завърши инжектирането, започва заключителната част: сондажите трябва да бъдат подходящо запечатани и ликвидирани, програмите за моделиране и мониторинг осъвременени, и ако е необходимо да бъдат предприети мерки за намаляване на риска. След като се прецени, че рискът е достатъчно нисък, отговорността за хранилището ще бъде предоставена на държавните власти и мониторинговият план може да бъде минимизиран или спрян.

Излязлата Европейска Директива определя законовата рамка за доказване, че улавянето и съхранението на CO₂ е реална възможност за ограничаване на климатичните промени и, че този процес може да бъде извършен безопасно и отговорно.

В заключение, критериите за безопасност са най-важните за успешното индустриално развитие на съхранението на CO₂. Те трябва да бъдат адаптирани към всяко отделно хранилище. Тези критерии ще са особено важни за общественото приемане и особено за лицензионния процес, при който регулаторните органи трябва да определят нивото на детайлност за изискванията за безопасност.

Водоносен хоризонт: проникваемо скално тяло, съдържащо вода. Най-плитките водоносни хоризонти съдържат питейна вода, използвана за човешка консумация. Тези на по-голяма дълбочина са запълнени със солена вода, която не е подходяща за ползване от хората. Те се наричат солени хоризонти.

Геостатично налягане: силата, упражнена върху скалния пласт в дълбочина от теглото на отгоре-лежащите скали. Геостатичното налягане се увеличава с нарастване на дълбочината.

Инжектируемост: характеризира колко е лесно да бъде инжектиран флуид (като CO_2) в геоложката формация. Определя се като се раздели инжектираното количество на разликата в налягането между точката на инжектиране в сондажа и това в пласта.

Микросейзмицит: слабо трептене или вибрация в земните недра, несвързани със земетресенията, което може да бъде предизвикано от различни природни и изкуствени сили.

Повишен добив на нефт (EOR): технология, която подобрява добива на нефт чрез инжектиране на флуиди (като пара или CO_2), което подпомага движението на нефта в резервоара.

Покривач скален комплекс: геоложките пластове, лежащи между резервоарната покривка и земната повърхност (или морското дъно).

Покривка: непроницаем скален пласт, който служи като бариера при движението на флуидите и газа, и който формира капана, когато покрива резервоара.

Порестост: процентът от общия обем скала, който не е запълнен с минерали. Тези празнини се наричат пори и те могат да бъдат запълнени с различни флуиди; обикновено при скалите на по-голяма дълбочина флуидът е солена вода, но може да бъде нефт или газ, като метан или природен CO_2 .

Природен аналог: естествено проявяващ се резервоар за CO_2 . Срещат се и двата случая - пропускащ и непропускащ резервоар, и тяхното изучаване може да

подобри нашето разбиране за дългосрочната съдба на CO_2 в дълбочинните геоложки системи.

Проницаемост: качеството или капацитета на пореста скала да пропуска флуид; това е мярка за количеството на флуидния поток при градиент на налягане.

Разположение на CO_2 : пространствено разпространение на супер критичния CO_2 в скалните комплекси.

Резервоар: скално тяло, което е достатъчно поресто и проникваемо, за да може да вмести и съхранява CO_2 . Пясъчниците и варовиците са най-често срещаните резервоарни скали.

Сондаж (или сондажен ствол): цилиндричен отвор направен със сондиране, по-специално дълбок отвор с малък диаметър, като на нефтен сондаж.

Солен разтвор: много солена вода, т.е. съдържаща висока концентрация на разтворени соли.

Суперкритичен: състоянието на флуид при налягания и температури над критичните стойности (31.03°C и 7.38 MPa за CO_2). Качествата на такива флуиди варират постоянно, от подобни на газ при ниско налягане до подобни на течност при високо налягане.

CCS: Улавяне и съхранение на CO_2 .

CSLF: Ръководен форум по отстраняване на въглерода. Международна инициатива за климатична промяна, която се фокусира върху развитието на подобрени и ефективни технологии за отделяне и улавяне на CO_2 и неговия транспорт и дългосрочно безопасно съхранение.

EU Geosapacity: завършен Европейски изследователски проект, който оценява общия капацитет за геоложко съхранение на индустриалните емисии от CO_2 в Европа.

GESTCO: завършен Европейски изследователски проект, който оценява възможностите за геоложко съхранение на CO_2 в 8 държави (Норвегия, Дания, Великобритания, Белгия, Холандия, Германия, Франция и Гърция).

IEAGHG: Международна Енергийна Агенция - Програма за изследване и развитие на парниковите газове. Международно сътрудничество, което цели: да оцени технологиите за намаляване на емисиите от парникови газове, да разпространи резултатите от тези проучвания, и да определи обектите за проучване, развитие и демонстрация, както и да популяризира съответната дейност.

IPCC: Междуправителствена експертна група по климатичните промени. Тази организация е основана през 1988 г. от WMO (Световна Метеорологична Организация) и UNEP (Програма за околна среда на Обединените Нации), за оценка на научна, техническа и социално - икономическа информация за разбирането на климатичните промени, тяхното потенциално влияние и опциите за адаптация и смекчаване на последиците. IPCC и Ал Гор са наградени с Нобелова награда за мир за 2007 г.

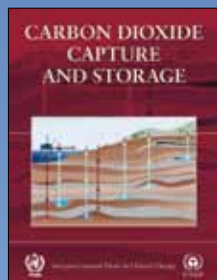
pH: мярка за киселинността на разтвора, където $\text{pH} = 7$ отговаря на неутрална среда.

Допълнителна информация:

Специален доклад на IPCC (Междуправителствена експертна група по климатичните промени) за CCS (Улавяне и съхранение на CO_2):
http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srrcs/srrcs_wholereport.pdf

Уеб-страница на Европейската комисия за CCS (Улавяне и съхранение на CO_2), включваща информация за законовите рамки и прилагането на директивата за улавянето и съхранението на CO_2
http://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs_en.htm

Уеб-страница на IEA GHG за методите на мониторинг:
http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html



Какво е CO₂GeoNet?

CO₂GeoNet е Европейска научна общност, към която може да се обърнете за ясна и изчерпателна информация относно геоложкото съхранение на CO₂, и авангардна и съществена технология за смекчаване на климатичните промени. CO₂GeoNet е създадена приоритетна мрежа от Европейската комисия по време на 6-та Рамкова програма (ЕС FP6, контракт 2004-2009). Тя обединява 13 института от 7 европейски страни, всички с висок международен статут и голям потенциал за изследвания по геоложкото съхранение на CO₂. През 2008 г. CO₂GeoNet е регистрирана като не печеливша асоциация по френското законодателство, за да може да продължи дейността си и след изтичането на контракта с Европейската комисия.

CO₂GeoNet има богат опит в изследователски проекти за: резервоара, покривката, потенциалните пътища за миграция на CO₂ към земната повърхност, методи за мониторинг, потенциално влияние върху хората и екосистемите, общественото възприятие и комуникация. CO₂GeoNet предлага разнообразие от услуги в четири основни области: 1) съвместно проучване; 2) обучение и изграждане на колективи; 3) научни консултации; 4) информация и комуникация.

Постепенно CO₂GeoNet набира сила и се превръща в траен научен еталон и авторитет в Европа, способен да осигури необходимата научна подкрепа за широкомащабното и сигурно геоложко съхранение на CO₂. Разширяването на тази общност в цяла Европа е приоритет на Европейския проект за геоложко съхранение на CO₂ (CGS), финансиран за координираща дейност в рамките на FP7 (2010-2013). CGS Европа обединява в здраво ядро CO₂GeoNet и 21 други изследователски института, и така покрива 28 европейски страни (24 членки и 4 присъединени страни). Като резултат е формирана група от няколко стотици учени, способна да се занимава с всички аспекти на геоложкото съхранение на CO₂ чрез мулти-дисциплинарна интеграция. Нашата цел е да предоставим на финансистите и обществото независима и научно обоснована информация за геоложкото съхранение на CO₂.



CO₂GeoNet: Европейската приоритетна мрежа за геоложко съхранение на CO₂



www.co2geonet.eu

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

CGS Европа: Общо Европейска координираща дейност по геоложкото съхранение на CO₂



www.cgseurope.net

CO₂GeoNet (13-те члена изброени по-горе); **CzGS** (Република Чехия); **GBA** (Австрия); **GEOECOMAR** (Румъния); **GEO-INZ** (Словения); **G-IGME** (Гърция); **GSi** (Ирландия); **GTC** (Литва); **GTK** (Финландия); **LEGMC** (Латвия); **ELGI** (Унгария); **LNEG** (Португалия); **METU-PAL** (Турция); **PGI-NRI** (Полша); **RBINS-GSB** (Белгия); **SGU** (Швеция); **SGUDS** (Словакия); **S-IGME** (Испания); **SU** (България); **TTUGI** (Естония); **UB** (Сърбия); **UNIZG-RGNF** (Хърватска).

CO₂GeoNet си е спечелила широко признание на Европейската и международна сцена.

CO₂GeoNet е одобрена от Carbon Sequestration Leadership Forum (CSLF).



CO₂GeoNet е в тясно сътрудничество с Програмата за Парников Газ на Международната Енергийна Агенция (IEAGHG).



Подготовка на брошурата

За да повиши обществената осведоменост за геоложкото съхранение на CO₂, CO₂GeoNet се заема с изясняването на основния въпрос „Какво означава в действителност геоложко съхранение на CO₂?“ Екип от видни учени от CO₂GeoNet са подготвили изясняването на шест уместни въпроса, основаващо се на световния изследователски опит. Целта беше да се предостави ясна и безпристрастна научна информация на широката публика, и да се насърчи диалога по важни въпроси, засягащи техническите аспекти на геоложкото съхранение на CO₂. Тази работа, сумирана в настоящата брошура, беше представена на Обучителния и Диалогов семинар в Париж на 3 Октомври 2007 г.

Брошурата „Какво означава в действителност геоложко съхранение на CO₂?“ на различни езици може да се сваля от: www.co2geonet.com/brochure.

CO₂GeoNet

Европейската приоритетна мрежа за геолошко съхранение на 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.



Българската версия е преведена и издадена от Софийския университет „Св. Климент Охридски“,
ГГФ - катедра „Геология, палеонтология и изкопаеми горива“
в рамките на проекта „CGS Europe - Общоевропейска координационна дейност
по геоложкото съхранение на CO₂“ от 7 РП на ЕС

