

Що насправді означає геологічне зберігання CO₂?

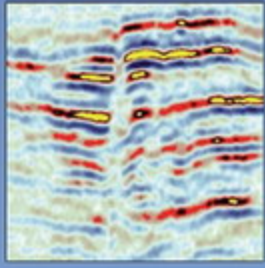
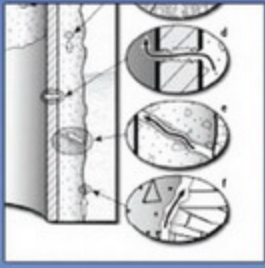
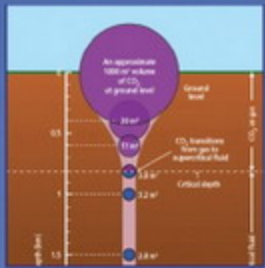
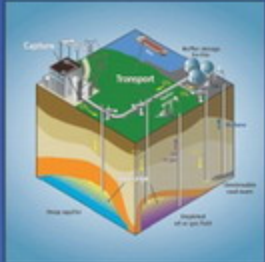
Відповідальне
використання
виплоного палива

Усунення основного
джерела парникових газів

Повернення вуглецю назад у землю

Резерв часу, необхідного
для розробки сприятливих
для клімату джерел енергії





Зміна клімату й необхідність у геологічному зберіганні CO ₂	4
1. Де й скільки CO ₂ ми можемо зберігати під землею?	6
2. Як можна транспортувати й закачувати великі обсяги CO ₂ ?	8
3. Що відбувається з CO ₂ в колекторі зберігання?	10
4. Чи може CO ₂ витікати з колектора і, якщо так, то якими можуть бути наслідки?	12
5. Як можна контролювати ділянки зберігання в глибині й на поверхні землі?	14
6. Які критерії безпеки має бути встановлено та враховано?	16
Словник	18
Що таке CO ₂ GeoNet?	19

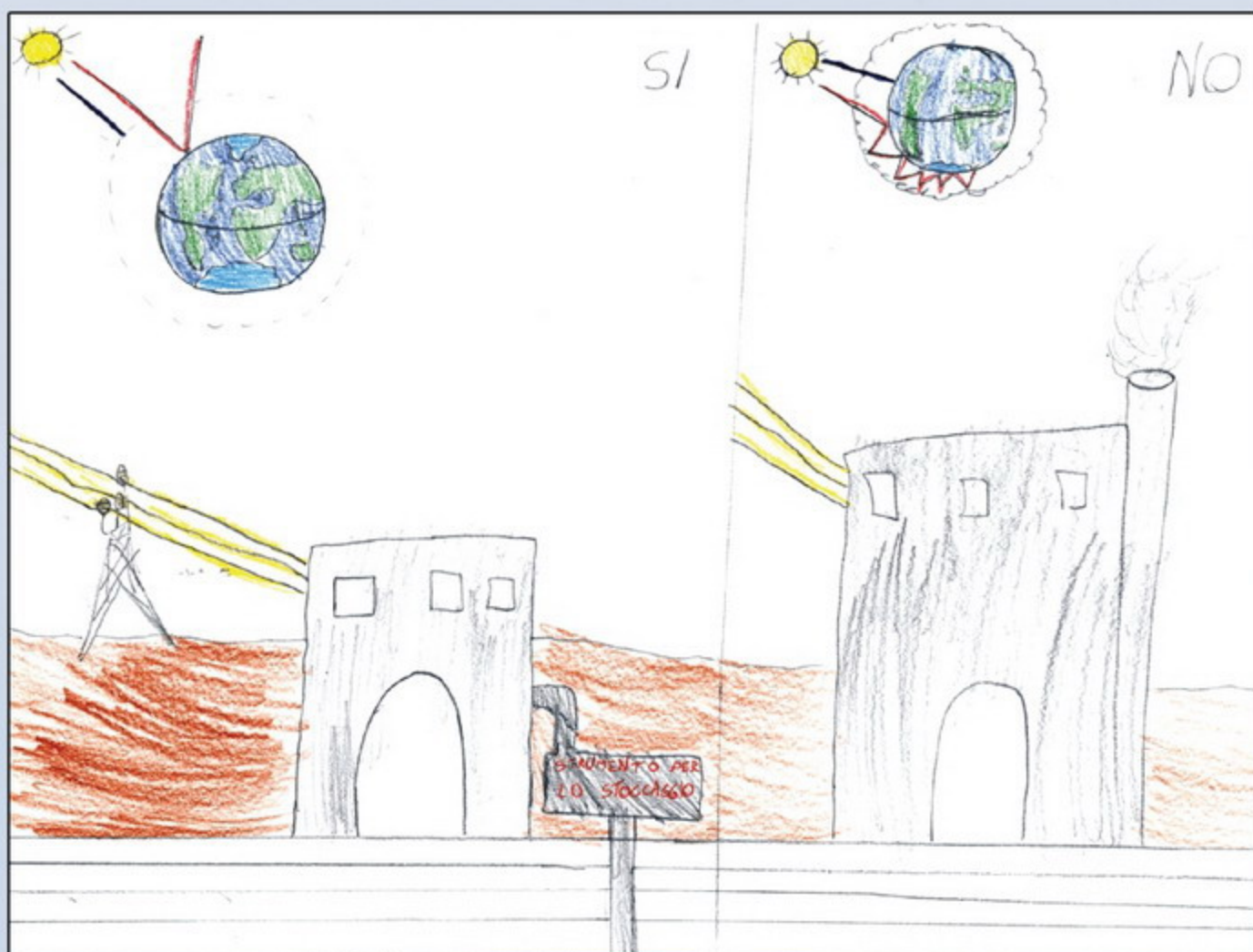
Цю брошуру було підготовлено за сприяння: Rob Arts, Stanley Beaubien, Tjirk Benedictus, Isabelle Czernichowski-Lauriol, Hubert Fabriol, Marie Gastine, Ozgur Gundogan, Gary Kirby, Salvatore Lombardi, Franz May, Jonathan Pearce, Sergio Persogila, Gijs Remmelts, Nick Riley, Mehran Sohrabi, Rowena Stead, Samuela Vercelli, Olga Vizika-Kavvadias.

Українську версію було перекладено Олексієм Савкевичем і відредаговано Миколою Шеставіним та Владиславом Осетровим.

Бачення майбутнього



**Більше немає труб, що випускають дим
Труба приносить CO₂ й опускає його під землю
Це добре для Землі**



© Sapienza URS

Массімо, 10 років, Рим, Італія

**Для наших дітей геологічне зберігання CO₂
має сенс**

Зміна клімату й необхідність у геологічному зберіганні CO₂

Малюнок 1
Пов'язані з людською діяльністю викиди CO₂ по всьому світі становлять 30 мільярдів тонн (Гт) на рік, що відповідає 8,1 Гт вуглецю: 6,5 Гт від спалювання викопного палива і 1,6 Гт від вирубування лісів і сільськогосподарської діяльності

Людство випускає в атмосферу надто багато CO₂

Сьогодні загальновідомим є той факт, що людська активність згубно впливає на вуглецевий цикл нашої планети. До промислової революції й раніше – приблизно 10 тис. років тому – наслідком цього цілком збалансованого циклу, що містив природний обмін вуглецю між геосферою, біосферою, океанами й атмосферою, була низька концентрація CO₂ в атмосфері (приблизно 280 мч (мільйонна частка), іншими словами 0,028%). Однак останні 250 років наше непомірне

спалювання викопного палива (вугілля, нафти, газу) для виробництва енергії, опалювання, задоволення потреб промисловості й транспорту безперервно збільшується, що спричинює зростання кількості CO₂, який викидається в атмосферу (**Мал. 1**). Приблизно половина цього виробленого людиною надлишку вуглекислого газу поглинається рослинністю й розчиняється в океанах, останнє спричинює окислення та пов'язаний з цим негативний вплив на морських рослин і тварин. Усе інше накопичується в атмосфері і стає однією з причин зміни клімату, оскільки CO₂ – це парниковий газ, який утримує частину сонячного тепла та сприяє нагріванню земної поверхні. Потрібні негайні радикальні заходи, аби зупинити зростання сьогоденної концентрації CO₂ в атмосфері, яка становить 387 мч (а це вже на +38% більше, ніж було на доіндустріальному етапі розвитку людства), щоб запобігти її зростанню до критичного рівня в 450 мч упродовж найближчих десятиліть. Експерти всього світу переконані в тому, що в разі перевищення цього рівня відвернути найтяжчі наслідки буде вже неможливо.

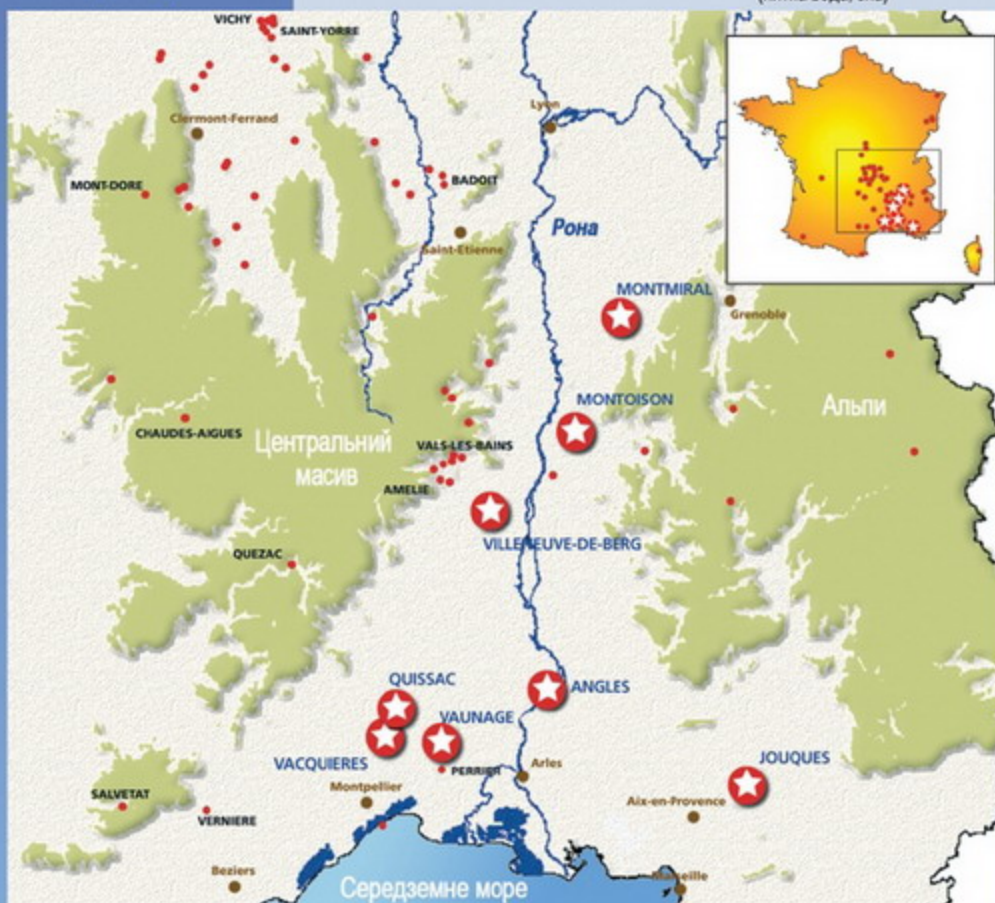
Нетто-оборот CO₂ между почвой и атмосферой в 1997 г. (в миллиардах тонн углерода в год).



© BRGM im@gé

Малюнок 2
Французькі вуглекисло-газові провінції

★ Природні поля CO₂
● Використовувані води з природним вуглекислим газом (питна вода, спа)



© BRGM im@gé

Повернення вуглецю назад у землю

З самого початку індустриальної ери (1750-х років) наш світ перебуває в дуже великій залежності від викопного палива, отже, немає нічого дивного в тому, що для перетворення нинішнього суспільства на суспільство, що базується на сприятливих для клімату енергетичних джерелах, потрібні і час, і гроші. Сьогодні нам необхідні короткострокові заходи, що допоможуть скоротити нашу залежність від викопного палива шляхом використання його без подальшого забруднення довкілля. Це перший крок, який дасть нам час, необхідний для розробки технологій та інфраструктури майбутнього, в якому використовуватимуться відновлювані джерела енергії. Одна з таких можливостей – створення замкнутого циклу в системі вироблення енергії, у якій вуглець, добутий з земних надр у вигляді газу, нафти й вугілля, повертається до надр, але вже як CO₂. Цікаво, що зберігання CO₂ в надрах землі не є винаходом людини. Це широко розповсюджений природний феномен: на нашій планеті існує чимало колекторів CO₂, утворених не лише тисячі, але й мільйони років тому. Одним з прикладів цього явища є серія з восьми природних колекторів CO₂, які було відкрито в процесі пошуку нафти в 1960-ті роки на південному сході Франції (**Мал. 2**). Ці та багато інших природних об'єктів, розташованих по всьому світі, показують, що геологічні структури здатні ефективно й безпечно зберігати CO₂ упродовж надзвичайно тривалих періодів часу.

Уловлювання й зберігання CO₂: перспективні шляхи пом'якшення наслідків

З усього спектру заходів, які необхідно терміново впроваджувати задля пом'якшення зміни клімату й зменшення окислення світового океану, уловлювання й зберігання вуглекислого газу (УЗВ*) може відіграти вирішальну роль, оскільки воно могло

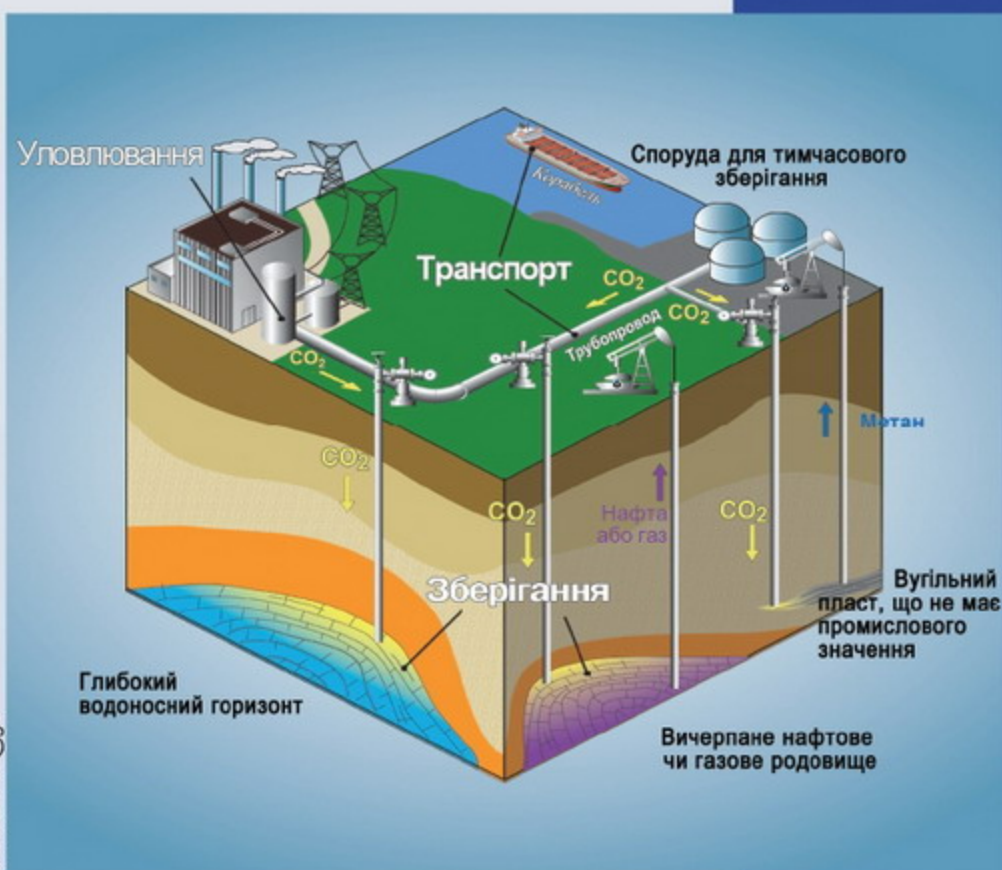
б скласти 33% від потрібного до 2050 року зменшення викидів CO₂. УЗВ включає уловлювання CO₂ на вугільних або газових електростанціях і на промислових об'єктах (сталеливарні, цементні, нафтопереробні заводи тощо), транспортування його через труби або на кораблях (танкерах) до ділянок зберігання і закачування його через свердловини* у придатні геологічні формації для тривалого зберігання (Мал. 3). Ураховуючи зростання населення планети й збільшення споживання енергії в країнах, що розвиваються, а також відсутність широкого використання альтернативних „чистих“ джерел енергії, спалювання викопного палива в найближчій перспективі неминуче. Таким чином, упроваджуючи УЗВ, людство може просуватися дружнім відносно довкілля шляхом, у той самий час вибудовуючи міст до всесвітньої економіки, що базуватиметься на стійкому виробленні енергії.

Всесвітній розвиток УЗВ процвітає

Основні науково-дослідні програми в галузі УЗВ проводяться в Європі, Сполучених Штатах Америки, Канаді, Австралії та Японії, починаючи з 1990-х років. Чималий обсяг знань і неоціненний досвід уже здобуто під час проведення перших у світі масштабних демонстраційних проектів, де вуглекислий газ закачується глибоко під землю впродовж кількох років: Слейпнер (Sleipner) у Норвегії (приблизно 1 Мт на рік, починаючи з 1996 р.) (Мал. 4), Вейбурн (Weyburn) у Канаді (приблизно 1,8 Мт на рік, починаючи з 2000 р.) і Айн Салах (In Salah) в Алжирі (приблизно 1 Мт на рік, починаючи з 2004 р.). Міжнародне співробітництво в галузі досліджень зберігання CO₂, підтримане МЕА-ППГ (IEA-GHG*) та ФЛБВ (CSLF*) у цих та інших сферах, є надзвичайно важливим для розширення нашого розуміння й розвитку всесвітнього наукового товариства, націленого на вирішення цієї проблеми. Чудовий приклад – спеціальний звіт МГЕЗК (IPCC*) з уловлювання й зберігання CO₂ (2005 р.), що описує напрацьовані знання й досвід, а також перешкоди, які необхідно подолати для широкомасштабного впровадження цієї технології. Уже проведено надійну технічну експертизу, і нині світ упевнено просувається до демонстраційної фази. Як доповнення до технологічного розвитку створюються законодавчі, нормативні, економічні й політичні рамки, а також проводиться оцінка громадської думки й підтримки. Метою Європи є запуск до 2015 року й можливість подальшої експлуатації 12-ти великих демонстраційних проектів для реалізації широкого комерційного впровадження їх до 2020 року. Для досягнення цієї мети в січні 2008 року Європейська Комісія розробила пакет законів, названий „Діяльність у галузі клімату й відновлюваних джерел енергії“, в якому пропонується Директива із геологічного зберігання CO₂ та інші заходи, що сприятимуть розвиткові й безпечному використанню УЗВ.

Ключові питання геологічного зберігання CO₂

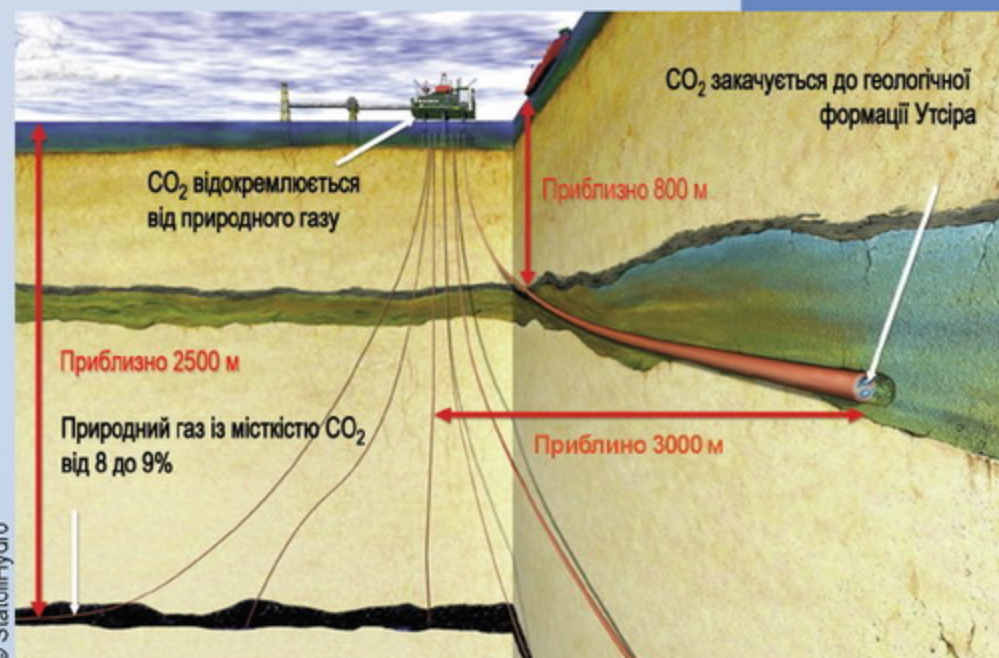
Європейську мережу експертів CO₂ГеоНет було створено за підтримки Європейської Комісії як групу дослідницьких організацій, здатних вивести Європу на передові позиції



© BRGM im@gé

великомасштабних міжнародних досліджень. Однією з цілей CO₂ГеоНет є поєднання суто наукової інформації з технічними аспектами геологічного зберігання CO₂. З метою сприяння діалогові з особливо суттєвих аспектів цієї життєво важливої технології дослідники CO₂ГеоНет підготували основні відповіді на деякі питання, що ставляться найчастіше. Далі ми пояснимо, як і в яких умовах можливе геологічне зберігання CO₂, і сформулюємо критерії для його безпечного й ефективного впровадження.

Малюнок 4.
Вертикальний розріз ділянки зберігання CO₂ Слейпнер (Sleipner), Норвегія.
У природному газі, добутому на глибині 2500 метрів, міститься кілька відсотків CO₂, який потрібно видаляти згідно з комерційними стандартами. Замість того, щоб випускати його в атмосферу, зібраний CO₂ закачують майже на 1000-метрову глибину в піщаний водоносний горизонт* Утсіра (Utsira)

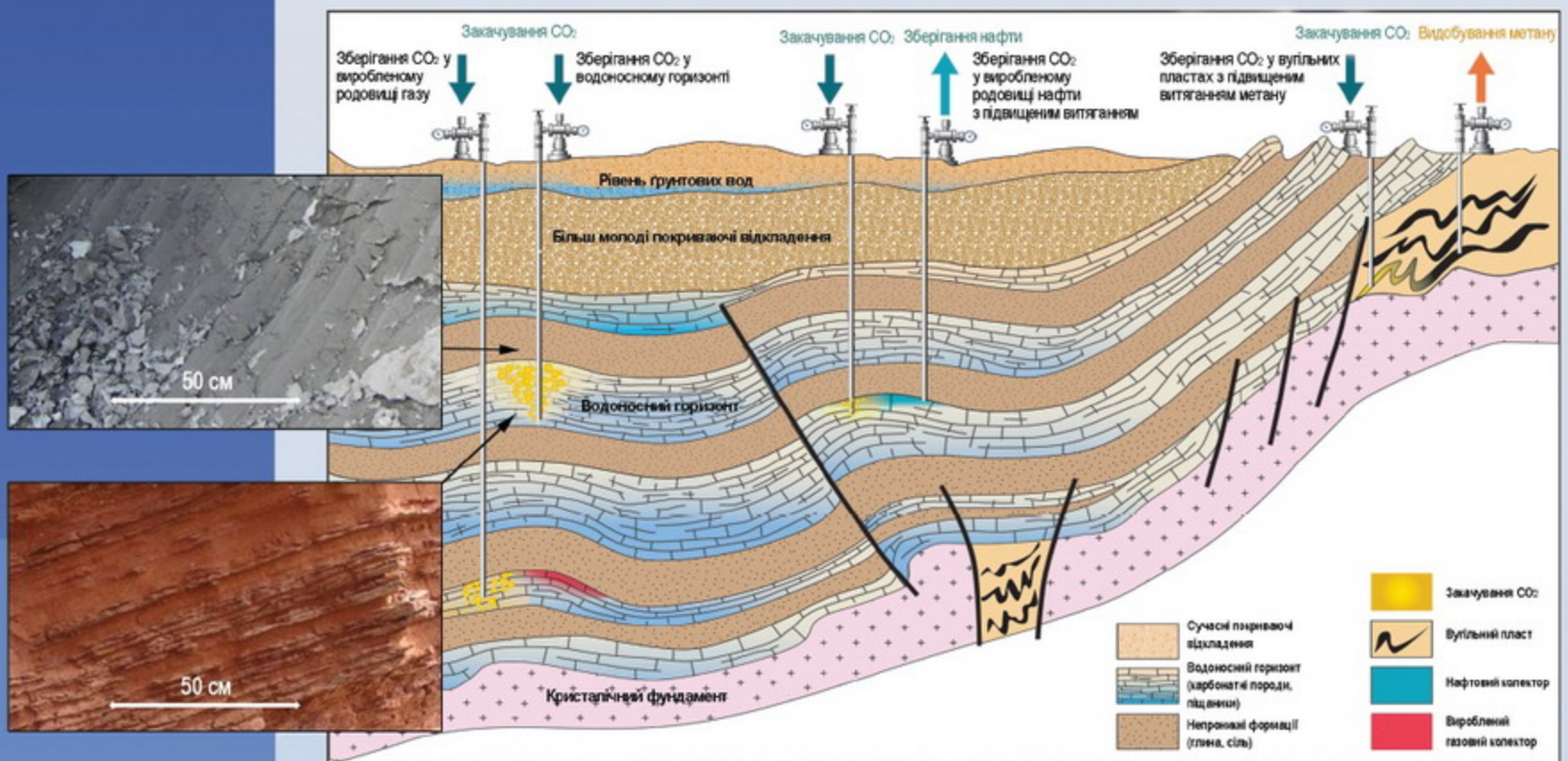


© Statoil-Hydro

Малюнок 3
На теплових електростанціях CO₂ уловлюється шляхом відокремлення його від інших газів. Після чого він стискається й транспортується трубопроводом або на кораблях до ділянки геологічного зберігання: у глибоких солоних водоносних горизонтах, вичерпаних нафтових і газових родовищах, вугільних пластах, що не мають промислового значення

Де й скільки CO₂ ми можемо зберігати під землею?

CO₂ не можна просто закачати в будь-яке місце під землею. Спочатку потрібно визначити придатні за місткістю гірські породи. Потенційні колектори для геологічного зберігання CO₂ існують по всьому світові, і їхніх ємностей цілком достатньо, щоб зробити значний внесок у справу пом'якшення техногенної зміни клімату.



Малюнок 1
CO₂ закачують до глибоких геологічних шарів пористих і проникних гірських порід (див. піщаник у нижній вставці), які перекриваються непроникувальними породами (див. глинисті породи на верхній вставці), що перешкоджають виходу вуглекислого газу на поверхню. Основні можливості зберігання надають:

1. Вичерпані нафтові/газові колектори з підвищеним витяганням нафти/газу там, де це можливо;
2. Водоносні горизонти*, що містять солону воду, непридатну для споживання людиною;
3. Глибокі вугільні пласти, що втратили промислове значення й місцями пов'язані з підвищеним витяганням метану.

Існують три основні можливості зберігання CO₂ (Мал. 1):

1. Вичерпані нафтові й газові родовища, добре відомі завдяки розвідці й розробці вуглеводнів, надають безпосередні можливості для зберігання CO₂.
2. Солоні водоносні горизонти – пропонують більший потенціал для зберігання, але зазвичай не так добре вивчені.
3. Вугільні пласти, що втратили промислове значення, - варіант майбутнього, коли буде вирішено проблему закачування величезних обсягів CO₂ у низькопроникувальне вугілля.

Колектори

Після того, як CO₂ розміщується під землею в придатній гірській породі-колекторі, він накопичується в порах між зернинами й у тріщинах, таким чином витісняючи й заміщуючи будь-які наявні там флюїди: такі як газ, вода чи нафта. Тому придатні для зберігання CO₂ гірські породи повинні мати високу пористість і проникність. Подібні формації гірських порід, що є результатом осадконакопичення в геологічному минулому, в основному розташовані в так званих «осадочних басейнах». У місцях свого залягання ці проникні формації чергуються з непроникувальними породами, які можуть виконувати функцію водо- й газотривких шарів. Осадочні басейни часто містять колектори вуглеводнів і родовища природного вуглекислого газу, що доводить їхню спроможність утримувати флюїди впродовж довгих періодів часу. Природні пастки нафти, газу й навіть чистого

CO₂ утримують у собі ці флюїди впродовж мільйонів років. На малюнках, що ілюструють можливі варіанти зберігання CO₂, підземна будова часто зображується надто спрощеною, однорідною, що за своєю структурою нагадує листковий пиріг. У дійсності вона складається з нерівномірно розподілених і місцями розірваних тріщинами формацій гірських порід, комплексу, утвореного колекторами й породами-покришками, неоднорідних структур. Поглиблені знання об'єкта досліджень і геологічний науковий досвід необхідні для оцінки придатності підземних структур, які пропонуються для тривалого зберігання вуглекислого газу.

Потенційний колектор для зберігання CO₂ має відповідати багатьом критеріям, основними з яких є:

- значна пористість, проникність гірських порід і ємність сховища;
- наявність перекриваючого непроникувального шару гірської породи – так званої «породи-покришки» (наприклад глина, аргіліт, мергель, кам'яна сіль), яка перешкоджає виходу CO₂ з надр;
- присутність «уловлювальних структур» - іншими словами, наявність функцій, притаманних куполоподібній породі-покришці, яка здатна контролювати ступінь міграції CO₂ до формацій зберігання;
- залягання глибше, ніж 800 метрів, де тиск і температура достатньо високі, щоб зберігати CO₂ в згущеному рідкому стані і тим самим максимально збільшувати кількість, що зберігається;
- відсутність питної води: CO₂ не закачуватиметься у воду, придатну для споживання й використання людиною.

- присутність «уловлювальних структур» - іншими словами, наявність функцій, притаманних куполоподібній породі-покришці, яка здатна контролювати ступінь міграції CO₂ до формацій зберігання;
- залягання глибше, ніж 800 метрів, де тиск і температури достатньо високі, щоб зберігати CO₂ в згущеному рідкому стані і тим самим максимально збільшувати кількість, що зберігається;
- відсутність питної води: CO₂ не закачуватиметься у воду, придатну для споживання й використання людиною.

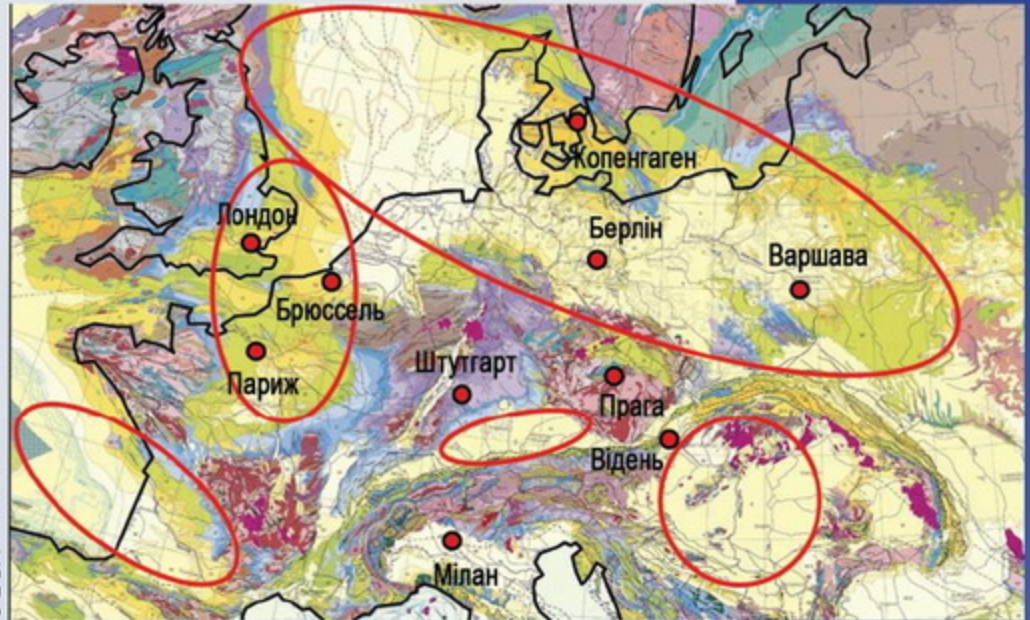
Де знайти ділянки зберігання в Європі

Осадочні басейни широко розповсюджені по всій Європі, наприклад, на шельфі Північного моря або на суші навколо гірського пасма Альп (Мал. 2). Багато з формацій європейських осадочних басейнів відповідають критеріям, необхідним для геологічного зберігання, і нині картографуються й характеризуються дослідниками. Інші зони в Європі утворені з давньої твердої кори, з якої також складається більша частина Скандинавії і яка не містить гірських порід, придатних для геологічного зберігання CO₂. Одним з прикладів перспективного для зберігання району є Південний басейн Пермського віку, що простягається від Англії до Польщі (позначений на Малюнку 2 найбільшим еліпсом). На осадки впливали пороодоутворючі процеси, які залишили певну кількість пористого простору, заповненого солоною водою, нафтою чи природним газом. Глинисті прошарки, що розташовувалися між пористими піщаниками, були ущільнені до низькопроникних шарів, що перешкоджають просуванню флюїдів. Більшість структур піщаника розташовані на глибинах між 1 і 4 км, де тиск достатньо великий для зберігання CO₂ в густій фазі. Вміст солей у підземних водах зростає в цьому інтервалі глибин від 100 г/л до 400 г/л, тобто це значно солоніше, ніж морська вода (35 г/л). Рухи в басейні спричинили пластичні деформації кам'яної солі, створюючи сотні куполоподібних структур, що згодом стали пастками для природного газу. Це ті самі пастки, які вивчаються як можливі зони зберігання CO₂ і можуть бути використані в пілотних проектах.

Ємність сховища

Знання про ємність сховища вуглекислого газу потрібні політикам, законодавчим органам і обслуговуючим компаніям. Оцінювання ємності сховища зазвичай досить приблизне й ґрунтується на просторових розмірах потенційно придатних формацій порід. Ємність можна розрахувати в різних масштабах: від національного масштабу для приблизного оцінювання до масштабу басейна й колектора, тобто для більш детальних розрахунків, у яких ураховуються нерівномірність і складність будови реальної геологічної структури.

Об'ємна ємність. Опубліковані дані про національні ємності сховищ ґрунтуються, головним чином, на розрахунках об'єму пір у породах. Теоретично ємність сховища для цієї формації може бути розрахована шляхом помноження її площі на потужність, її середню пористість і середню густину CO₂ в умовах глибини залягання колектора. Проте, оскільки об'єм пір уже заповнений водою, то лише невелику частину можна використати для зберігання – як прийнято вважати, приблизно 1-3%. Цей коефіцієнт ємності зберігання пізніше застосовується під час оцінки об'ємної ємності.



© BGR

Реалістична ємність. Більш реалістичну оцінку ємності можна зробити в окремих місцях зберігання шляхом детальних досліджень. Потужність структури не постійна, і властивості резервуару можуть змінюватися й на невеликих відрізках. Знання про розмір, форму й геологічні властивості структур дозволяють зменшити неточності при вирахуванні об'єму. Комп'ютерне моделювання, що спирається на ці дані, може використовуватися для прогнозування закачування CO₂ і його руху всередині колектора з метою оцінки реалістичної ємності сховища.

Реалізована ємність. Ємність – це не лише питання фізики гірської породи. Соціально-економічні фактори також впливають на те, чи буде використовуватися придатне місце зберігання. Наприклад, переміщення CO₂ від джерела до місця зберігання регулюватиметься витратами на транспортування. Ємність залежатиме й від чистоти CO₂, оскільки присутність інших газів зменшить у резервуарі обсяг, доступний для CO₂. І нарешті, політичні погляди й визнання громадськості можуть стати вирішальними в питанні, чи буде насправді експлуатуватися наявна ємність колектора.

Підсумовуючи сказане, зазначимо: ми знаємо, що ємність зберігання CO₂ в Європі – велика, навіть ураховуючи невпевненість, пов'язану зі складністю будови колектора і його неоднорідною структурою, а також із соціально-економічними факторами. Європейський проект ГЕСТКО (GESTCO*) оцінив ємність зберігання CO₂ в родовищах вуглеводнів у Північному морі і навколо нього в обсязі 37 Гт, що могло б дозволити великим установкам у цьому регіоні закачувати туди CO₂ впродовж кількох десятиріч. Оновлення даних і подальше картографування ємності сховищ у Європі є предметом поточних досліджень в окремих країнах-членах Євросоюзу і в межах проекту ЄС Геоемність (EU Geosaracity*) для всієї Європи.

*Малюнок 2
Геологічна карта
Європи, що
демонструє
розташування
основних осадочних
басейнів (червоні
еліпси), у яких
можуть бути
знайдені придатні
колектори для
зберігання CO₂ (на
базі геологічної
карти Європи з
масштабом
1:5 000 000)*



Як можна закачувати й транспортувати великі обсяги CO₂?

Після уловлювання на промислових об'єктах CO₂ стискають, транспортують і закачують до породи-колектора крізь одну чи кілька свердловин. Увесь ланцюжок має бути оптимізований для можливого зберігання кількох мільйонів тонн CO₂ на рік.

Стискування

CO₂ стискається до стану густої рідини, яка займає значно менше місця, ніж газ. Після відокремлення CO₂ від газу на електростанціях чи промислових об'єктах отриманий високо концентрований потік CO₂ піддають дегідратації (зневоднюванню) й стискуванню, сприяючи більш ефективному транспортуванню й зберіганню (**Мал. 1**). Щоб уникнути корозії обладнання й пошкоджень інфраструктури, необхідна дегідратація, що проводиться під великим тиском з утворенням гідратів (кристалів твердого льоду, які можуть закупорити обладнання й труби). Компресія (стискування) робиться одночасно з дегідратацією, це багатоступінчастий процес: цикли стискування, охолодження й відокремлення води повторюються. Тиск, температура й вміст води – усе має бути пристосовано до виду транспортування й вимог до тиску в місці зберігання. Ключовими факторами для розробки компресійного обладнання є швидкість потоку, тиск усмоктування й нагнітання, теплоємність газу й продуктивність компресора. Технологія для компресії вже розроблена й широко застосовується в багатьох промислових сферах.

CO₂ розташовані надто далеко від придатного колектора. Судна, що використовуються для транспортування зрідженого вуглеводневого газу (ЗВГ), підходять і для транспортування CO₂. Зокрема, напівохолоджуючі системи стискають і охолоджують, і таким чином CO₂ може транспортуватися в рідкому стані. Місткість найновіших кораблів ЗВГ становить більше 200 000 м³, вони здатні перевозити 230 000 тонн вуглекислого газу. Однак морський транспорт не може забезпечити безперервної плавної логістики, і в порту необхідно мати обладнання для проміжного зберігання й перевантаження CO₂.

Транспортування трубопроводом на сьогоднішній день використовують для великих обсягів CO₂, переважно нафтові компанії, що застосовують методику нафтовіддачі* (у світі існує майже 3000 км трубопроводу для CO₂, в основному в Сполучених Штатах). Це більш економічно, ніж транспортування суднами, і дає перевагу безперервного потоку, що рухається від пристрою уловлювання до місця зберігання. Усі існуючі трубопроводи для CO₂ експлуатуються в надкритичних для CO₂ умовах великого тиску, у яких він поводить як газ, але має густину рідини. Три важливі фактори визначають роботу трубопроводу: його діаметр, тиск по всій довжині і, звичайно, товщина його стінок.

Транспортування

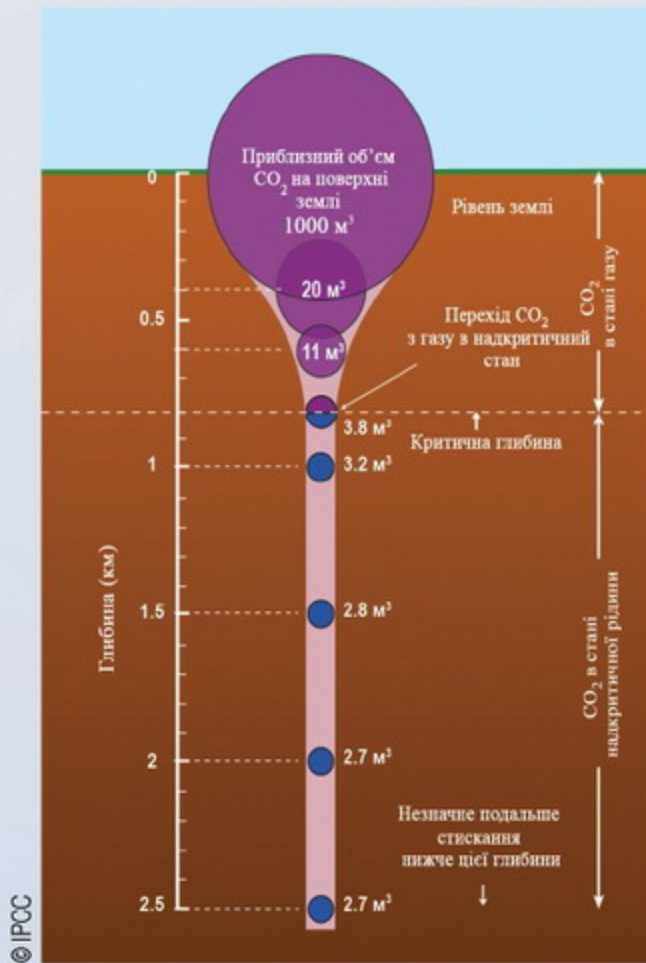
CO₂ можна транспортувати морським судном або трубопроводом. Транспортування CO₂ кораблями нині здійснюється лише в дуже невеликих обсягах (10 000-15 000 м³) для промислових цілей, але в майбутньому це може стати привабливою можливістю для проектів по УЗВ у тих випадках, коли узбережні джерела

Закачування

Коли CO₂ прибуває до ділянки зберігання, він під тиском закачується до колектора (**Мал. 2**). Тиск закачування має бути значно вищий, ніж тиск у колекторі, щоб витіснити з точки закачування CO₂ наявні в колекторі флюїди. Кількість закачуючих свердловин залежить від кількості призначеного для зберігання CO₂, від швидкості закачування (обсяг CO₂, закачаного за годину), проникності й потужності колектора, максимально безпечного тиску закачування й типу свердловини. Оскільки основною метою є тривале утримання CO₂, ми маємо бути впевнені в гідравлічній цілісності геологічної структури. Великі швидкості закачувань можуть спричинити зростання тиску в точці закачування, особливо в низькопроникних структурах. Як правило, тиск закачування не повинен перевищувати тиску розриву гірської породи, оскільки це може спричинити пошкодження колектора або перекриваючого шару. Гідромеханічний аналіз і моделі використовуються для визначення максимально допустимого тиску, що дозволить уникнути тріщин у формації. Хімічні процеси можуть впливати на швидкість, з якою CO₂ можна закачувати до формації. Залежно від типу породи-колектора, складу флюїдів і умов у колекторі (таких як температура, тиск, об'єм, концентрація тощо) біля свердловин можуть розпочатися процеси розчинення й

*Малюнок 1
Етапи геологічного зберігання CO₂.
Щоб переправити CO₂ від місця його викиду до місця його безпечного й тривалого зберігання, необхідно пройти весь ланцюжок операцій, зокрема уловлювання, стискування, транспортування й закачування*





Малюнок 2

Після закачування під землю CO₂ набуває густого надкритичного* стану приблизно на глибині 0.8 км. Його обсяг значно зменшується від 1000 м³ на поверхні до 2.7 м³ на глибині 2 км. Це одна з причин, через яку геологічне зберігання великих обсягів CO₂ є таким привабливим на вигляд

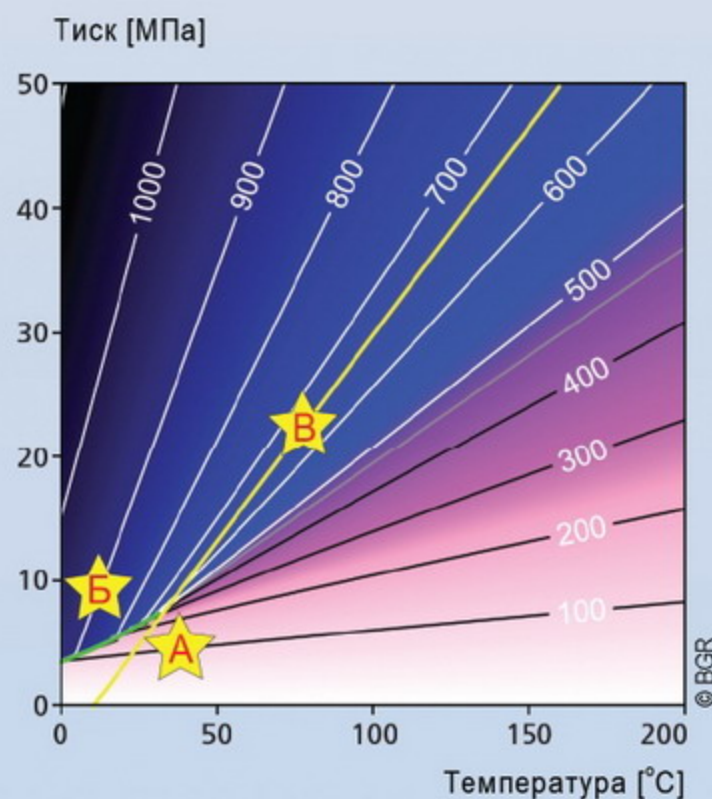
осадження мінералів. Це може спричинити збільшення чи зменшення швидкостей закачування. Після закачування частина CO₂ розчиняється в солоній воді колектора, і рН* потроху знижується, підтримуючись розчиненням карбонатних мінералів, наявних у вмещаючій породі. Карбонати першими з мінералів починають розчинятися, оскільки швидкість їх реакції дуже висока і розчинення відбувається одразу ж після початку закачування. Процес розчинення може збільшити пористість гірських порід і, отже, закачуваність* (легкість закачування). Однак після розчинення карбонатні мінерали можуть осаджуватися повторно й цементувати породу навколо свердловини. Високі швидкості потоку можуть бути використані для обмеження зменшення проникності поблизу свердловини, тим самим витісняючи зони геохімічної рівноваги осадження далі. Висушування – це інший феномен, спричинений закачуванням. Після окислювальної фази залишкова вода навколо свердловини, через яку робилося закачування, розчиняється в закачаному сухому газі, який, у свою чергу, концентрує хімічні частки в розчині*. Мінерали (такі як солі) можуть осаджуватися, коли розчин достатньо сконцентрований, таким чином зменшуючи проникність навколо свердловини. Ці результати закачуваності залежать від складних взаємодіючих процесів, які тривають навколо свердловини, а також від часу й відстані до свердловини.

Для оцінювання таких ефектів використовується цифрове моделювання. Для запобігання процесам, що можуть обмежити закачування бажаної кількості CO₂, необхідно ретельно встановлювати швидкості закачуваного потоку.

Склад потоку CO₂

Склад і чистота потоку CO₂, які є результатом процесу уловлювання, роблять значний вплив на подальші аспекти проекту зберігання CO₂. Присутність кількох відсотків інших речовин, таких як вода, сірководень (H₂S), окиси сірки й азоту (SO_x, NO_x), азот (N₂) і кисень (O₂) впливатиме на фізичні й хімічні властивості CO₂, і позначиться на його поведінці й впливах. Тому присутність подібних речовин має бути ретельно врахована під час проектування етапів компресії, транспортування й закачування, а також під час регулювання експлуатаційних умов і обладнання.

На завершення можна сказати, що транспортування й закачування великих обсягів CO₂ уже можливі. Проте, якщо геологічне зберігання CO₂ широко застосовуватиметься, всі перераховані стадії мають бути сплановані для кожного окремого проекту зберігання. Ключовими параметрами є термодинамічні властивості потоку CO₂ (Мал. 3), швидкість потоку й умови в колекторі й над ним.



Малюнок 3
Густина чистого CO₂ (у кг на м³) як функція температури й тиску. Жовта лінія відповідає типовому градієнтові тиску й температури в осадочному басейні. На глибині більше 800 м (~8 МПа) умови резервуару сприяють високим густинам (блакитний колір). Зелена крива – це межа між газоподібною й рідкою фазами CO₂. Типові умови тиску й температури для уловлювання, транспортування й зберігання позначено відповідно літерами А, Б і В

Що відбувається з CO₂ в колекторі зберігання?

Як тільки CO₂ закачали до колектора, він починає активно заповнювати простір у порах під породою-покришкою. З часом частина CO₂ розчиниться і зрештою перетвориться на мінерали. Ці процеси відбуваються в різних масштабах часу й сприяють безперервному утримуванню.

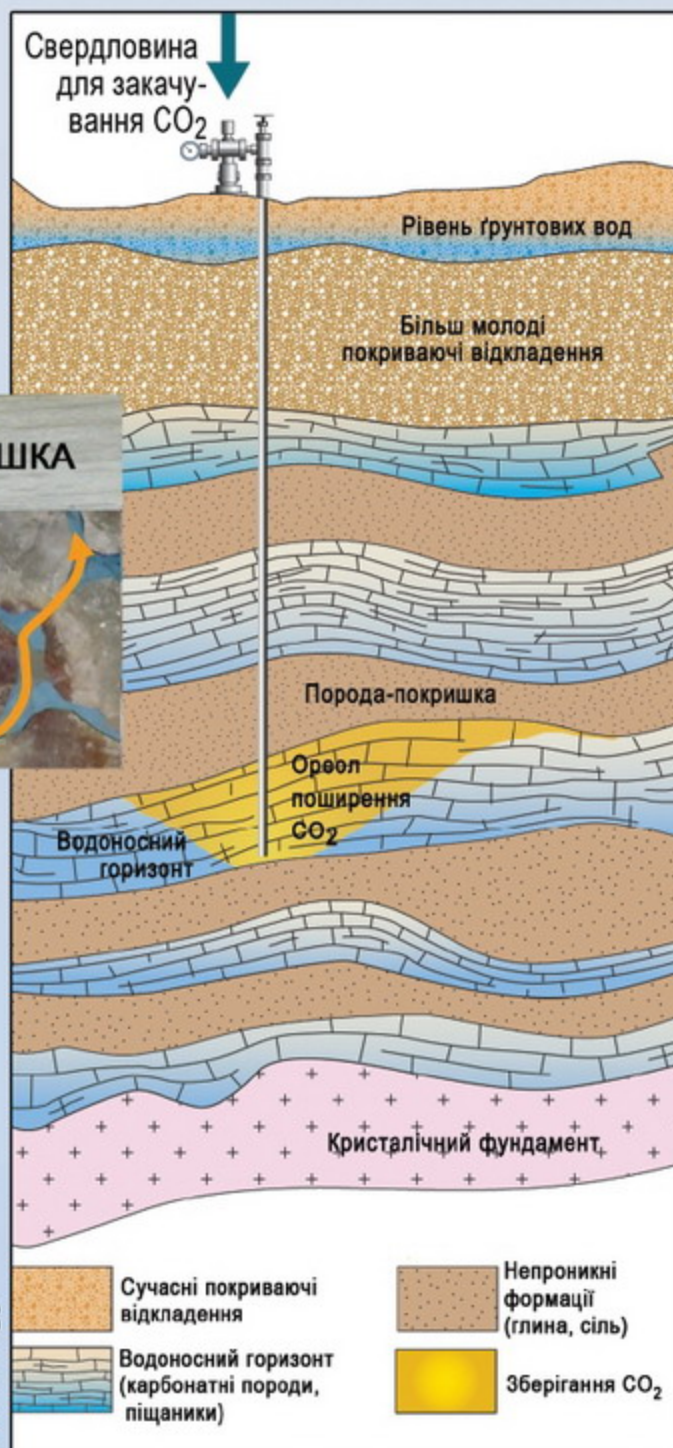
Механізми утримування

Після закачування до колектора CO₂ заповнює простір у порах гірських порід, який у більшості випадків уже заповнений соляними розчинами, тобто соляною водою. Коли CO₂ закачано, починають діяти подальші механізми. Перший вважається найголовнішим і перешкоджає виходу CO₂ на поверхню. Три інші мають тенденцію з часом збільшувати ефективність і безпеку зберігання.

Вигляд під мікроскопом.



Мал. 1
Закачаний CO₂, який є легшим за воду, як правило, піднімається й зупиняється перекриваючими непроникими породами.



© BRGM im@gé

1. Накопичення під породою-покришкою (структурне утримування)

Оскільки густий CO₂ легший за воду, він починає підніматися вгору. Цей рух припиняється, коли CO₂ стикається з шаром непроникої породи, так званою «породою-покришкою». Через те, що ця порода-покришка складається в основному з глини й солі, вона діє як пастка, яка перешкоджає підняттю CO₂ будь-куди далі, що призводить до його накопичення безпосередньо під нею. Малюнок 1 ілюструє висхідний рух CO₂ крізь простір у порах гірської породи (блакитний колір) до досягнення ним породи-покришки.

2. Зв'язування в дрібних порах

Остаточне зв'язування відбувається, коли простір пор у породі-колекторі такий вузький, що CO₂ не може більше рухатися вгору, незважаючи на різницю в густині з оточуючою водою. Цей процес проявляється в основному під час міграції CO₂ і зазвичай може зв'язати кілька відсотків закачаного CO₂, залежно від властивостей гірської породи-колектора.

3. Розчинення (утримування шляхом розчинення)

Невелика частина закачаного CO₂ розчиняється чи переноситься до розчину через солону воду, вже наявну в просторі пор колектора. Результатом розчинення є те, що вода з розчиненим у ній CO₂ важча, ніж вода без нього, і це спричинює опускання води з розчиненим CO₂ на дно резервуара. Швидкість розчинення залежить від інтенсивності контакту CO₂ з розчином. Кількість CO₂, яка може розчинитися, обмежена максимальною концентрацією. Однак рух закачаного CO₂ вгору і рух води з розчиненим у ній CO₂ донизу спричинюють постійне оновлення контакту між розчином і CO₂, що збільшує кількість CO₂, яка може бути розчинена. Ці процеси відносно повільні, оскільки проходять у вузьких порах. Приблизні оцінки в проєкті Слейпнер показують, що лише близько 15% закачаного CO₂ розчинилося впродовж 10 років після закачування.

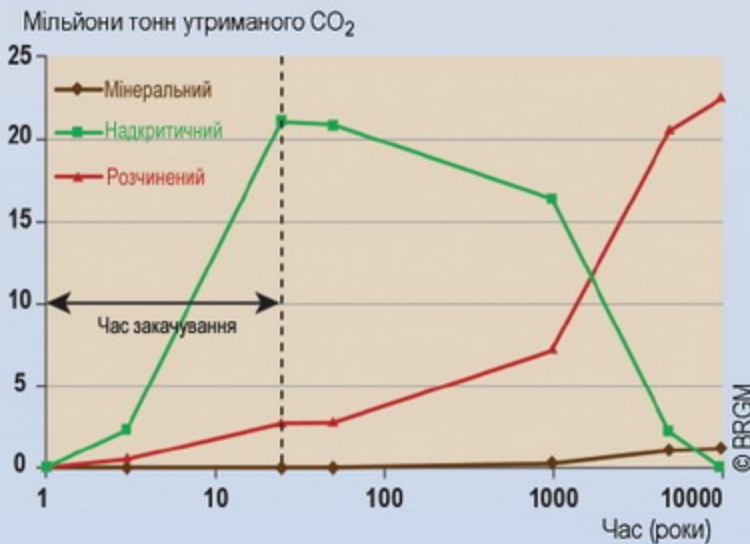
4. Мінералізація (мінеральне утримування)

CO₂, особливо в комбінації з соляним розчином у колекторі, може вступати в реакції з мінералами, що складають гірську породу. Певні мінерали можуть розчинятися, у той час як інші можуть осаджуватися, залежно від pH і мінералів, з яких складається порода (Мал. 2). За деякими оцінками лише відносно невелика частина CO₂ буде зв'язана шляхом мінералізації через дуже тривалий проміжок часу. Через 10 000 років тільки 5% закачаного CO₂ мало б мінералізуватися, тоді як 95% було б розчинено без залишеного у вигляді окремої густої фази CO₂.



Малюнок 2
Щільний CO₂ піднімається вгору (світло-блакитні бульбашки), розчиняється й вступає в реакцію з зернами породи, що спричинює осадження карбонатних мінералів на поверхню зерен (білі).

Відносне значення цих механізмів утримання залежить від характеристик кожного окремого об'єкту дослідження. Наприклад, у куполоподібних колекторах CO₂ має залишатися в основному в густій фазі навіть через дуже тривалий час, тоді як у плоскому колекторі, яким є Слейпнер, більша частина закачаного CO₂ буде розчинена чи мінералізована. Змінювання пропорцій CO₂ в різних механізмах утримання на прикладі Слейпнера показано на **Малюнку 3**.



Малюнок 3
Розвиток CO₂ в його різних формах в колекторі Слейпнер згідно з моделюванням потоку. CO₂ утримується в надкритичному стані механізмами 1 і 2, у розчиненому стані – механізмом 3, і в мінеральній формі механізмом 4.

Звідки ми все це знаємо?

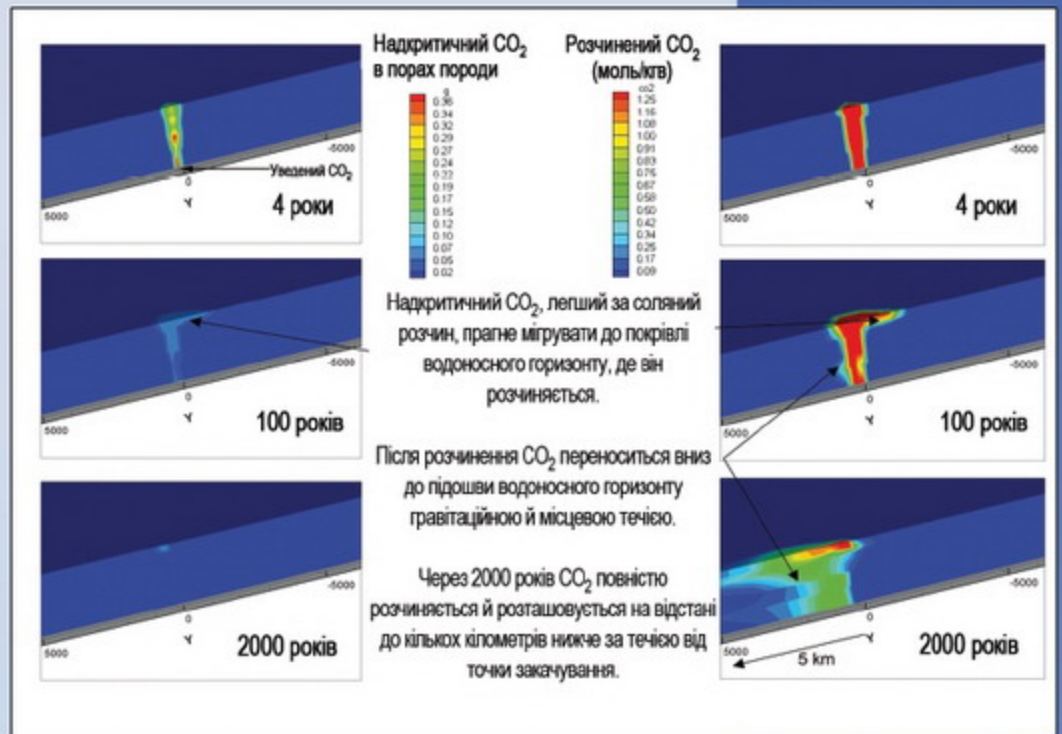
Знання про ці процеси здобуваються з чотирьох основних джерел інформації:

- **Лабораторні вимірювання:** невеликі експерименти в галузі мінералізації, потоку й розчинення можна проводити на зразках гірських порід, що дозволяє

зрозуміти короткотривалі процеси невеликого масштабу.

- **Цифрове моделювання:** обчислювальні програми були розроблені для того, щоб використовувати їх для передбачення поведінки CO₂ впродовж більш тривалого проміжку часу (**Мал. 4**). Лабораторні експерименти використовуються для калібрування цифрового моделювання.
- **Вивчення природних колекторів CO₂,** у яких CO₂ (в основному вулканічного походження) утримувався під землею впродовж тривалих періодів часу, часто мільйонів років. Подібні умови називають „природним аналогом“*. Ці об'єкти забезпечують нас інформацією про поведінку газу й дуже тривалі наслідки присутності CO₂ під землею.
- **Спостереження за існуючими ділянками зберігання CO₂ в демонстраційних проектах,** таких як Слейпнер (у відкритому морі Норвегії), Вейбурн (Канада), Айн Салах (Алжир) и K12-Б (у відкритому морі в Нідерландах). Результати короткострокового моделювання можна порівняти зі справжніми польовими даними, що допоможе вдосконалити моделі.

Малюнок 4
Тривимірне моделювання руху CO₂ у водоносному горизонті після закачування 150 000 тонн через 4 роки у водоносному горизонті структури Дотгер у Франції. Тут зображено CO₂ в надкритичному стані (ліворуч) і CO₂, розчинений у солоній воді (праворуч) через 4, 100 і 2000 років після початку закачування. Модель спирається на дані польових досліджень та експерименти.



Лише завдяки постійній прив'язці й перевірці цих чотирьох джерел інформації можна зібрати надійні знання про всі процеси, що відбуваються під нашими ногами – на глибині в 1000 метрів.

На завершення зазначимо, що безпека ділянок зберігання CO₂ має тенденцію з часом збільшуватися. Найважливіше завдання – знайти колектор з придатною породою-покришкою зверху, яка утримуватиме CO₂ (структурне утримання). Усі процеси, що стосуються розчинення, мінералізації й залишкового уловлювання, спрямовані на запобігання виходу CO₂ на поверхню.

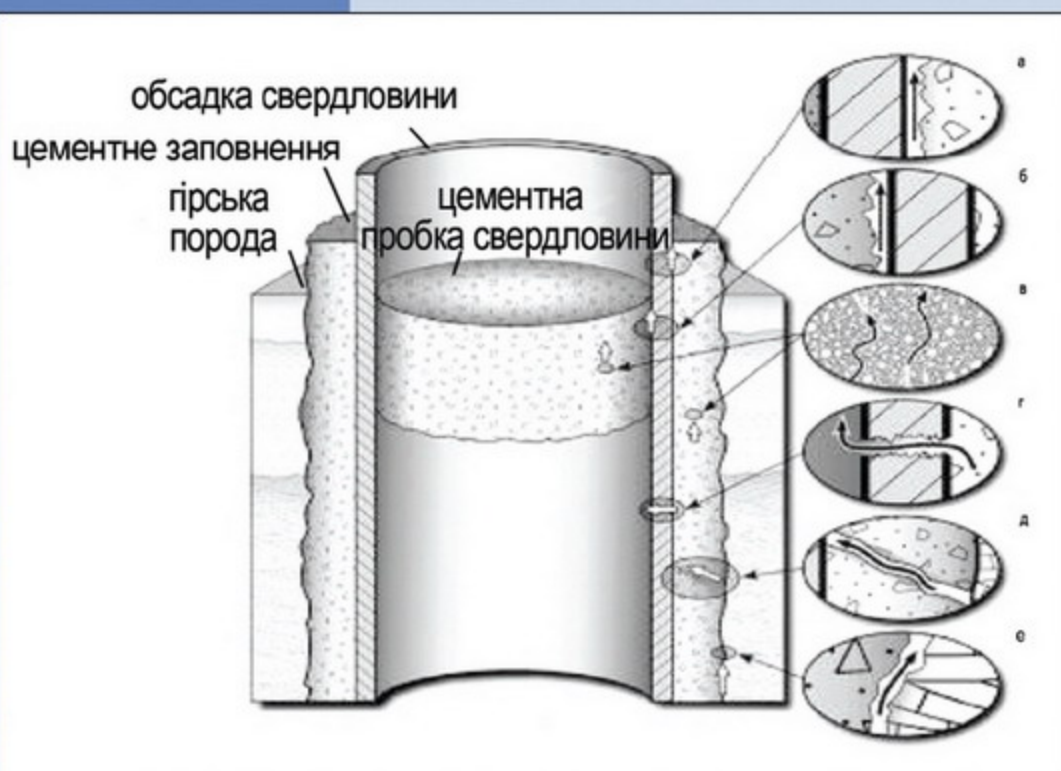
Чи може CO₂ витікати з резервуара, і якщо так, то якими можуть бути наслідки?

На підставі досліджень природних систем припускається, що на ретельно вибраних ділянках зберігання не відбудеться якогось значного витоку. Природні резервуари, що містять газ, допомагають нам зрозуміти умови, за яких газ утримується або витікає. Крім того, місця витоку газу допомагають нам зрозуміти, до яких наслідків можуть призвести можливі витоки CO₂.

Шляхи витоку

В основному потенційні шляхи витоку або створені людиною (наприклад, глибокі свердловини), або є природними (наприклад, системи тріщин і розломів). Як у діючих, так і покинутих свердловинах шляхи витоків можуть виникати тому, що, по-перше, вони утворюють пряме з'єднання між поверхнею й колектором, і по-друге, вони складаються з природних матеріалів, які можуть зазнавати корозії через тривалі періоди часу (Мал. 1). Додаткова складність полягає в тому, що різні свердловини створені з використанням різних технологій, і тому більш нові свердловини в основному безпечніші за старі. У будь-якому випадку припускається, що небезпека витоку через свердловини низька, оскільки й більш нові, й старі свердловини можна дуже ефективно контролювати, використовуючи чутливі геохімічні й геофізичні методи, а також тому, що в нафтовій промисловості для будь-яких виправних заходів уже існує необхідна технологія. З витоками через природні тріщини й розломи, які можуть існувати в породі-покришці чи у перекриваючих породах*, уже складніше, оскільки ми маємо справу з непостійними, площинними властивостями зі змінною проникністю. Серйозне наукове й технічне розуміння як систем з витоком, так і без витоку, дозволить розробляти проекти зберігання CO₂ з такими ж характеристиками, що й у природних резервуарів, які утримують CO₂ й метан від тисяч до мільйонів років.

Малюнок 1
Можливі шляхи витоку CO₂ у свердловині. Виток через змінений матеріал (в, г, д) або вздовж меж розділу (а, б, е).

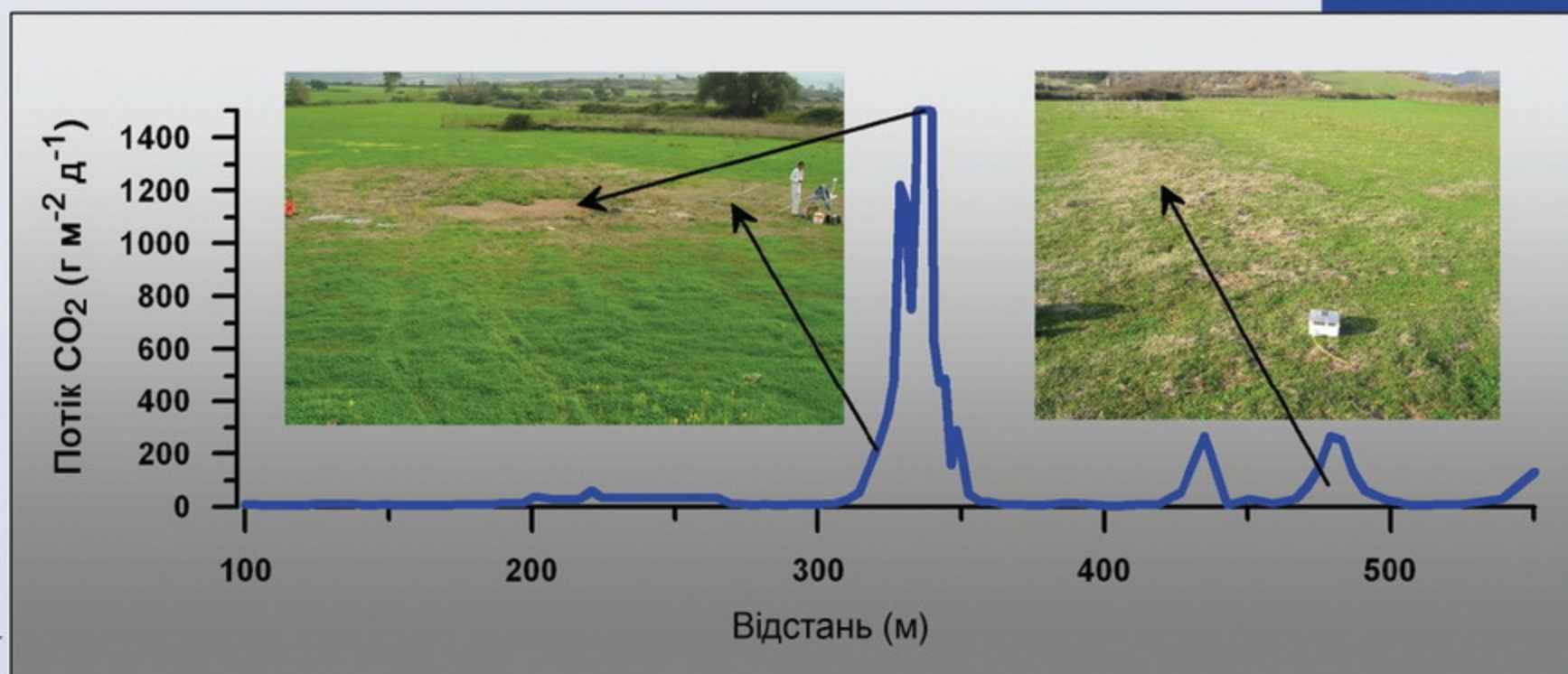


Природні аналоги: здобуті уроки

Природні системи (так звані „аналоги”) – це безцінні джерела інформації для покращення розуміння руху газу глибоко під землею й природного газообміну між землею й атмосферою. Основні висновки, одержані в ході досліджень численних природних газових резервуарів з витоками чи без витоків, такі:

- за придатних геологічних умов природний газ може утримуватися від тисяч до мільйонів років;
- ізольовані газові резервуари й кишені наявні навіть у найменш сприятливих геологічних умовах (вулканічні райони);
- переміщення хоч скільки значної частини газу вимагає адвекції (тобто керованого тиском потоку), оскільки дифузія – це дуже повільний процес;
- для появи адвекції умови рідин у колекторі мають бути близькими до літостатичного тиску*, щоб розломи й тріщини залишити відкритими чи механічно створити нові шляхи;
- території, на яких природний газ виходить на поверхню, розташовані майже виключно в сильно вкритих тріщинами вулканічних чи сейсмічно активних районах, з газовими виходами, розташованими вздовж активних чи недавно активізованих розломів;
- значний витік газу трапляється лише зрідка і має тенденцію відбуватися в сильно вкритих тріщинами вулканічних і геотермальних зонах, де CO₂ безперервно виробляється в результаті природних процесів;
- газові аномалії на поверхні зазвичай з'являються як локалізовані плями, які мають обмежений просторовий вплив на розташоване біля поверхні навколишнє середовище.

Таким чином, для того, щоб стався витік, необхідне поєднання низки конкретних умов. Отже, дуже мало ймовірно, що на правильно обраній і ретельно спроектованій геологічній ділянці для геологічного зберігання CO₂ станеться витік. Незважаючи на те, що можливість витоку мала, вивчення пов'язаних з нею процесів і їхніх можливих наслідків має бути повним з метою правильного вибору, проектування й експлуатації максимально безпечної геологічної ділянки для геологічного зберігання CO₂.



Вплив на людей

Ми повсякчас вдихаємо CO₂. Він небезпечний для здоров'я людини лише в дуже великих концентраціях зі значеннями понад 5 000 мч (5%), CO₂ спричинює головний біль, запаморочення, нудоту. Значення вище цього рівня можуть бути причиною смерті, якщо вплив буде надто довгим, особливо через асфіксію, коли концентрація кисню в повітрі падає нижче 16%-ного рівня, необхідного для підтримання людського життя. Однак, якщо CO₂ витікає на відкритих чи похилих ділянках, він швидко розсіюється в повітрі навіть за слабого вітру. Отже, потенційний ризик для населення обмежується витоком у закритих середовищах і топографічних западинах, де концентрації можуть зростати, оскільки CO₂ більш щільний за повітря і має тенденцію накопичуватися близько до землі. Знання властивостей зони дегазації корисне для запобігання ризикам й управління ними. У дійсності багато людей мешкає в зонах, що характеризуються щоденною еманациєю природного газу. Наприклад, в Італії, в Чампіно поблизу Рима будинки розташовані на відстані лише 30 метрів від місць газових виходів на поверхню, де концентрація CO₂ в ґрунті доходить до 90%, і приблизно 7 тонн CO₂ щодня потрапляє в атмосферу. Місцеві мешканці уникають будь-якої небезпеки, дотримуючись простих правил безпеки: не спати в підвалі й добре провітрювати помешкання.

Вплив на довкілля

Потенційні впливи на екосистеми можуть відрізнятися залежно від того, розташована ділянка зберігання у відкритому морі чи на суші.

У морських екосистемах основним ефектом від витоку CO₂ стає місцеве зниження рН і пов'язаний з цим вплив, у першу чергу, на тварин, що живуть на морському дні й не можуть покинути місце існування. Проте, наслідки просторово обмежені й екосистема проявляє ознаки відновлення невдовзі після того, як витік слабшає.

Вплив на наземну екосистему загалом можна охарактеризувати таким чином:

- **рослинистість** – хоча наявність газоподібного CO₂ в ґрунті при його концентрації до 20-30% насправді може сприятливо впливати на родючість і збільшувати швидкість зростання певних рослин, значення вище цього порогу можуть виявитися смертельними для деяких, але не для всіх рослин. Цей локальний ефект особливо проявляється навколо місць виходу газу на поверхню, однак рослинність залишається високою й здоровою тільки на відстані кількох метрів від виходу газу (Мал. 2);
- **якість ґрунтових вод** – хімічний склад ґрунтових вод може змінюватися через додавання CO₂, оскільки вода стає більш кислою, і елементи з гірських порід і мінералів водоносного горизонту можуть вивільнюватися й потрапляти у воду. Навіть якщо CO₂ просочиться у водоносний горизонт з питною водою, ефект залишиться локальним, у нинішній час учені вивчають його кількісний вплив. Цікаво, що багато водоносних горизонтів Європи збагачені природним CO₂, і ця вода насправді розливається в пляшки і продається як „газована мінеральна вода“;
- **цілісність порід** – підкислення ґрунтових вод може спричинити розчинення порід, зниження структурної цілісності й утворення провалів. Однак цей тип впливу може статися тільки за дуже специфічних геологічних і гідрогеологічних умов (тектонічна активність, висока швидкість потоку водоносних горизонтів, багата на карбонати мінералогія), які навряд чи можуть виникнути над місцем штучного геологічного зберігання.

На завершення можна зазначити: оскільки вплив будь-якого гіпотетичного витоку CO₂ залежатиме від конкретної ділянки, досконале знання конкретних геологічних і структурних умов дозволить нам визначити будь-які можливі шляхи міграції газу, обрати ділянки з найменшою можливістю витоку CO₂, передбачити поведінку газу й таким чином оцінити й запобігти будь-якому значному впливу на людей і екосистему.

*Малюнок 2
Вплив на
рослинистість витоку
CO₂ з підвищеним
(ліворуч) і зниженим
(праворуч) потоком.
Вплив обмежений
територією, на якій
CO₂ виходить
назовні.*

Як можна контролювати ділянки зберігання в глибині й на поверхні землі?

Усі ділянки зберігання CO₂ необхідно контролювати для виробничих цілей, безпеки, з екологічних, соціальних і економічних причин. Стратегія має бути складена таким чином, щоб визначити, що саме контролюватиметься і як.

Навіщо нам потрібний моніторинг?

Моніторинг ефективності ділянки матиме вирішальне значення для досягнення головної мети геологічного зберігання CO₂, а саме тривалої ізоляції антропогенного CO₂. Причин для моніторингу ділянок зберігання багато, зокрема:

- **Виробничі:** для контролю й оптимізації процесу закачування CO₂.
- **Безпека й довкілля:** для зниження й відвернення будь-якого впливу на людей, дику природу й екосистему навколо ділянки зберігання і для впевненості у пом'якшенні наслідків глобальної зміни клімату.
- **Соціальні:** надавати громадськості інформацію, необхідну для розуміння безпеки ділянки зберігання і щоб допомогти залучити громадську довіру.
- **Фінансові:** залучення довіри ринку до технології УЗВ і для підтвердження обсягів закачаного CO₂, щоб вони були враховані як „невироблені викиди” на наступних етапах роботи Європейської системи торгівлі викидами (СТВ).

Моніторинг початкового стану довкілля (так званого „базового”), так само як і подальшої характеристики ділянки зберігання є важливою нормативною вимогою Директиви ЄС по УЗВ, опублікованої 23 квітня 2009 року. Обслуговуючі компанії повинні вміти продемонструвати, що характеристики ділянки зберігання відповідають законам і продовжуватимуть відповідати їм у довгостроковій перспективі. Моніторинг – це важливий компонент, який зменшуватиме неясності в характеристиці ділянки зберігання, він завжди тісно пов'язаний з заходами щодо організації управління безпекою.

Якими є цілі моніторингу?

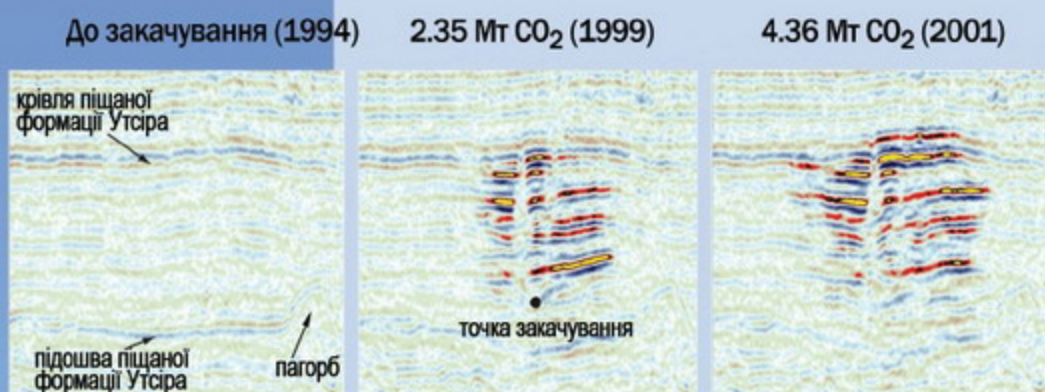
Моніторинг може бути спрямований на досягнення різних цілей і дій у різних частинах ділянки зберігання, таких як:

- Відображення ореолу поширення – відстеження

пересування CO₂ від місця закачування. Це дозволяє отримувати ключові дані для настройки моделей, які передбачають майбутнє поширення CO₂ на ділянці зберігання. Існує велика кількість готових методів, особливо рекомендуються повторні дослідження методом сейсмічної розвідки, які успішно застосовувалися в кількох демонстраційних і експериментальних проектах (Мал. 1).

- Цілісність породи-покришки – необхідно оцінити ступень ізоляваності CO₂ в колекторі сховища й забезпечити раннє попередження про будь-які неочікувані пересування CO₂ вгору. Це може бути особливо важливим у проекті на етапі закачування, коли тиск у колекторі відчутно, але тимчасово зростає.
- Цілісність свердловини. Це важливий момент, оскільки глибокі свердловини можуть потенційно забезпечувати прямий шлях для міграції CO₂ нагору. За свердловинами закачування CO₂, – будь-якими спостережними чи вже існуючими й покинутими – необхідно належним чином слідкувати впродовж стадії закачування і надалі, щоб запобігти раптовому витoku CO₂ назовні. Моніторинг використовується і для підтвердження того, що всі свердловини були ефективно запечатані, якщо вони більше не використовуються. Існуючі геофізичні й геохімічні системи моніторингу, які є звичайною практикою в нафтовій і газовій індустрії, можуть бути встановлені в свердловинах або над ними для забезпечення раннього попередження й безпеки.
- Міграція у перекриваючих породах. На ділянках зберігання, де додаткові гірські породи, що перекривають колектор зверху, мають властивості, схожі з властивостями порід-покришок, які перекривають відкладення, у яких зберігається CO₂, можуть формувати ключовий компонент у зменшенні ризику потраплення CO₂ до моря чи атмосфери. Якщо в ході моніторингу колектора чи навколо породи-покришки виявиться раптовий витік крізь породу-покришку, моніторинг перекриваючих порід буде необхідний. Багато методів, використовуваних для відображення ореолу поширення або моніторингу цілісності порід-покришок, можуть бути використані для перекриваючих порід.
- Поверхневі витoki, визначення й вимірювання стану атмосфери. Для впевненості в тому, що закачаний CO₂ не мігрував на поверхню, весь діапазон геохімічних, біохімічних методів і методів дистанційного зондування застосовують для виявлення витoku, оцінювання й моніторингу поширення CO₂ в ґрунті й розсіюванні його в атмосфері або в морському середовищі (Мал. 2).

Малюнок 1
Сейсмічне зображення для моніторингу ореолу* поширення CO₂ в пілотному проекті Слейпнер до закачування (що розпочалося в 1996 р.) і після закачування (відповідно через 3 і 5 років).



- Кількість закачаного CO₂ для законодавчого й фінансового контролю. Хоча кількість закачаного CO₂ можна легко заміряти у основі свердловини, кількісні заміри в колекторі технічно дуже проблематичні. Якщо трапляється витік поряд з поверхнею, то кількість вивільненого CO₂ має бути порахована для національного реєстру парникових газів і майбутніх планів СТВ.
- Рух ґрунту й мікросейсмічність*. Збільшений через закачування CO₂ тиск у колекторі в особливих випадках може збільшити ймовірність мікросейсмічної активності й дрібномасштабних пересувань ґрунту. Методи мікросейсмічного моніторингу й дистанційні методи (розвідка з літаків чи супутників) дають можливість вимірювати навіть крихітні викривлення ґрунту.

Як робиться моніторинг?

Широкий спектр методів моніторингу вже був застосований у чинних демонстраційних і дослідницьких проектах. Вони включають прямі методи спостереження за CO₂ й такі, що опосередковано вимірюють ефект його впливу на гірські породи, рідини, гази й екологію. Прямі вимірювання включають у себе аналізи рідин з глибоких свердловин або вимірювання концентрацій газу в ґрунті чи атмосфері. Опосередковані методи включають геофізичну розвідку й моніторинг зміни тиску в свердловинах або зміни рН у ґрунтових водах.

Моніторинг необхідний як для ділянок зберігання на суші, так і у відкритому морі. Вибір відповідного методу моніторингу залежатиме від технічних і геологічних характеристик ділянки, а також від цілей моніторингу. Уже існує широкий спектр методів моніторингу (Мал. 3), багато з яких загальноновизнані в нафтовій і газовій промисловості; ці методи адаптуються до ситуації з CO₂. Дослідження ведуться з метою оптимізації існуючих методів, розвитку інноваційних, а також задля покращення точності й надійності вимірювань, здешевлення, автоматизації використання й демонстрації ефективності.

Стратегія моніторингу

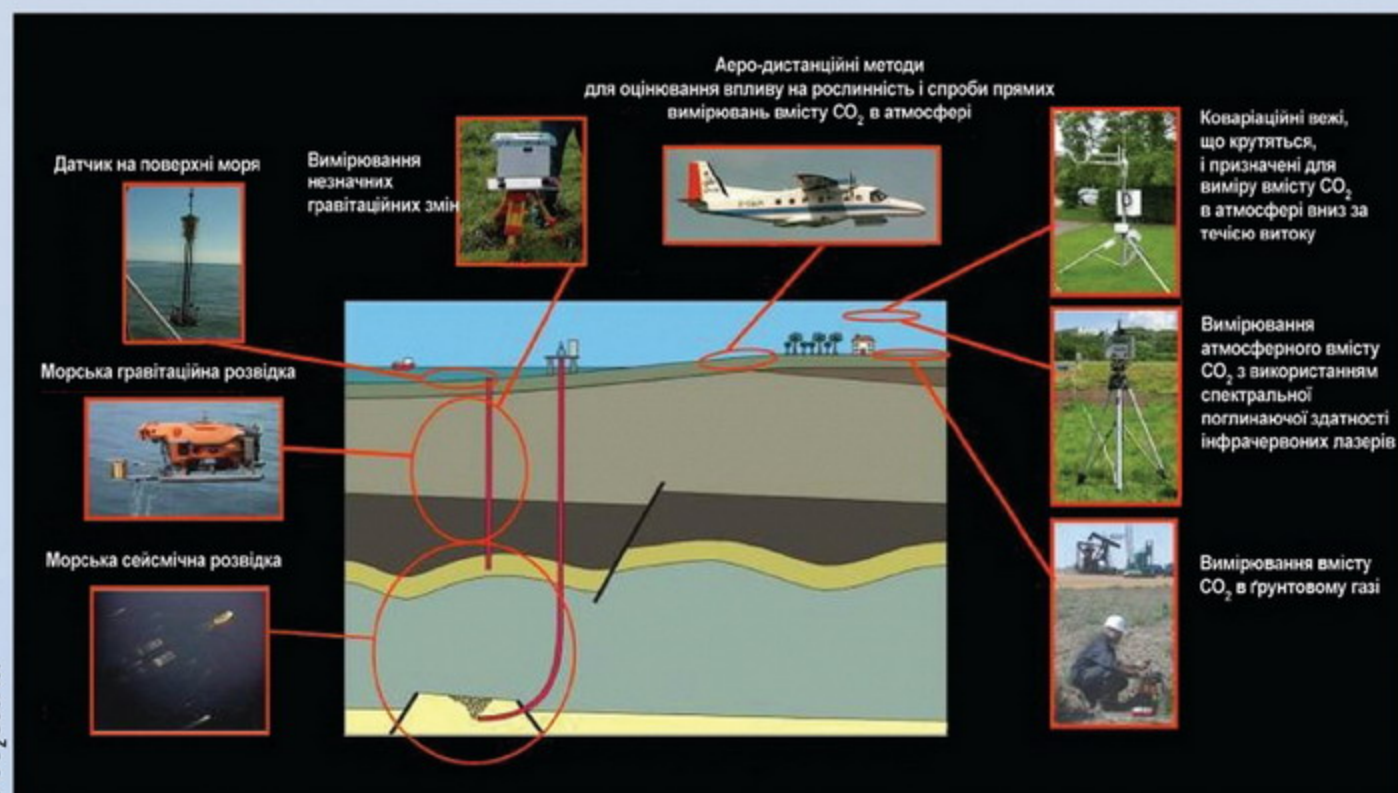
Під час розробки стратегії моніторингу має бути ухвалено багато рішень, які залежать від геологічних та інженерних умов, специфічних для кожної конкретної ділянки зберігання, таких як геометрія колектора й глибина, очікуване поширення ореолу CO₂, можливі шляхи витоків, перекриваюча геологія, час закачування й швидкість потоку, а також поверхневі характеристики, зокрема топографія, густота населення, інфраструктура й екосистеми. Одразу після прийняття рішень відносно найбільш придатних методів і місць вимірювання базові дослідження мають проводитися до початку операцій закачування, щоб стати рівнем відліку для всіх майбутніх вимірювань. Зрештою кожна програма моніторингу має бути гнучкою, аби вона могла розвиватися навіть у тому випадку, якщо змінюватиметься сам проект зберігання. Стратегія моніторингу, здатна інтегрувати всі ці питання й підвищити ефективність витрат, формує найважливіший компонент в аналізі ризиків і в підтвердженні безпеки ділянки та її ефективності.

Підсумовуючи сказане, зазначимо: ми знаємо, що моніторинг ділянок зберігання CO₂ проводять з використанням різних методів, які вже наявні на ринку чи перебувають у стадії розробки. На сьогоднішній день дослідження ведуть не лише в галузі розвитку нового обладнання (наприклад, для використання на морському дні), але також для оптимізації ефективності моніторингу й зменшення витрат.



© CO₂GeoNet

Малюнок 2
Буй для моніторингу з сонячними батареями для постачання енергії, пліт і пристрій для збирання зразків газу з дна моря.



Малюнок 3
Невелика вибірка, що демонструє спектр існуючих методів для моніторингу різних компонентів системи зберігання CO₂.

© CO₂GeoNet

Які критерії безпеки має бути встановлено і враховано?

З метою забезпечення безпеки й ефективності зберігання умови для розробки й функціонування проекту мають бути встановлені законодавчими органами і враховані обслуговуючими компаніями.

Незважаючи на те, що геологічне зберігання CO₂ в нинішній час широко визнане як надійний варіант для пом'якшення зміни клімату, критерії безпеки з урахуванням людського здоров'я й місцевого довкілля мають бути врегульовані ще до початку робіт у промисловому масштабі. Такі критерії можуть бути встановлені як вимоги, висунуті законодавчими органами до обслуговуючих компаній – для більшої впевненості в тому, що вплив на здоров'я місцевого населення, безпеку й довкілля (включаючи ґрунтові води) буде незначним у найближчій, середній та довгостроковій перспективі. Одним з ключових питань геологічного зберігання CO₂ є те, що воно має бути постійним, а отже на ділянках зберігання не передбачається витоків. Проте, сценарій „А що як?” означає, що ризики мають бути оцінені, і від обслуговуючих компаній вимагають дотримання заходів, що запобігають будь-якому витоку чи аномальній поведінці на ділянці зберігання. Згідно з рекомендаціями МГЕЗК, закачаний CO₂ має залишатися під землею принаймні 1000 років, які дозволять стабілізувати або скоротити вміст CO₂ в атмосфері шляхом природного обміну з водами океану, а отже, зменшити зростання температури поверхні землі, яке відбувається через глобальне потепління. Однак локальні наслідки мають бути оцінені за часовою шкалою від днів до тисяч років. Можна визначити кілька основних моментів, особливо важливих упродовж дії проекту зберігання CO₂ (Мал. 1). Безпека буде повною в усіх відношеннях, якщо дотримуватися:

- ретельного вибору й характеристики ділянки зберігання;
- оцінки безпеки;

в процесі уловлювання. Це важливо для запобігання будь-якій несприятливій взаємодії зі свердловиною, колектором, породою-покришкою і, в разі витоків, будь-якими ґрунтовими водами, що протікають вище.

Критерії безпеки для розробки проекту

Безпеку необхідно продемонструвати до початку робіт. Обираючи ділянку, необхідно перевірити такі основні компоненти:

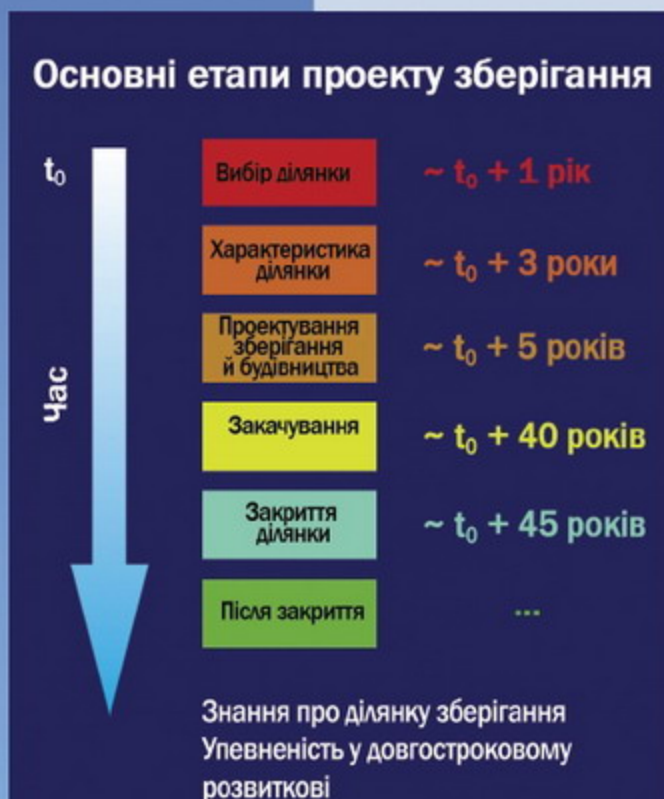
- породу-колектор і породу-покришку;
- перекриваючі породи, зокрема непроникні шари, які можуть виступати як вторинні ізолюючі шари;
- наявність проникних розломів чи свердловин, які можуть стати шляхами витоків на поверхню;
- водоносні горизонти питної води;
- обмеження на поверхні, пов'язані з населенням і екологією.

Для оцінки геології й геометрії ділянок зберігання використовують методи розвідування родовищ нафти й газу. Моделювання потоку рідини, хімічне й геомеханічне моделювання CO₂ в межах колектора дозволяє передбачити поведінку CO₂ та довгострокові наслідки, а також визначити параметри ефективного закачування. Ретельно визначивши характеристики ділянки зберігання, можна передбачити необхідний сценарій „нормального” режиму зберігання, що відповідає ділянці, придатній для зберігання, де ми будемо впевнені в тому, що CO₂ залишиться в колекторі.

Оцінка ризиків вимагає розгляду менш імовірних сценаріїв майбутнього стану сховища, в тому числі й непередбачених випадків. Особливо важливо передбачити будь-які можливі шляхи витоків газу й можливі наслідки цього (Мал. 2). Усі сценарії витоків мають бути проаналізовані експертами, і там, де це можливо, має бути застосовано цифрове моделювання для оцінки ймовірності виникнення витоків й потенційних труднощів, пов'язаних з цим. Наприклад, розвиток ореолу поширення CO₂ потрібно уважно картографувати для визначення будь-яких зв'язків із зоною розломів. Чутливість до змін параметрів і невизначеності мають бути ретельно встановлені під час оцінювання ризиків. Оцінку можливих ефектів впливу CO₂ на людину й довкілля варто розглядати в межах дослідження оцінки впливу, яка зазвичай практикується в будь-якому процесі ліцензування промислового об'єкту. У цьому процесі і нормальний сценарій, і сценарій витоків вивчатимуться для оцінки будь-якого можливого ризику, пов'язаного з об'єктом.

Короткострокова й довгострокова програми моніторингу мають бути встановлені з урахуванням аналізу оцінок ризиків і контролювати важливі параметри, визначені в різних сценаріях. Основними цілями такого моніторингу

Малюнок 1
Різні етапи проекту зберігання

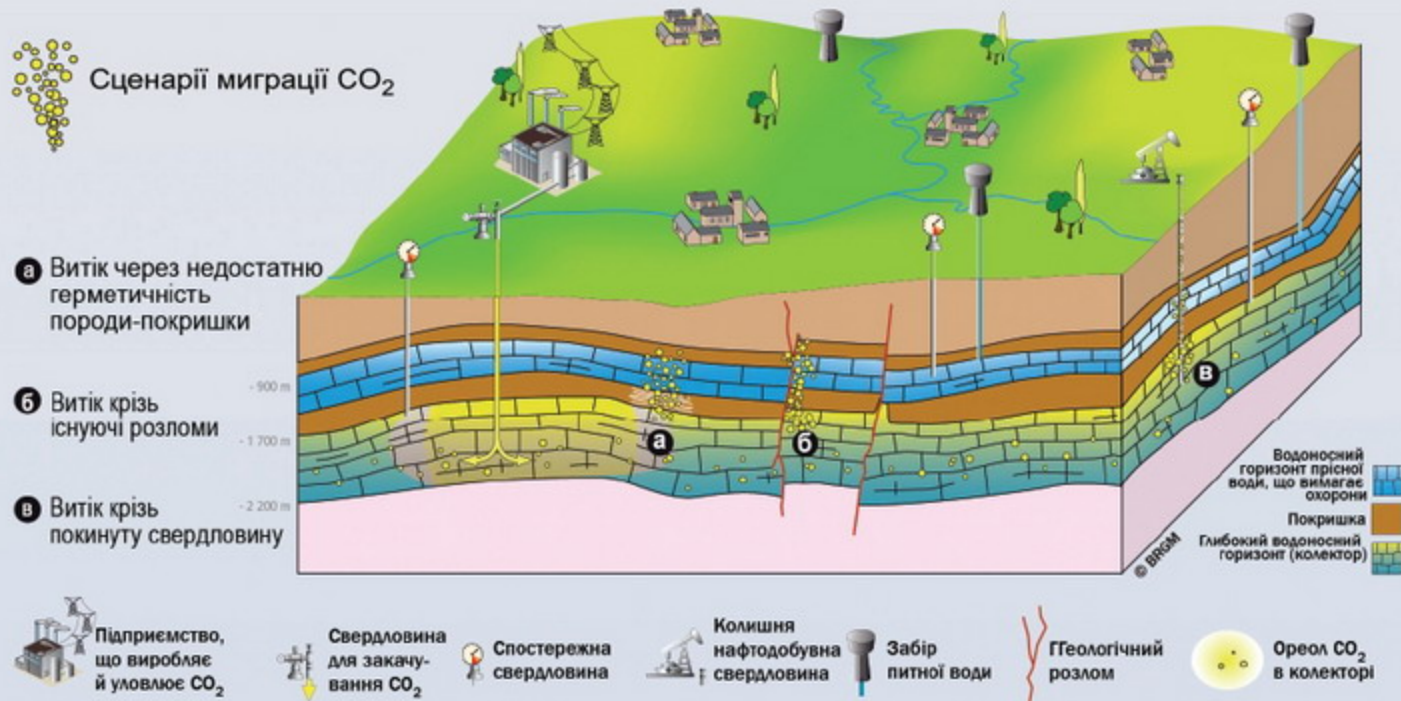


- правильного обслуговування;
- відповідного плану моніторингу;
- адекватного плану відновлення.

Супровідні найважливіші цілі:

- гарантувати, що CO₂ залишиться в колекторі;
- підтримувати цілісність свердловини;
- зберігати фізичні властивості колектора (включаючи пористість, проникність, закачуваність) і непроникну природу породи-покришки;
- урахувати склад потоку CO₂, звертаючи особливу увагу на будь-які домішки, не видалені

Малюнок 2
Приклад можливих
сценаріїв витоку



є: зображення ореолу поширення CO₂, перевірка цілісності свердловини й породи-покришки, виявлення будь-якого витоку CO₂, оцінка якості ґрунтових вод і впевненість у тому, що CO₂ не досягне поверхні. План відновлення й пом'якшення наслідків – останній компонент оцінки безпеки, спрямований на деталізацію списку корегувальних заходів, які застосовуються в разі витоку чи аномальної поведінки. Він включає спостереження за цілісністю перекриваючих порід, обваленням свердловин під час закачування газу й після його завершення, крім того, розглядаються й екстремальні рішення із відновлення сховища, зокрема й оборотність зберігання. Існуючі ноу-хау включають у себе стандартні методи для нафти й газу, такі як капітальний ремонт свердловин після завершення закачування, зменшення тиску закачування, часткове чи повне вилучення газу, забір води для зменшення тиску, видобування газу на невеликих глибинах тощо.

- склад закачаного потоку CO₂;
- цілісність свердловин(и) закачування та будь-якої свердловини, розташованої в ореолі поширення CO₂ або поряд з ним;
- ореол поширення CO₂ та визначення будь-яких витоків;
- стійкість ґрунту.

У процесі закачування необхідно регулярно порівнювати поведінку закачаного CO₂ з прогнозованою. Це дозволить постійно вдосконалювати наші знання про ділянку зберігання. Якщо буде помічено будь-яку аномальну поведінку, то програму моніторингу потрібно оновити і в разі необхідності вжити корегувальних заходів. У разі підозри витоку відповідні методи моніторингу можуть бути націлені на певний простір ділянки зберігання в діапазоні від колектора до поверхні. Вони здатні виявити CO₂, який піднімається, і будь-який несприятливий вплив, який може бути шкідливим для водоносних горизонтів, питної води, довкілля й зрештою для людини.

Після завершення закачування починається стадія закриття: свердловини мають бути правильно закриті й ліквідовані, програма моделювання й моніторингу оновлена, і, в разі необхідності, застосовані корегувальні заходи для зменшення ризиків. Коли рівень ризиків розглядатиметься як досить низький, відповідальність за зберігання переноситься на національні органи, і план моніторингу може бути тимчасово зупинений чи зведений до мінімуму.

Директива Європейського Союзу встановлює правові засади, які гарантують, що уловлювання й зберігання CO₂ - це доступний дієвий засіб для пом'якшення наслідків, який можна використовувати безпечно й відповідально.

На завершення зазначимо, що критерії безпеки є невід'ємною частиною успішного промислового впровадження зберігання CO₂. Вони мають бути адаптовані до умов кожної конкретної ділянки зберігання. Ці критерії будуть особливо важливими для громадського визнання й необхідні в процесі ліцензування, для яких регулюючі органи мають визначити рівень деталізації вимог безпеки.

Критерії безпеки в процесі виконання робіт й після їх завершення

Головний аспект безпеки пов'язаний зі стадією виконання робіт. Після закінчення закачування, падіння тиску робить сховище більш безпечним. Упевненість у можливості закачування й зберігання CO₂ безпечним способом базується на досвіді промислових компаній. CO₂ є досить поширеним продуктом, використовуваним у різних галузях промисловості, таким чином, під час роботи з цією речовиною не виникне жодних нових проблем. Розробка й контроль процесу виконання робіт базуватимуться переважно на досвіді нафтової й газової промисловості, зокрема на сезонному зберіганні природного газу або підвищенні нафтовіддачі пластів (ПНП). Основні параметри, що вимагають контролю, такі:

- тиск закачування та швидкість потоку – перший має підтримуватися нижче рівня тиску, за умови перевищення якого утворюються тріщини в породі-покришці;
- обсяг закачаного газу має відповідати прогнозам, складеним за допомогою моделювання;

Водоносний горизонт: проникне тіло порід, що містять воду. Неглибокі поверхневі водоносні горизонти містять прісну воду, яка використовується для споживання людиною. Ті, що знаходяться на великих глибинах, заповнені солоною водою, непридатною для будь-яких людських потреб. Це так звані солоні водоносні горизонти.

Закачуваність: характеризує легкість, з якою рідина (наприклад, CO₂) може бути закачана до геологічної формації. Вона визначається як частка від поділу швидкості закачування на різницю тисків між точкою закачування всередині біля основи свердловини й точкою у формації.

Колектор: тіло гірської породи чи осадових, достатньо пористе й проникне для розміщення й зберігання CO₂. Піщаник і вапняк – найпоширеніші породи колекторів.

Літостатичний тиск: сила, що чинить тиск на породу перекриваючими шарами, розташованими над породою але нижче поверхні землі. Літостатичний тиск збільшується з глибиною.

Мікросейсмічність: не пов'язані із землетрусами слабкі коливання чи вібрації земної кори, які можуть бути спричинені різними природними або штучними факторами.

Надкритичний: стан рідини при тисках і температурах, вищих за критичні значення (31.03 °C і 7.38 МПа для CO₂). Властивості таких рідин постійно змінюються від більш газоподібних за умов низького тиску до більш рідиноподібних за умов великого тиску.

Ореол CO₂: просторовий розподіл надкритичного CO₂ в межах гірських порід.

Перебиваючі породи: геологічні шари, що знаходяться між породою-покришкою колектора й поверхнею землі (або морського дна).

Підвищення нафтовіддачі пластів (ПНП): методика, яка покращує видобуток нафти шляхом закачування рідини (таких як потік води чи CO₂), що допомагає мобілізувати нафту в колекторі.

Пористість: відсоток від основного обсягу породи, який не займає мінерал. Ці прогалини називаються порами, і вони можуть бути заповнені різними рідинами, як правило, в глибинних породах цією рідиною є солона вода, але вона також може бути нафтою і газом, таким як метан або ж природним CO₂.

Порода-покришка: непроникний шар порід, який діє як бар'єр на шляху руху рідин і газів та утворює пастку, якщо перебиває колектор.

Для подальшого читання:

Спеціальний звіт по УЗВ Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК):
http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_wholereport.pdf

Сторінка Європейської Комісії про кліматичну діяльність з УЗВ, включаючи інформацію щодо правової бази та реалізації впровадження Директиви з УЗВ:
http://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs_en.htm

Інтернет-сторінка МЕА з методів моніторингу:
http://www.co2captureandstorage.info/co2tool_v2.1beta/introduction.html

Природний аналог: існуючий у природі колектор CO₂. Ділянки можуть бути з витоком чи без витоків, їх вивчення може покращити наше розуміння долі CO₂ в глибоких геологічних системах у довгостроковій перспективі.

Проникність: властивість або здатність пористої породи пропускати рідину; це міра відносної легкості протікання рідини під дією градієнта тиску.

Свердловина: круглий отвір, зроблений шляхом буріння, зокрема, глибока свердловина невеликого діаметру, така як нафтова свердловина.

Розсіл: дуже солона вода з високою концентрацією розчинених солей.

УЗВ: уловлювання й зберігання CO₂.

CSLF: Форум лідерів з видалення вуглецю (ФЛВВ). Міжнародна ініціатива із зміни клімату, яка спрямована на розвиток більш досконалих і економічно ефективних технологій для відокремлення й уловлювання діоксиду вуглецю та його транспортування й довгострокового безпечного зберігання.

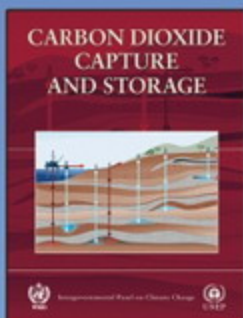
EU Geoscapacity: завершений Європейський науково-дослідний проект, який оцінив загальну геологічну ємність для зберігання антропогенних викидів CO₂, наявну в Європі.

GESTCO: завершений Європейський науково-дослідний проект, який оцінив можливості геологічного зберігання CO₂ у 8 країнах (Норвегія, Данія, Великобританія, Бельгія, Нідерланди, Німеччина, Франція й Греція).

IEAGHG: Програма з дослідження парникового газу Міжнародного енергетичного агентства (МЕА-ППГ). Міжнародне співробітництво, що поставило перед собою цілі: оцінити технології зменшення викидів парникових газів, поширити результати цих досліджень, визначити об'єкти дослідження, розвитку й демонстрації, а також підтримувати відповідну роботу.

IPCC: Міжурядова група експертів зі зміни клімату (МГЕЗК). Цю організацію було засновано в 1988 р. Всесвітньою метеорологічною організацією (ВМО) та Програмою з довідки Організації Об'єднаних Націй для отримання наукової, технічної й соціально-економічної інформації, необхідної для розуміння зміни клімату, його потенційного впливу і можливостей для адаптації й пом'якшення наслідків. МГЕЗК і Альберту Гору була присуджена Нобелівська Премія Миру за 2007 рік.

pH: міра кислотності розчину, де pH = 7 відповідає нормальній кислотності.



Що таке CO₂GeoNet?

CO₂GeoNet – це Європейське наукове співтовариство, до якого можна звернутися для отримання чіткої й вичерпної інформації про геологічне зберігання CO₂ – передову й життєво необхідну технологію пом'якшення наслідків зміни клімату. CO₂GeoNet було створено за ініціативою Європейської Комісії як мережа експертів у межах 6-ї Рамкової Програми (ЕК РП6 контракт 2004-2009). Вона об'єднує 13 інститутів з 7 європейських країн, у кожного з яких досить високий міжнародний рівень і унікальний досвід у галузі досліджень геологічного зберігання CO₂. У 2008 році CO₂GeoNet було зареєстровано як некомерційну асоціацію згідно з французьким законодавством – для продовження діяльності після завершення фінансування з боку Євросоюзу.

CO₂GeoNet має великий досвід науково-дослідних проектів у таких галузях: породи колекторів і покриток, потенційні можливості для міграції CO₂ на поверхню, методи моніторингу, можливі впливи на людей та екосистему, громадське визнання та зв'язки. CO₂GeoNet пропонує різні послуги в чотирьох основних галузях: 1) спільні дослідження; 2) навчання й створення потенціалу; 3) наукові консультації; 4) інформація та зв'язки.

CO₂GeoNet стрімко набирає сили і стає міцною науковою компетентною європейською інстанцією, здатною забезпечувати необхідну наукову підтримку для широкомасштабного й безпечного впровадження геологічного зберігання CO₂. Розширення цього співтовариства для задоволення загальноєвропейських потреб здійснюється за допомогою проекту ГЗВ Європа (CGS Europe) із координаційної діяльності, що фінансується Євросоюзом за РП7 (2010-2013).

ГЗВ Європа об'єднує в найсильніше ядро Асоціацію CO₂GeoNet та 21 інші дослідницькі організації з 28 держав Європи (24 держави-члени і 4 асоційовані країни). Для цього задіяна команда з кількох сотень учених, здатних займатися всіма аспектами геологічного зберігання CO₂, завдяки міждисциплінарній інтеграції. Нашою метою є надання зацікавленим сторонам і громадськості незалежної й науково обґрунтованої інформації про геологічне зберігання CO₂.

CO₂GeoNet: Європейська Мережа Експертів у галузі геологічного зберігання CO₂

BGR (Німеччина); **BGS** (Великобританія); **BRGM** (Франція); **GEUS** (Данія); **HWU** (Великобританія); **IFPEN** (Франція); **IMPERIAL** (Великобританія); **NIVA** (Норвегія); **OGS** (Італія); **IRIS** (Норвегія); **SPR Sintef** (Норвегія); **TNO** (Нідерланди); **URS** (Італія).



www.co2geonet.eu

ГЗВ Європа: Загальноєвропейська координаційна діяльність у галузі геологічного зберігання CO₂.

CO₂GeoNet (13 членів, указаних вище); **CzGS** (Чехія); **GBA** (Австрія); **GEOECOMAR** (Румунія); **GEO-INZ** (Словенія); **G-IGME** (Греція); **GSI** (Ірландія); **GTC** (Литва); **GTK** (Фінляндія); **LEGMC** (Латвія); **ELGI** (Угорщина); **LNEG** (Португалія); **METU-PAL** (Турція); **PGI-NRI** (Польща); **RBINS-GSB** (Бельгія); **SGU** (Швеція); **SGUDS** (Словаччина); **S-IGME** (Іспанія); **SU** (Болгарія); **TTUGI** (Естонія); **UB** (Сербія); **UNIZG-RGNF** (Хорватія).



www.cgseurope.net

CO₂GeoNet отримала широке визнання на європейській і міжнародній арені.

CO₂GeoNet ухвалена Форумом лідерів з видалення вуглецю (ФЛВВ).



CO₂GeoNet співробітничав з Програмою з дослідження парникового газу Міжнародного енергетичного агентства (МЕА-ППГ).



Про брошуру

З метою підвищення обізнаності суспільства в галузі геологічного зберігання CO₂ CO₂GeoNet замислилася над всеохоплюючим питанням: „Що насправді означає геологічне зберігання CO₂?“. Команда видатних учених з CO₂GeoNet підготувала відповіді на 6 питань щодо сучасного стану справ, що базуються на дослідженнях і досвіді, зібраних по всьому світові. Метою роботи було надати чітку й неупереджену наукову інформацію для широкої аудиторії і сприяти діалогові про суттєві питання щодо технічних аспектів геологічного зберігання CO₂. Ця робота, зібрана в цій брошурі, була репрезентована на семінарі „Навчання й діалог“, що проходив у Парижі 3-го жовтня 2007 року. З брошурою „Що насправді означає геологічне зберігання CO₂?“ можна ознайомитися на веб-сайті, де вона представлена на різних мовах:

www.co2geonet.com/brochure



CO₂GeoNet

Європейська Мережа Експертів у галузі геологічного зберігання CO₂



www.co2geonet.eu

Секретаріат: 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.

Україномовну версію було перекладено в межах проекту „Низько-вуглецеві можливості для індустріальних регіонів України (LCOIR-UA)”, що фінансується Європейським Союзом та виконується Донецьким національним університетом (м. Донецьк, Україна).



ISBN: XXX-X-XXXX-XXXX-X

