

Десятилетний опыт наблюдений за закачиванием CO₂ в пески Utsira на площади Sleipner, на акватории Норвегии. Ten years' experience of monitoring CO₂ injection in the Utsira Sand at Sleipner, offshore NorwayRob Arts,¹ Andy Chadwick,² Ola Eiken,³ Sylvain Thibeau,⁴ и Scott Nooner⁵

Подземное хранение углекислого газа (CO₂) как мера по сокращению количества парниковых газов в атмосфере, и таким образом, по замедлению глобального потепления, широко изучалась и обсуждалась в последние два десятилетия (IPCC, 2005). Несмотря на то, что был получен значительный опыт по закачиванию CO₂ в целях увеличения извлекаемой нефти до начала проекта по хранению Sleipner, об эффективности подземного хранения CO₂ в течение длительного времени было известно крайне мало. За последние несколько лет было предложено несколько демонстрационных участков, большей частью в целях исследования осуществимости закачивания CO₂ в коллекторы различных типов и для изучения химического поведения и поведения потока CO₂ в недрах. Самым первым, наиболее длительным проектом и наиболее масштабной демонстрацией закачивания CO₂ в водоносные горизонты до настоящего времени являлся проект Sleipner, в центральной части Северного моря (Рисунок 1).

С октября 1996, компания Statoil и ее партнеры по проекту Sleipner произвели закачивание CO₂ в горизонт соленых вод, в песках Utsira, на глубине 1012 м под уровнем моря, в 200 м под кровлей коллектора. CO₂ разделяется на платформе с природным газом, добываемым на более глубоко залегающем месторождении газа Sleipner и закачивается в водный горизонт с помощью наклонной скважины на расстоянии по горизонтали порядка 2.3 км от платформы (Рисунок 2).

В данной статье описывается опыт, полученный на данном участке, особенно опыт, относящийся к мониторингу миграции CO₂ в недрах.

Песчаный коллектор Utsira

Поблизости от Sleipner, пески формации Utsira являются высокопористыми (30-40%), высоко проницаемыми (1-3 Дарси), слабо-консолированными песчаниками (Рисунок 3а), залегающими на глубинах от 800 м до 1100 м, при мощности порядка 250 м вблизи участка, на котором производилась закачка. Внутреннее строение характеризуется наложением очень малоамплитудных пластин или 'бугров', которые интерпретируются как отдельные лопасти конуса выноса и наиболее часто разделяются между собой тонкими аргиллитами внутри коллектора. Эта картина интерпретируется как комплексная картина конуса выноса низкого стояния моря,

отлагающегося в результате потоков частиц в морской среде при глубинах воды 100 м или более (Gregersen et al., 1997; Zweigel et al., 2004). Тонкие аргиллиты, мощностью порядка 1 м, действуют как гасители вертикальной миграции CO₂. В среднем, песчаные пачки между отдельными слоями аргиллитов имеют мощность около 30 м.

На данных каротажа резервуару свойственны резкие кровля и подошва (Рисунок 4), с пропорцией чистых

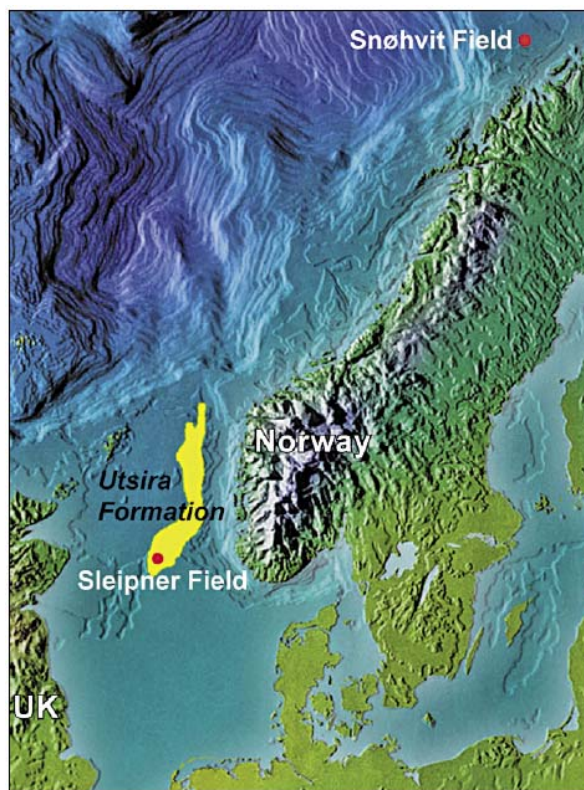
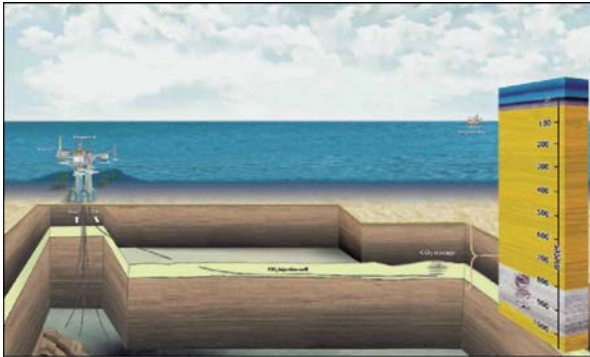


Рисунок 1 Карта песков Utsira.

¹ TNO, P.O. Box 80015, 3508 TA Utrecht, The Netherlands.² British Geological Survey, Kingsley Dunham Centre, Keyworth, Nottingham, Nottinghamshire NG12 5GG, UK.³ StatoilHydro, R&D Centre, 7005 Trondheim, Norway.⁴ Total, Avenue Larribau, 64018 Pau, France.⁵ Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University, 61 Route 9W, Palisades, NY 10964, USA.

'Corresponding author: Rob Arts, E-mail: Rob.Arts@tno.nl.

Рисунок 2 Схема закачивания CO₂ на участке Sleipner.

песков в коллекторском комплексе, обычно варьирующем между 0.7 и 1.0. Фракция глин большей частью соответствует тонким аргиллитам, которые проявляются в виде пиков на гамма каротаже, акустическом и нейтронном плотностном каротажах, а также на некоторых кривых индукции и сопротивления. На участке Sleipner, более мощный аргиллит, мощностью 6-7 м вблизи точки закачивания, отделяет самую верхнюю пластину песка от основного коллектора, залегающего под ним.

Корреляция отдельных тонких аргиллитов от скважины к скважине возможно на расстояниях до 1 км в случае близкорасположенных скважин. Однако, на расстояниях в несколько километров, как например, между разведочными скважинами, однозначная корреляция невозможна. Более того, поскольку аргиллиты нечетко разрешаются на базисных (до закачивания) сейсмических данных, их геометрия, распределение прослеживаемость представляют собой большую неопределенность при моделировании коллектора.

Пески Utsira перекрываются формацией Nordland (Isaksen and Tonstad, 1989), которая большей частью включает размытые дельтовые клинья плиоценового возраста. Они обычно становятся более грубозернистыми вверх по разрезу, от аргиллитов в более глубокой, осевой части бассейна до ила и песка в малоглубинной и более окраинной частях. В районе Sleipner пачка аргиллитов, расположенная ниже, имеет мощность от 200 до 300 м и формирует покрывку главного коллектора. Материал керна (рисунок 3b) обычно представлен илистым аргиллитом от серого до темно-серого, нецементированным и пластичным и, в общей массе однородным со слабыми признаками напластования.

Тестирование транспортировки газа на материале керна (Harrington et al., 2008) указывают на то, что покрывка Sleipner имеет приемлемую уплотняющую способность, и может удерживать закритическую колонну CO₂ по меньшей мере 100 м а возможно и до 400 м, в зависимости от плотности CO₂ (которая очень чувствительна к давлению и температуре на кровле коллектора). Это в большей мере объясняется избыточным выталкивающим давлением, которое обычно встречается в песках Utsira, где максимальная высота колонны обычно ограничена <10 м.

Моделирование коллектора

Моделирование потока в коллекторе было проведено на основании геологической модели. Неоднозначность в геометрии и латеральной протяженности тонких аргиллитов потребовала ввода упрощающих предположений. На основе каротажных ближайших скважин и



Рисунок 3 Фотографии материала керна с участка Sleipner: (a) Пески Utsira и (b) перекрывающиеся породы.

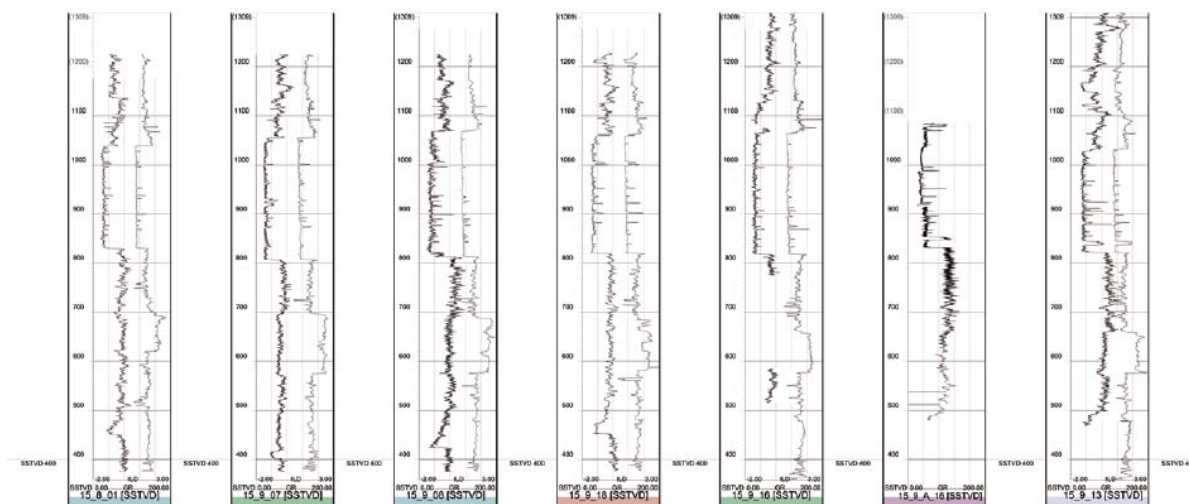
CO₂ Секвестрация

Рисунок 4 Панель корреляции каротажных кривых (левая трасса = кривая гамма каротажа, а правая трасса = кривая сопротивлений) в песках формации Utsira Sand желтым, покрышка - зеленым с запада на восток. Общая длина порядка 20 км. Самая восточная из скважин 15/9-A16 (скважина нагнетания) и 15/9-13 являются самой близкой к следу CO₂ (< 3 км).

первых результатов периодических сейсмических наблюдений, было выделено восемь отдельных тонких пластов аргиллитов. Им были приписаны различные геометрии структур, начиная от параллельности кровле коллектора до постепенного изменения с параллельного кровле коллектора на параллельный основанию коллектора.

Эффективная проницаемость аргиллитов была подобрана таким образом, чтобы моделирование потока соответствовало оценочным количествам CO₂, наблюдаемого при последовательных мониторинговых сейсмических съемках (Рисунок 5). Принимая во внимание неоднозначности, общая подгонка между сейсмическими наблюдениями и результатами моделирования коллектора имеет смысл. Основное несоответствие касается детальной модели латерального проникания CO₂ под тонкие аргиллиты.

У закачанного CO₂ будут температуры и давления, близкие к критическим. В точке закачки (1012 м под средним уровнем моря), первичные температуры на основе измерений вблизи скважин

и на основе знания регионального температурного градиента оцениваются как $41 \pm 1^\circ\text{C}$. Давление в скважине гидростатическое и варьирует от ~8 МПа на кровле резервуара до ~11 МПа на подошве (Baklid et al., 1996). Около 1.5-2% метана и тяжелых углеводородов закачиваются вместе с CO₂, что вызывает большие неточности в определении плотности и стабильности закачанного CO₂. Численное моделирование потока говорит о том, что часть CO₂ может находиться в газообразном состоянии, но большая часть находится в надкритическом состоянии.

Периодические сейсмические наблюдения шлейфа CO₂

Над областью закачивания CO₂ производились обширные исследования по программе сейсмомониторинга. Базисная 3D сейсмическая съемка была получена в 1994, повторные исследования производились в 1999, 2001, 2002, 2004, и 2006 г., соответственно, 2.30, 4.20, 4.97, 6.84, и 8.4 миллионами тонн (Mt) CO₂ в резервуаре.

Предсказанные изменения в сейсмическом отклике базировались на акустических свойствах породы, оценка которых производилась по данным каротажа и акустических свойствах CO₂ при давлениях и температурах коллектора (используя опубликованные уравнения состояния, калиброванные с помощью лабораторных данных). Для решения проблемы неоднозначности свойств CO₂ был использован диапазон плотностей и объемных модулей. Ввиду того, что CO₂ характеризуется высокой сжимаемостью, а пески Utsira обладают слабым каркасом породы, скорость продольных волн V обычно чувствительна к поровому флюиду. Замещение воды на CO₂ вызывает уменьшение V почти до 30%, даже при умеренном насыщении (Eiken et al., 2000; Arts et al., 2004a).

Влияние CO₂ на сейсмические данные на площади Sleipner очевидно. Шлейф CO₂ отображается на сейсмических данных в виде заметного многоуровневого объекта, включающего несколько ярких субгоризонтальных отражений, число которых растет со временем (Рисунок 6).

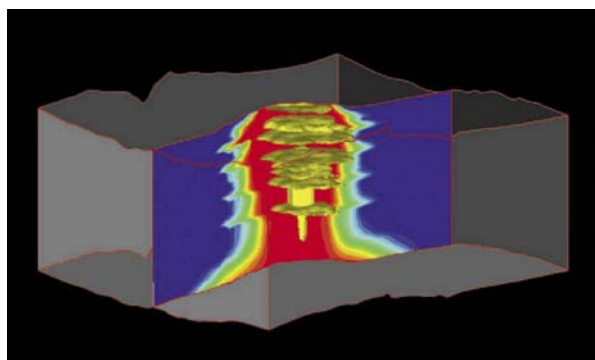


Рисунок 5 Моментальное изображение при моделировании коллектора 2002г. в песках Utsira Sand с глинистым экраном. Желтым показана изоповерхность 95% свободного CO₂. Красным – растворенный CO₂.

CO₂ Секвестрация

Отражения интерпретируются как отражения, возникающие из девяти отдельных слоев, высоко насыщенных CO₂, каждый мощностью до нескольких метров, пойманные в ловушку под аргиллитами внутри коллектора (Chadwick et al., 2004, 2005). Основные два эффекта, определяющие сейсмический отклик:

- Отрицательный сейсмический импеданс-контраст между аргиллитами и подстилающими песками становится более отрицательный (имеет большее абсолютное значение) когда CO₂ присутствует в песках.
- Сейсмический отклик является составным вейвлетом настройки

вызванный интерференцией от напластований водонасыщенных песков, аргиллитов, CO₂-насыщенных песков и, снова водонасыщенных песков.

Первый эффект приводит к более высокоамплитудным отрицательным отражениям как для классического 'яркого пятна'. Второй эффект (настройка) может привести к деструктивной или конструктивной интерференции, зависящей от мощности слоя CO₂. Простое сейсмическое моделирование на основе сверточной модели показало, что когда мощность колонны CO₂ увеличивается с 0 до 8 м, наблюдается постепенное увеличение амплитуды (отрицательной)

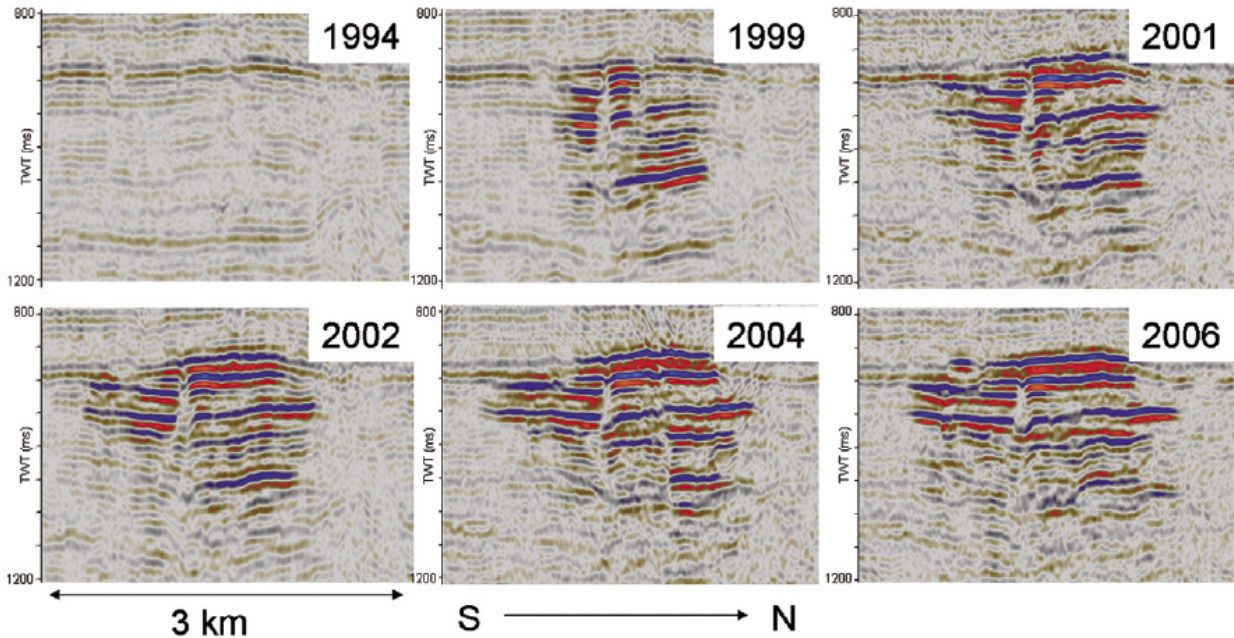


Рисунок 6 Развитие шлейфа CO₂ с годами, отображаемое на сейсмических данных.

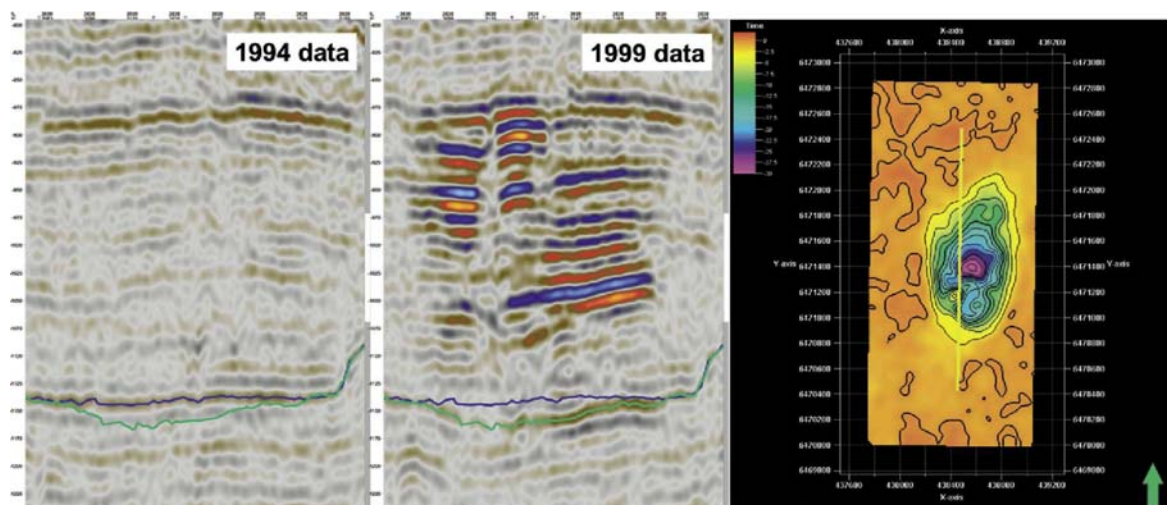


Рисунок 7 Карта понижения сейсмической скорости (справа) с временными сдвигами, закартированными с помощью взаимной корреляции и ручной интерпретации данных сейсмических мониторинговых наблюдений за период с 1994 по 1999. Горизонты указывают на пески Utsira, которые интерпретированы на сейсмических данных 1994 (синим) и на данных 1999 гг. (зеленым).

CO₂ Секвестрация

(Arts et al., 2004b). Максимальная амплитуды отражения соответствует мощности CO₂ порядка 8 м, так называемой 'мощностью настройки'.

Понижение сейсмической скорости (временной сдвиг) на сейсмических данных был определен путем взаимной корреляции сейсмических данных под полостью CO₂ на данных съемки 1994 г. (перед закачкой) с данными другой периодической сейсмической съемки. По полученным результатам взаимной корреляции, на участках, выделенных с помощью интерпретации вручную, были оценены и закартированы временные сдвиги, вызванные изменениями скорости. Самый большой эффект наблюдался с 1994 (перед закачкой) по 1999 (первая периодическая съемка), с временными сдвигами превышающими 30 мс (Рисунок 7). Это могло соответствовать локальной колонне со 100% насыщения CO₂ мощностью более 90 м. Исследование количественных показателей, с использованием отражающей способности шлейфа и понижения скорости, описываются в работе Chadwick et al. (2005, 2006a).

Развитие шлейфа CO₂ на различных уровнях захвата можно хорошо проследить со временем. CO₂ достиг кровли коллектора в 1999 при этом, как наблюдалось ранее (Chadwick et al., 2005, 2006a,b), явно происходит заполнение небольшой стратиграфической ловушки в кровле коллектора, благодаря действию выталкивающей силы, что подтверждает распространение CO₂ под крышкой. Пока нет свидетельств того, что CO₂ мигрирует в покрывающую толщу. В общих чертах, средняя и верхняя части шлейфа приобретают большую отражающую способность со временем и продолжают распространяться латерально, что регулирует общую

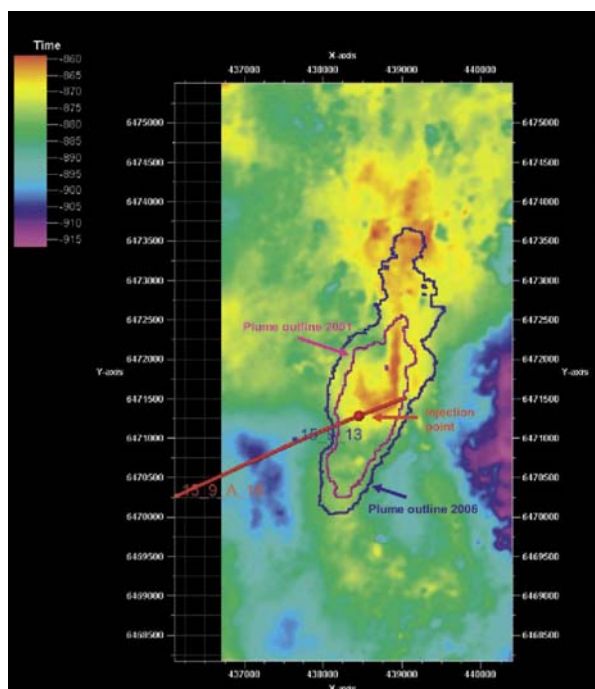


Рисунок 8 Границы протяженности шлейфа CO₂ в 2001 и 2006 на карте структуры кровли (в цвете) верхних песков формации Utsira.

протяженность шлейфа (Рисунок 8).

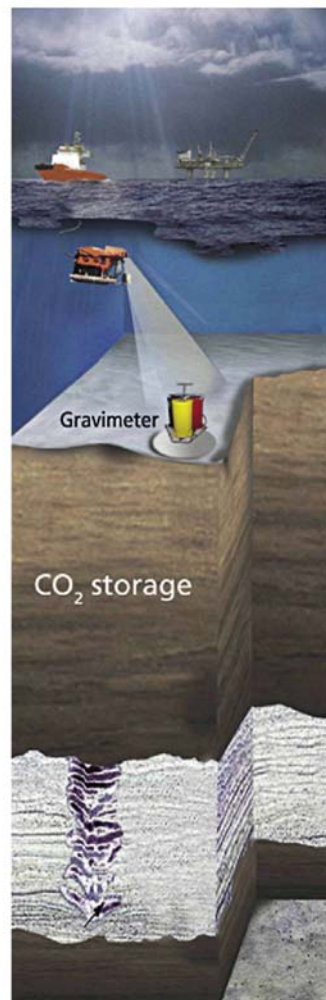


Рисунок 9 Эскиз гравиметрической съемки со дна (вверху) и гравиметра

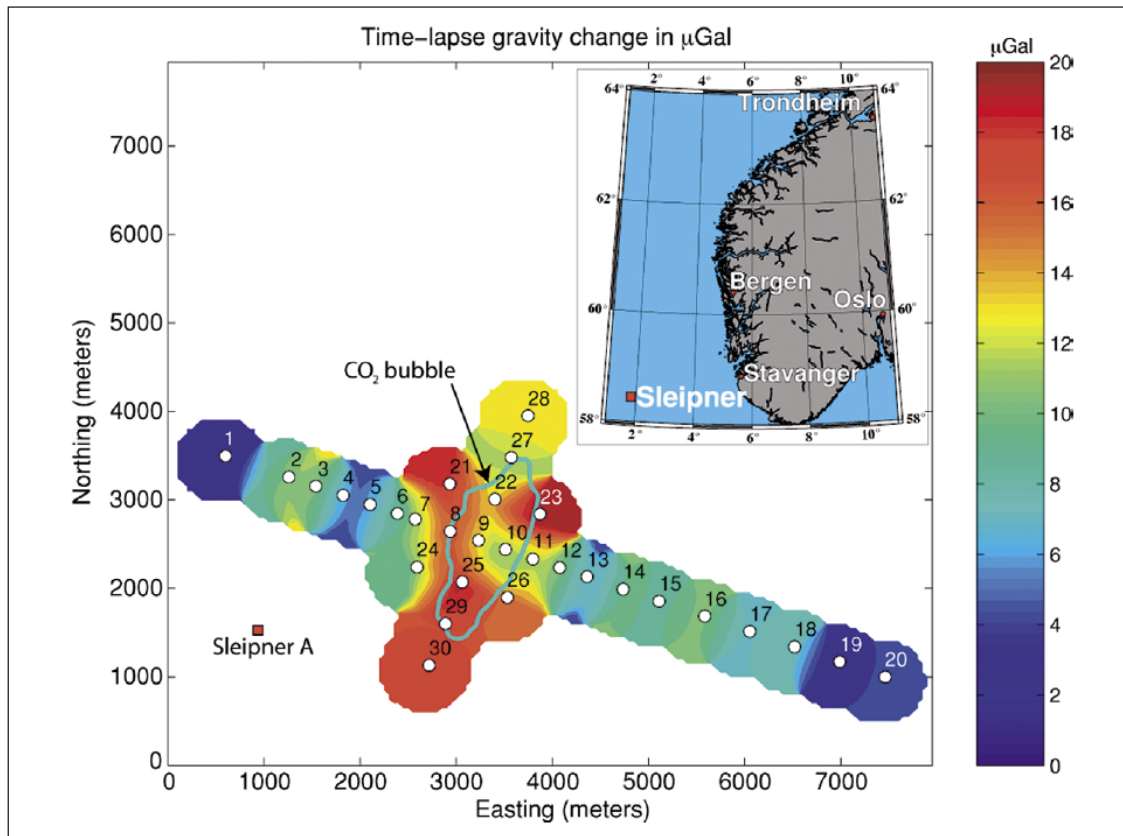


Рисунок 10 Периодические гравитационные наблюдения с 2002 по 2005. Исходные положения приборов на дне показаны белыми кружками, сглаженная версия изменений силы тяжести после ввода поправки за глубину и длинноволновой тренд. Отметим пространственно когерентное уменьшение силы тяжести в центральной части области съемки (голубыми линиями показаны границы сейсмически закартированного шлейфа CO₂ в 2001).

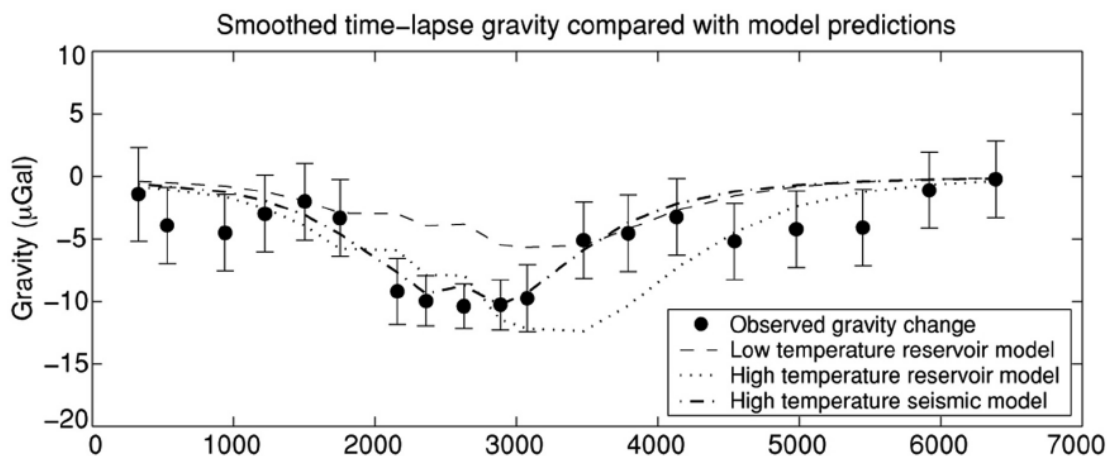


Рисунок 11 Сглаженные данные периодических наблюдений силы тяжести, нарисованные совместно с моделированным изменением силы тяжести для модели высоких (средняя плотности CO₂ 550 кг м⁻³) и низких температур коллектора (средняя плотность CO₂ 700 кг м⁻³). Обе модели и наблюдения были сглажены с нахождением среднего соседних значений. Наблюдаемые изменения силы тяжести наиболее близко соответствуют сейсмической модели для высоких температур.

CO₂ Секвестрация

Ввод ограничений для разрешения неопределенностей с использованием гравитационной периодической съемки с морского дна

На площади Sleipner выполнялась периодическая гравиметрическая съемка с морского дна. Возможность обнаружения закачанного CO₂ посредством повторных гравитационных измерений сильно зависит от его плотности и распределения в недрах. Поскольку первичный анализ технической реализуемости указал на изменения, поддающиеся измерению (Williamson et al., 2001), первая гравиметрическая съемка с дна была проведена на Sleipner в 2002, с 5.19 Мт CO₂ в шлейфе. Съемка была проведена на точках бетонных пикетов с заранее заданными позициями на морском дне, которые служили опорными положениями для (повторных) гравиметрических измерений. Параллельные измерения силы тяжести и давления воды проводились на каждом пикете с использованием адаптированного модуля для гравитационных измерений и измерений давления, установленного на передвижном аппарате с дистанционным управлением (Рисунок 9).

Тридцать станций-пикетов было развернуто на двух перпендикулярных профилях, перекрывающих область 7 км в направлении восток-запад и 3 км в направлении север-юг и охватывающих подземную часть хвоста CO₂ (Рисунок 10). Каждая станция наблюдения посещалась, по меньшей мере, три раза для лучшей коррекции за инструментальный дрейф и другие ошибки. Согласно оценкам повторяемость одной станции была 4 мГалл. При мониторинговых наблюдениях дополнительная погрешность 1-2 мГалл ассоциируется с опорным уровнем нуля. Таким образом, окончательный порог обнаружения для площади Sleipner, оценивается в 5 мГалл для отдельных станций и немного меньше для подгонки модели по точкам сетки.

На основе расчетов гравитационного отклика моделей шлейфа 3D на координатной сетке, с детальным распределением CO₂ и плотностей, определенных при помощи моделирования потока в коллекторе (последние были откалиброваны с данными сейсмического мониторинга), было рассмотрено четыре модели сценария: коллектор с низкой температурой с и без растворения CO₂ и коллектор с более высокой температурой с и без растворения. Отклик гравитационного поля был рассчитан для 2002 и 2005 гг. совместно с изменениями с 2002 по 2005 гг. (Таблица 1).

В зависимости от температуры и растворения, шлейф 2002 года продемонстрировал смоделированный отклик в диапазоне от -11 до -31 мГал, и шлейф 2005 года в диапазоне от -16 до -44 мГал. Сигнал самой большой амплитуды соответствует модели с самой высокой температурой (низкой плотностью CO₂) без растворения CO₂ и отображает предсказанное изменение максимума с 2002 по 2005 г. на величину -13 мГал. Напротив, модель с низкими температурами (высокой плотностью CO₂) с растворением CO₂ характеризуется предсказанным изменением с 2002 по 2005 гг. в диапазоне только -5 мГал.

В сентябре 2005 повторная гравиметрическая съемка была выполнена при содержании порядка 7.76 Мт CO₂ в шлейфе, с дополнительными 2.57 Мт по сравнению со съемкой 2002 г. Каждая станция посещалась, по меньшей мере дважды. В гравитационные измерения были введены поправки за приливы-отливы, инструментальную температуру наклон и дрейф. Погрешность данной съемки оценивается в 3.5 мГал. Гравиметрический сигнал при повторных наблюдениях, вызванный присутствием CO₂, был получен, путем вычитания смоделированных гравиметрических изменений на Sleipner East (глубинный газовый коллектор, из которого в настоящее время ведется добыча) из измеренных гравиметрических наблюдений за период с 2002 по 2005 (Рисунок 10).

В конце концов, было выполнено моделирование прямой задачи (Nooner et al., 2007) в целях оценки средней плотности CO₂ в естественном залегании. Наилучшее совпадение было получено для сейсмической модели с высокой температурой (Рисунок 11). Средняя плотность CO₂ оценивается как 530±65 кг м⁻³ (95% доверительный интервал), что согласуется с температурами коллектора, как показано выше.

Дальнейшие периодические наблюдения с периодом в несколько лет дадут гораздо большие изменения гравитационного поля, при этом плотность будет оценена с большей долей уверенности.

Выводы

Хранилище CO₂ на площади Sleipner было очень успешно за последнее десятилетие; не наблюдалось признаков миграции газа в породы, покрывающие коллектор. Объединение сейсмического мониторинга с гравиметрической съемкой с морского дна помогло ввести ограничения в гидродинамическую модель коллектора и узнать подробности поведения потока CO₂ в резервуаре.

	August 2002 (4.8 Mt)			August 2005 (7.4 Mt)			Signal change μGal
	CO ₂ density kg/m ³	CO ₂ dissolved %	Signal μGal	CO ₂ density kg/m ³	CO ₂ dissolved %	Signal μGal	
Горячо, не растворения	528	0%	-31.3	523	0%	-44.3	-13.7
Горячо, растворение	531	29%	-2.1	529	28%	-29.8	-8.8
Холодно, нет растворения	708	0%	-15.6	707	0%	-22.2	-6.7
Холодно, растворение	708	25%	-10.9	707	23%	-16.2	-5.4

Таблица 1 Результаты гравитационного отклика, полученного для экстремальных значений температур в пределах области неопределенности, как с учетом явления растворения CO₂, так и без него.



Благодарности

Мы благодарны консорциумам SACS и CO2STORE за разрешение на публикацию данной работы, а также оператором на лицензионной площади Sleipner, Statoil, ExxonMobil, Norsk Hydro, и Total за сотрудничество. SACS и CO2STORE финансируются программой ЕС Thermie, партнерами по индустрии Statoil, BP, ExxonMobil, Norsk Hydro, Total, и Vattenfall, и национальными правительствами, включая Британский Департамент по Торговле и Промышленности. Партнеры в области научных исследований являются BGR (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), BGS (Британская Геологическая Служба), BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), GEUS (Геологическая Служба Дании), IFP (Французский Институт Нефти), TNO (Голландская Национальная Геологическая Служба), Schlumberger, и SINTEF Petroleum Research. Мы также признательны Network of Excellence CO2GEONET, финансируемой ЕС, за финансовую поддержку. Andy Chadwick публикует работу с разрешения исполнительного директора BGS (NERC).

Литература

- Arts, R., Eiken, O., Chadwick, R.A., Zweigel, P., Van Der Meer, L., and Kirby, G.A. [2004a] Seismic monitoring at the Sleipner underground CO₂ storage site (North Sea). In: Baines, S. and Worden, R.J. (Eds.) *Geological Storage for CO₂ emissions reduction*. Geological Society, London, Special Publication 233, 181-191.
- Arts, R., Eiken, O., Chadwick, A., Zweigel, P., van der Meer, L., and Zinsner, B. [2004b] Monitoring of CO₂ injected at Sleipner using time-lapse seismic data. *Energy*, 29, 1383-1392.
- Baklid, A., Korbøl, R., and Owren, G. [1996] Sleipner Vest CO₂ disposal, CO₂ injection into a shallow underground aquifer. *SPE*, paper 36600.
- Chadwick, R.A., Arts, R., Eiken, O., Kirby, G.A., Lindeberg, E., and Zweigel, P. [2004] 4D seismic imaging of an injected CO₂ bubble at the Sleipner Field, central North Sea. In: Davies, R.J., Cartwright, J.A., Stewart, S.A., Lappin, M., and Underhill, J.R. (Eds.) *3-D Seismic Technology: Application to the Exploration of Sedimentary Basins*. Geological Society, London, Memoir 29, 305-314.
- Chadwick, R.A., Arts, R., and Eiken, O. [2005] 4D seismic quantification of a growing CO₂ plume at Sleipner, North Sea. In: Dore, A.G. and Vining, B. (Eds.) *Petroleum Geology: North West Europe and Global Perspectives — Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*. Geological Society, London, 1385-1399.
- Chadwick, R.A., Arts, R., Eiken, O., Williamson, P., and Williams, G. [2006a] Geophysical monitoring of the CO₂ plume at Sleipner, North Sea: an outline review. In: Lombardi, S., Altunia, L.K., and Beaubien, S.E. (Eds.) *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*. Springer, Dordrecht, NATO Science, IV Earth and Environmental Sciences Vol. 65, 303-314.
- Chadwick, R.A., Noy, D., Lindeberg, E., Arts, R., Eiken, O., and Williams, G. [2006b] Calibrating reservoir performance with time-lapse seismic monitoring and flow simulations of the Sleipner CO₂ plume. *8th International conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-8)*, Trondheim, Norway.
- Eiken, O., Brevik, I., Arts, R., Lindeberg, E., and Fagervik, K. [2000] Seismic monitoring of CO₂ injected into a marine aquifer. *70th SEG Annual Meeting*, paper RC-8.2.
- Gregersen, U., Michelsen, O., and Sørensen, J.C. [1997] Stratigraphy and facies distribution of the Utsira Formation and the Pliocene sequences in the northern North Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 14, 893-914.
- Harrington, J.F., Noy, D.J., Horseman, S.T., Birchall, D.J., and Chadwick, R.A. [2008] Laboratory study of gas and water flow in the Nordland Shale, Sleipner, North Sea. In: Grobe, M., Pashin, J., and Dodge, R. (Eds.) *Carbon Dioxide Sequestration in Geological Media*. AAPG Special Publication, in press.
- IPCC [2005] *Special Report on CO₂ Capture and Storage*. Cambridge University Press.
- Isaksen, D. and Tonstad, K. [1989] A revised Cretaceous and Tertiary litho stratigraphic nomenclature for the Norwegian North Sea. *Norwegian Petroleum Directorate Bulletin*, 5, Oljedirektoratet, Stavanger.
- Nooner, S.L., Eiken, O., Hermanrud, C., Sasagawa, G.S., Stenvold, T., and Zumbege, M.A. [2007] Constraints on the *in situ* density of CO₂ within the Utsira formation from time-lapse seafloor gravity measurements. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1, 198-214.
- Williamson, J.P., Chadwick, R.A., Rowley, W.J., and Eiken, O. [2001] Gravity monitoring of the CO₂ bubble at Sleipner. *British Geological Survey*, Commissioned Report CR/01/063.
- Zweigel, P., Arts, R., Lothe, A.E., and Lindeberg, E. [2004] Reservoir geology of the Utsira Formation at the first industrial-scale underground CO₂ storage site (Sleipner area, North Sea). In: Baines, S.J. and Worden, R.H. (Eds.) *Geological storage of CO₂*. Geological Society, London, Special Publication 233, 165-180.