

## CO<sub>2</sub>-обогащенный метан угольного пласта: демонстрационное исследование Kaniow. CO<sub>2</sub>-enhanced coalbed methane: the Kaniow demonstration study

Tjirk Benedictus,<sup>1</sup> \* Vincent Vandeweyer,<sup>1</sup> Pascal Winthaegen,<sup>1</sup> и Frank van Bergen<sup>1</sup>

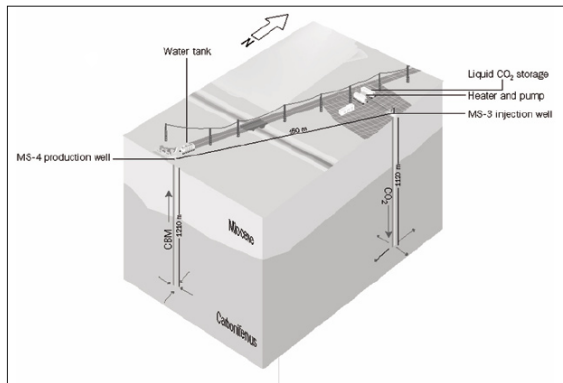
Кроме усилий, направленных на развитие и широкомасштабное применение энергии, обеспечивающей учёт будущих потребностей, общество все еще сильно зависит и будет зависеть в ближайшие десятилетия от ископаемого топлива. Проблема заключается в разработке технологических вариантов, которые позволят длительное использование ископаемого топлива без значительного выброса CO<sub>2</sub> (IEA, 2000) посредством экономически-целесообразного улавливания и хранения, и в то же время сохраняющих конкурентоспособность производителей на всемирном рынке. Подповерхностное хранение CO<sub>2</sub> в геологической среде могло бы преодолеть переходный период, необходимый для разработки источников энергии, обеспечивающих учёт будущих потребностей. Эта версия, включая демонстрационные проекты, в настоящее время исследуется и применяется во всем мире.

Здоровье, безопасность и окружающая среда (HSE), уменьшение выброса CO<sub>2</sub> и экономически-целесообразные решения являются главными факторами, определяющими технические возможности хранения CO<sub>2</sub>. Относительно экономической целесообразности существует интерес в утилизации закачанного CO<sub>2</sub> для рентабельных целей. Следовательно, могут быть рассмотрены две ситуации, а именно, хранение CO<sub>2</sub> без энергетической прибыли (в водоносных горизонтах и выработанных газовых резервуарах) и хранение CO<sub>2</sub> с энергетической прибылью (усиленное извлечение нефти, EOR) в нефтяных и газовых резервуарах (усиленное извлечение газа, EGR) и в угольных пластах (обогащенный метан угольного пласта, ECBM).

### CO<sub>2</sub>-обогащенный метан угольного пласта

Концепция CO<sub>2</sub>-ECBM была разработана при добыче метана угольных пластов US (CBM). Используя те же самые принципы CO<sub>2</sub>-EOR, было применено закачивание CO<sub>2</sub> в подповерхностные угольные пропласты для интенсификации производства метана (рис. 1). Этот тип процесса хранения может быть экономически конкурентен благодаря преимуществу более совершенного извлечения CBM и уменьшению времени производства. Подповерхностное хранение CO<sub>2</sub>, дающее дополнительную выгоду, CO<sub>2</sub>-ECBM могут также в результате дать более чистую энергетическую продукцию.

Производительные скорости CBM и полное извлечение регулируются подповерхностными процессами перенесения и адсорбции/десорбции CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> на поверхности угля. Обычная оценка перспективы заключается в том, что CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> предпочтительно адсорбируют и десорбируют на углях соответственно, которые будут увеличивать замену CH<sub>4</sub> на CO<sub>2</sub> на углях и минимизируют риск будущего высвобождения (выброса, утечки) CO<sub>2</sub>. Многие лабораторные эксперименты были направлены на определение отношений замены CO<sub>2</sub> в зависимости от CH<sub>4</sub> на угле, показывая отношения, меняющиеся от 1.2:1 до 6.3:1 или даже выше.



**Рисунок 1** Типичное (мелкомасштабное) расположение установки проекта CO<sub>2</sub>-ECBM, изображающее демонстрационную установку Kaniow, показывающее скважину закачивания CO<sub>2</sub>, скважину по добыче газа и наземные объекты.

Результаты, как правило, увеличиваются с уменьшением степени метаморфизма угля и увеличением давления, отражая переход CO<sub>2</sub> в сверхкритическое состояние на глубинах ниже приблизительно 800 м (например Wolf et al., 1999; Van Bergen et al., 2000; Krooss et al., 2002; Burruss, 2003; Pashin et al., 2004). Однако, последняя экспериментальная работа Busch et al. (2006) указывает, что при определенных условиях адсорбция CH<sub>4</sub> пользуется предпочтением и поэтому ECBM-благоприятные условия должны существенно различаться между угольными бассейнами. Моделирование молекулярного характера изменения CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и смесей вследствие этого в угольных пластах предназначено для лучшего понимания процессов адсорбции и десорбции. Тем не менее, принимая во внимание грандиозные источники угля во всем мире, подповерхностное хранение CO<sub>2</sub> закачиванием его в угольные пласты может быть реальным (IEA, 1998; Van Bergen et al., 2000).

Главное преимущество этой технологии заключается в потенциальном использовании угольных пропластов, традиционная добыча каменного угля которых экономически неэффективна из-за их глубины залегания, расположения или ограниченной мощности. Это предполагает, что в богатых углем областях могут быть развернуты мощные комбинаты с общим выбросом CO<sub>2</sub> на каждом из них намного более низким, или даже нулевым по сравнению с традиционными угольными комбинатами (IEA, 1998). Хотя добыча угля из этих пропластов в случае будущих технологических или экономических разработок не должна препятствовать закачиванию CO<sub>2</sub>, термин «неразрабатываемый угольный пропласт» мог бы расцениваться только как показатель выбора ECBM, а не как результативное функционирование. Не учитывая это, следовательно, ECBM совместно с хранением CO<sub>2</sub> может быть пригодно как обезвреживание угля. Однако, хотя CO<sub>2</sub>-ECBM предоставляет чистый энергетический источник по сравнению с обычным CBM, предполагаемая будущая разработка и эксплуатация пропластов может иметь в результате относительно высокую эмиссию CO<sub>2</sub>.

<sup>1</sup> TNO, P.O. Box 80015, 3508 TA Utrecht, The Netherlands.

\* Corresponding author: Tjirk Benedictus, E-mail: tjirk.benedictus@tno.nl.

2008 EAGE www.firstbreak.org

CO<sub>2</sub> секвестрация

В странах, где имеются громадные запасы угля (например, США, Китай, Индия, Австралия, Южная Африка), могут быть благоприятно широкомасштабное развитие CO<sub>2</sub>-ECBM. Однако, следует отметить, что для Европы, за некоторым исключением, хранение CO<sub>2</sub> в угольных пластах следовало бы рассматривать как привлекающий внимание незанятый сектор рынка, если принять во внимание количество удовлетворяющего требованиям угля и соответствующий объем хранилищ.

**Демонстрационный проект в Kaniow**

Хранение в угольных пропластах и одновременная добыча газа из угольных пластов в Европе продемонстрированы в Верхнее-Силезском бассейне в Польше в рамках проекта ЕС RECO<sub>2</sub>POL (рис. 2). Основная цель проекта, введенного в 2001 г. и совместно финансируемого Комиссией Европейского союза, заключалась в демонстрации того, что закачивание CO<sub>2</sub> в угольный пласт обоснованно в условиях Европы. Силезский бассейн был выбран как самый лучший в Европе район для применения технологии хранения CO<sub>2</sub> в угольном пласте (IEA, 1998; Van Bergen et al., 2006). Суммарная мощность угольных пластов в Силезском бассейне в среднем составляет 40 м, а средняя дополнительная мощность около 11 м. Перспективные глубины залегания угольных пластов варьируют от 1000 до 1100 м. Замеренная проницаемость относительно низкая, т. е. 0.4-1.5 mD для целевых верхних пластов (Van Bergen et al., 2006). Класс углей главным образом высоко энергозависимый, А жирный, с средним содержанием газа приблизительно 10 м<sup>3</sup>/тон (IEA, 1998). Лабораторные эксперименты показывают, что объем адсорбции угля для CO<sub>2</sub> 30 м<sup>3</sup>/тон или более. Предполагается, что герметичные аргиллиты третичной системы предотвращают дополнительный выброс CO<sub>2</sub>, не удержанного в угольных пропластах от протечки к поверхности.

В 2003 г. на расстоянии 150 м от существующей эксплуатационной скважины СВМ была пробурена скважина для закачивания до глубины 1200 м. После предварительных работ по закачиванию с водой и создания производственной базы без закачивания CO<sub>2</sub>, раствор CO<sub>2</sub> из промышленного источника был закачан с августа 2004 г. Необходимое давление для закачивания было больше предполагаемого, и, хотя давление было повышенным, не было достигнуто непрерывного закачивания. Проницаемость угольных пропластов равномерно уменьшалась со временем из-за набухания угольного пласта после контакта с CO<sub>2</sub>. Подобные эффекты наблюдались в США и Канаде (Van der Meer and Fokker, 2003; Reeves, 2003; Reeves et al., 2003).

В конечном счете после гидравлической трещиноватости резервуара в апреле 2005 г., было непрерывно закачено приблизительно 12-15 тон/день CO<sub>2</sub> до июня 2005 г. (рис. 3). В целом было закачено приблизительно 760 тонн CO<sub>2</sub>. В результате закачивания CO<sub>2</sub> существенно увеличилась добыча газа (рис. 3). Хотя концентрация CO<sub>2</sub> в добываемом газе увеличилась, общее количество закаченного CO<sub>2</sub> гораздо выше, показывая чистую фракцию закаченного CO<sub>2</sub> приблизительно в 91%, что рассмотрено как свидетельство исключительно важного достижения. В течение всего процесса были зарегистрированы и оценены данные давления и температуры в устье и забое скважины. Измерения давления в резервуаре около эксплуатационной скважины отметили слабое увеличение и последующее падение его до первоначального уровня равновесия, что предполагает адсорбцию CO<sub>2</sub> в пласте угля. Однако, поскольку скорость диффузии низкая, это показывает, что требуется значительное время для диффузии газов в и за пределы угольных пластов. После непрерывного закачивания, прекратившегося в июне 2005 г., производительность медленно уменьшалась.

Проект RECO<sub>2</sub>POL, отчетливо показывающий возможности CO<sub>2</sub>-ECBM завершен в 2005 г. Впоследствии эксплуатационная скважина была ликвидирована. Последующий проект ЕС MOVECBM начался в ноябре 2006 г. Этот проект нацелен на мониторинг и исследование хранилища CO<sub>2</sub> в Kaniow для улучшения понимания закачивания CO<sub>2</sub> в угольный пласт и миграцию метана, чтобы гарантировать долговременную сохранность и надежное хранение. В марте 2007 г. скважина закачивания была использована для добычи газа из угольных пропластов. Состав этого газа постоянно контролировался, чтобы определить действительную адсорбцию CO<sub>2</sub> в угольных пропластах. Результаты показывают, что добыча очень низкая и добываемый газ содержит 40-60% CH<sub>4</sub> и 60-40% CO<sub>2</sub>. Эти наблюдения не могут быть объяснены непосредственно по характеру адсорбции, оцененному содержанию газа в угольном пласте и давлению в резервуаре. Тем не менее, низкая производительность может быть показателем изоляции CO<sub>2</sub> в угольных пропластах. Необходимо дальнейшее исследование, чтобы продвинуть наше понимание процесса адсорбции и разбухания угольных пластов на месте их залегания.

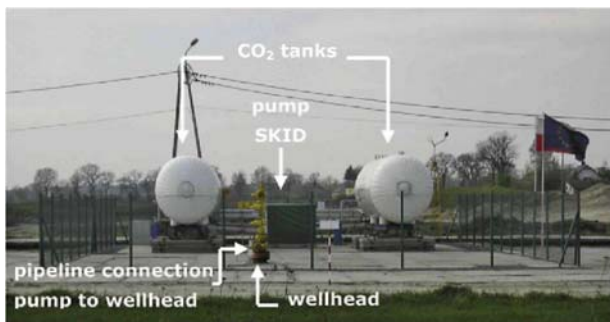


Рисунок 2 Конфигурация установки (А) и расположение (В) демонстрационного проекта CO<sub>2</sub>-ECBM в Kaniow, Польша.

CO<sub>2</sub> секвестрация

## Мониторинг миграции на Kaniow

Программа мониторинга на Kaniow создана на основании анализа характеристик, явлений, сценария процессов (FER) (описанных Kneft et al., 2007) и нацелена на выявление возможной миграции CO<sub>2</sub> в выше залегающие геологические формации и к поверхности. Методики мониторинга фокусируются на различных объектах системы хранения (Winthagen et al., 2005):

1. Система резервуара, содержащая резервуар и его герметизирующие формации.
2. Фоновая система, определенная другими компонентами кроме поверхности и резервуара. Она включает формации перекрывающих пород, нарушения и скважины.
3. Поверхностная (близ-) система, состоящая из неконсолидированных почв, гидросферы и атмосферы.

Большинство методов мониторинга требует относительных характеристик, представляющих состояние до закачивания CO<sub>2</sub>, для оценки возможных изменений, обусловленных закачиванием CO<sub>2</sub>. Более того, важно охарактеризовать хранящийся CO<sub>2</sub>, например по изотопному анализу, чтобы определить происхождение выявленного CO<sub>2</sub>. В следующих разделах описаны применяющиеся методы мониторинга для различных объектов системы хранения.

## Мониторинг системы резервуара

Мониторинг системы резервуара сфокусирован на осуществлении контроля эффективной изоляции закачанного CO<sub>2</sub> в глинистые пропласты и на состоянии герметизации и самого резервуара.

До закачивания был проанализирован буровой керн и обломки выбуренной породы и выполнен геофизический каротаж, чтобы установить первоначальное, до закачивания, состояние пород. Были определены такие свойства, как удельное сопротивление, радиоактивность и проницаемость. Чтобы оценить влияние CO<sub>2</sub> на герметизирующие и резервуарные формации, запланирован повторный геофизический каротаж в конце производственного периода для сопоставления с данными до закачивания.

Была основательно исследована и отслежена приёмистость резервуара. Вместе с анализом состава и изотопным анализом закаченного и добываемого газа, измерениями температуры и давления установлен и отслежен режим резервуара и величина смеси и/или адсорбции CO<sub>2</sub>.

Были выбраны геофизические методики для представления CO<sub>2</sub> в резервуаре. Организовали временные сейсмические съемки для определения любых изменений геофизических свойств геологических формаций. Для исследования глубины и характеристик угольных пропластов и перекрывающих пород, применены различные сейсмические съемки, а именно, пассивная и активная (частично многокомпонентная) высокоразрешающая наземная сейсмика (HRS), а также межскважинная сейсмика. Были использованы скоростные и плотностные модели для моделирования текущих скважин, VSR и высокоразрешающая наземная сейсмика (Pagnier et al., 2006), чтобы оптимизировать полученные параметры и способствовать сейсмической интерпретации.

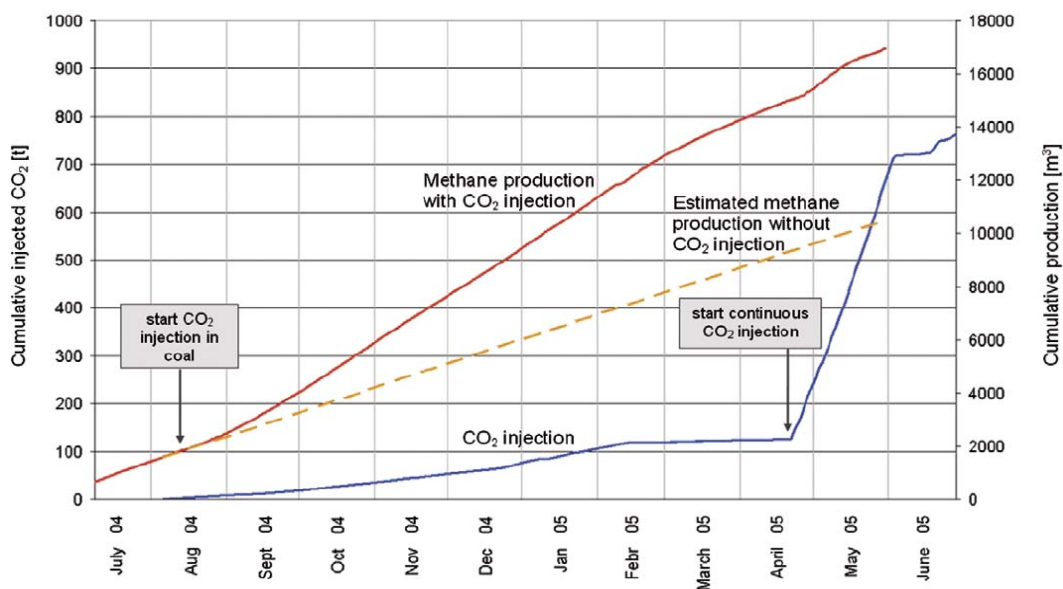


Рисунок 3 Суммарное количество добываемого метана и закачанного газа в течение проекта RECOPOL, отчетливо показывающие влияние закачивания газа на добычу газа по сравнению с проектной базовой линией (Van Bergen et al., 2006).

Данные межскважинной сейсмики были получены в 2005 г. до закачивания CO<sub>2</sub>. Пример полученной сейсмограммы приведен на рис. 4. Отражающая граница на глубине 1000 м, подтвержденная скважинным каротажем, совпадает с кровлей угольного слоя. После закачивания CO<sub>2</sub> предполагались изменения времени пробега и амплитуды. Однако, предполагаемые изменения, которые не обнаружены на основании отношения сигнала к шуму при базовой съемке, не обнаружены и по повторной съемке.

Из-за проблем с получением разрешения не получены исходные данные съемки HRS до закачивания. Поэтому через год после того, как закачивание CO<sub>2</sub> прекратилось, выполнена альтернативная HRS съемка базовой линии (частично многокомпонентная). Через семь месяцев после базовой была проведена повторная съемка HRS во время добычи газа из целевых угольных пропластов. Обе съемки были сфокусированы на области около скважины в 0.8 сек, где ожидалась большая часть изменений (рис. 5). До сих пор не наблюдалось изменений, которые могли бы быть обнаружены, однако, продолжается дальнейшая обработка, чтобы улучшить отношение сигнала к шуму.

Отдельно от активного сейсмического мониторинга была развернута многокомпонентная пассивная наземная сейсмика, которая нацелена на отображение подповерхностных горизонтов посредством вибраций как результата активности микротрещин около угольных пропластов. Система сбора данных связана со спутниковыми линиями связи и дистанционно контролируется через Интернет. Хотя предварительные результаты показывают когерентные сигналы, фокусирующиеся около продуктивных глубин, связь с добычей газа еще не подтверждена.

#### Мониторинг фоновой системы

Аналогично мониторингу резервуара, был использован геофизический каротаж для установления условий фоновой системы до закачивания.

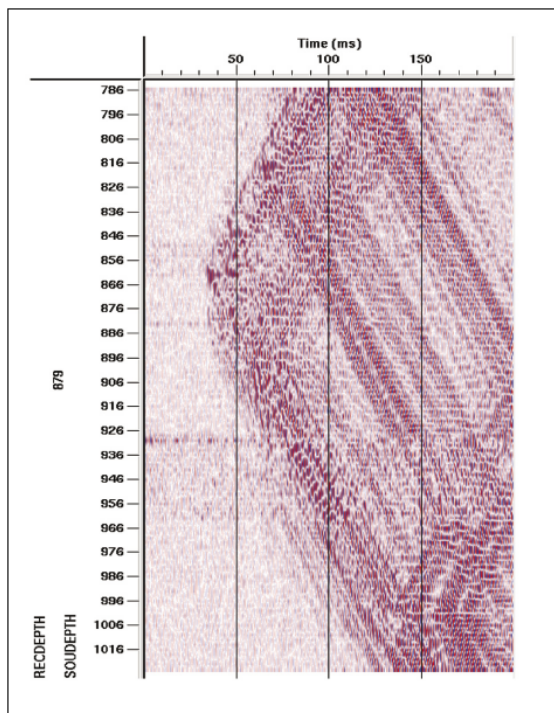


Рисунок 4 Необработанная сейсмограмма, полученная по межскважинной сейсмике.

В конце периода добычи может быть проведен еще раз геофизический каротаж и сопоставлен с данными до закачивания, чтобы оценить возможное ухудшение скважинной системы в результате закачивания CO<sub>2</sub>. Особое внимание будет уделено временному каротажу цементных креплений и обсадных труб.

Давление обсадных труб и покрышки и температуры в устье скважины регистрировались в течение стадии закачивания и этапа производства, чтобы проконтролировать возможную миграцию CO<sub>2</sub> вдоль скважины. Эти данные также вводятся в моделирование резервуара для сопоставления и предсказания будущего поведения.

#### Мониторинг наземной системы

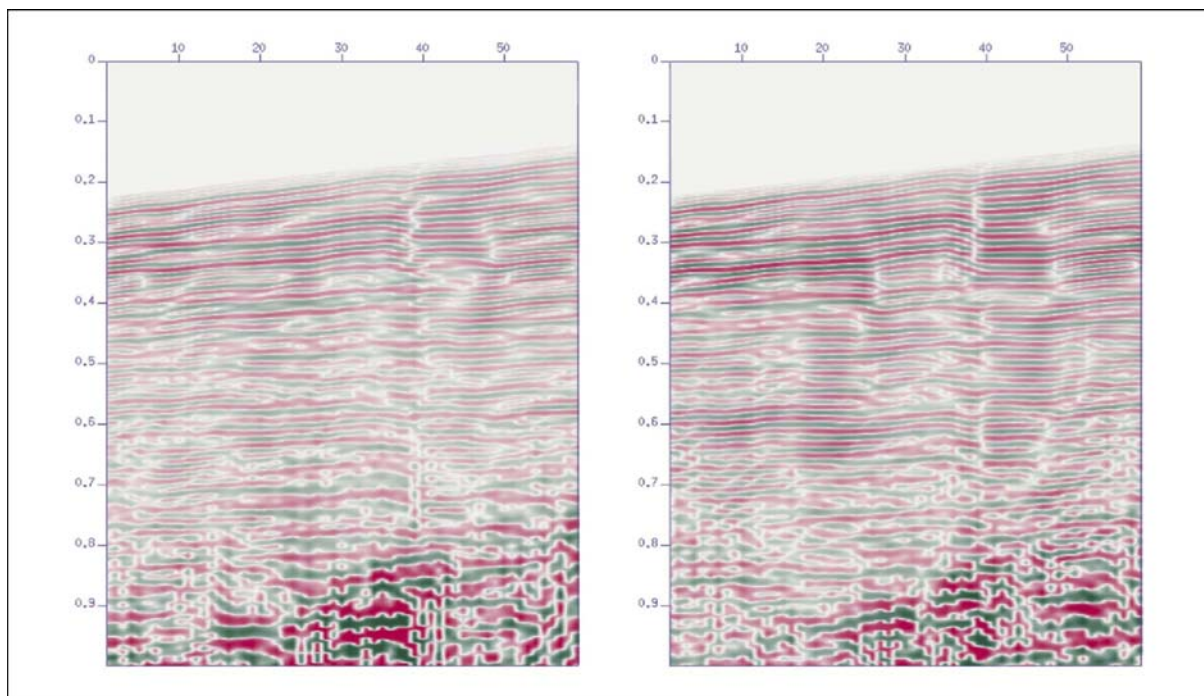
Был произведен мониторинг концентрации CO<sub>2</sub> и потока в почве, поскольку повышенные значения могут указывать на миграцию CO<sub>2</sub> в почву и атмосферу. С этой целью в области около скважины закачивания CO<sub>2</sub> были измерены потоки и были установлены инфракрасные датчики CO<sub>2</sub> на глубине 2 м. Непрерывные измерения концентрации CO<sub>2</sub> с 2004 г. дали в результате профили фоновых характеристик состояния до закачивания, показывающие латеральную вариацию концентрации CO<sub>2</sub>, которая может быть отчасти отнесена к вариациям типа почвы и растительного покрова. Дополнительно изотопный анализ почвенных газов показал, что эти вариации могут быть также обусловлены влиянием потоков тяжелого воздуха, связанных с горными выработками на находящемся вблизи гравийном карьере. Изотопные оценки относительно стабильны по времени. Наблюдаемые временные вариации обусловлены круглосуточными циклами, сезонными эффектами и погодными условиями (т. е. атмосферное давление, дождь т.п.). В любом случае не существует признаков, что закачанный CO<sub>2</sub> мигрировал к поверхности.

#### Выводы

Демонстрационный проект RECO<sub>2</sub>POL CO<sub>2</sub>-ЕСВМ отчетливо показал возможность этой технологии в европейских условиях. Как часть продолжающегося последующего проекта MOVECBM, выполнен мониторинг для улучшения понимания хранения CO<sub>2</sub> в угольных слоях, чтобы оценить потенциальное здоровье человека, безопасность и проблемы окружающей среды и контролировать изоляцию закачанного CO<sub>2</sub> в предназначенных угольных слоях. Программа мониторинга направлена на подповерхностные горизонты, поверхность земли и скважины. Результаты мониторинга, например, по почвенному газу, составу добываемого газа и воды, межскважинным сейсмическим данным и изотопному признаковому анализу будут способствовать развитию подповерхностной модели, которая прогнозирует долговременный режим хранения CO<sub>2</sub> и угольных пластов после ликвидации месторождения. Данные обеспечивают факты для поддержки концепции эффективной изоляции CO<sub>2</sub> в угольных пластах.

#### Благодарности

Эта работа является частью проектов RECO<sub>2</sub>POL и MOVECBM. Авторы благодарят всех партнеров за ценное сотрудничество.



**Рисунок 5** F-k фильтрованные записи взрывов при съемках HRS, левая картинка – съемка базовой линии, а правая – повторная съемка во время добычи газа. Угольный резервуар расположен приблизительно на 0.8 с TWT. (Высокоамплитудные оси синфазности в нижнем правом углу заглушают поверхностную волну).

Проект RECO<sub>2</sub>POL финансирует ЕС (ENK-CT-2001-00539). Благодарим Shell International, JCoal, the Federal Region of Wallonie (через Faculte Polytechnique de Mons), и правительства Польши и Голландии (через Novem) за поддержку.

Проект MOVECBM фондирует ЕС (38967). Благодарим Electrabel, Carbosulcis, and Veolia Environment за поддержку.

#### Литература

- Burruss, R.C. [2003] CO<sub>2</sub> Adsorption in Coals as a Function of Rank and Composition: A Task in USGS Research on Geologic Sequestration of CO<sub>2</sub>. *Second International Forum on Geologic Sequestration of CO<sub>2</sub> in Deep, Unmineable Coalseams (Coal-Seq II)*, Washington DC. www.coal-seq.com (accessed April 2007).
- Busch, A., Gensterblum, Y., Kroos, B.M., and Siemons, N. [2006] Investigation of high-pressure selective adsorption/desorption behaviour of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> on coals: An experimental study. *International Journal of Coal Geology*, 66, 53-68.
- International Energy Agency (IEA) [1998] Enhanced Coal Bed Methane Recovery with CO<sub>2</sub> sequestration. *Report Number PH3/3*.
- Kreft, E. et al. [2007] The Schweinrich structure, a potential site for industrial scale CO<sub>2</sub> storage and a test case for a safety assessment in Germany. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 1, 69-74.
- Kroos, B.M., Gensterblum, Y., Siemons, N., and Prinz, D. [2002] Adsorption of Methane, Carbon dioxide and mixtures on dry and moist Carboniferous coals of different rank. *RWTH Aachen report*.
- Pagnier, H. et al. [2006] In: Van Bergen, E (Ed.) *RECO<sub>2</sub>POL (Reduction of CO<sub>2</sub> Emission by Means of CO<sub>2</sub> Storage in Coal Seams in the Silesian Coal Basin of Poland)*. Final Report.
- Pashin, J.C., Carroll, R.E., Groshong, R.H., Jr., Raymond, D.E., McIntyre, M.R., and Payton, J.W. [2004] Geologic screening criteria for sequestration of CO<sub>2</sub> in coal: quantifying potential of the Black Warrior coalbed methane fairway. Alabama. Final Technical Report, US Department of Energy, National Technology Laboratory (Washington), contract DE-FC26-00NT40927.
- Reeves, S. [2003] Coal-Seq project update: Field studies of ECBM recovery/ CO<sub>2</sub> sequestration in coal seams. In Gale, J. and Kaya Y. (Eds.). *Proceedings of the Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-6)*. Pergamon Press, Vol. II, Kyoto (Japan), 557-562.
- Reeves, S., Taillefert, A., Pekot, L., and Clarkson, C. [2003] The Allison Unit CO<sub>2</sub> - ECBM Pilot: A Reservoir Modeling Study. *DOE Topical Report*.
- Van Bergen, E., Pagnier, H.J.M., Kroos, B.M., and Van der Meer, L.G.H. [2000] CO<sub>2</sub>-sequestration in the Netherlands: inventory of the potential for the combination of subsurface carbon dioxide disposal with enhanced coalbed methane production. *Proceedings of the 5th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, Cairns, Queensland, Australia.
- Van Bergen, E., Pagnier, H.J.M., and Krzystolik, P. [2006] Field experiment of enhanced coalbed methane-CO<sub>2</sub> in the upper Silesian basin of Poland. *Environmental Geosciences*, 13 (3).
- Van der Meer, B. and Fokker, P. [2003] The injectivity of coalbed CO<sub>2</sub> injection wells. *International Coalbed Methane Symposium*, Tuscaloosa, Alabama (USA), paper 0319.
- Winthagen, P., Arts, R., and Schroot, B. [2005] Monitoring subsurface CO<sub>2</sub> storage. *IFP Oil and Gas Technology Review*, 60 (3), 573-582.