

Много-дисциплинарные науки о

Мониторинг инфильтрации воды в песчаные коллектора: Земле совершенствование интерпретации с помощью направленного падения и спектрального разложения

Monitoring of water infiltration in a reservoir sand: improving interpretation with dip steering and spectral decomposition

Paul de Beukelaar* и **Marine Seignole** из компании **SoleGeo**, расположенной в Париже, обсуждают научные эксперименты повторных измерений с **RADAR** для мониторинга инфильтрации в коллектор, которая может иметь много приложений для определений параметров резервуара.

Эта статья представляет собой доработанную версию доклада об обнаружении объектов с задержкой по времени, или мониторинга, представленного впервые на Европейской Конференции по Экологической и Инженерной геофизике в Голландии в Утрехте, 10 сентября 2004 г.

Здесь мы представляем последние результаты интерпретации 3D и 4D. Эти повторные измерения (4D) содержат геофизическую интерпретацию нескольких 3D съемок, проведенных в разное время. Мы считаем, что работа будет интересна для интерпретаторов сейсмоки и вообще ученых, вовлеченных в процесс определения параметров резервуара, несмотря на то, что данные были получены по методике RADAR для малоглубинных задач. Было доказано, что этот подход является отличной иллюстрацией мощных технологий интерпретации данных, таких как направленное падение (Tingdal, 2003, Meldahl et al., 2002) и спектральный анализ (Partyka et al., 1999).

Часть этого научного эксперимента, посвященная динамике, включает в себя инфильтрацию воды в песчаный коллектор с целью усиления проникновения в различные песчаные коллектора. Первый удачный результат был получен с данными, с Cernay-la-Ville около Rambouillet, Франция. Использование мощных методов направленного падения и спектрального разложения в интерпретации данных привело к лучшему пониманию распространения фронта воды в зависимости от петрофизических свойств песчаных коллекторов.

Методика наблюдений

Мониторинг инфильтрации соленой воды в верхней части ненасыщенной почвы обычно проводится классическими электрическими методами, например, установками Веннера и Шлюмберже (Suski et al., 2003). Прямые измерения сопротивления проводятся до и после инфильтрации соленой воды. При съемке, описанной здесь, получались кубы разнесенных по времени 3D данных. Наблюдения проводились по методике RADAR (Radio Detection and Ranging), в частности, георадаром (GPR). Этот безопасный метод позволяет проводить работы маломасштабные работы на разных промежутках времени. Также возможно проводить повторные измерения за малую часть тех средств, что обычно нужно затратить для сейсмической съемки.

Согласитесь, что в результате получаются профили, похожие на сейсмоки MOB. Возбуждается короткий электромагнитный импульс с частотным диапазоном 10 МГц-ГГц. При этом могут наблюдаться различные волны: воздушная волна с наибольшей скоростью (скорость распространения электромагнитных волн в воздухе максимальна из всех геологических материалов). Эта волна порождает отраженные и рефрагированные волны при контрасте импеданса почвы. Прямые и отраженные волны (полезные и кратные) похожи на сейсмические волны. Так же, как и для сейсмических данных, возможно определить импеданс слоев и коэффициенты отражения. С некоторыми допущениями, к данным GPR можно применять те же методики обработки, что и для сейсмических данных. Существует некоторая разница, например, точное положение нулевой отметки по времени, что соответствует поверхности земли, очень важно для интерпретации данных GPR, так как сейсмический сигнал напрямую связан с землей. Это значение необязательно является фиксированной величиной. Оно зависит от антенны, ее положения над поверхностью, и свойств среды (Yelf, 2004). Наш научный подход приводит к объединению инженерной и нефтяной геофизики (de Beukelaar et al., 2004, Knight et al., 1997, Mari et al., 1999). Другие интересные приложения включают инверсию данных большого количества профилей GPR (Saintenoy and Tarantola, 2001).

Эксперимент

Геометрия наблюдений

Для создания динамической системы были разработаны геометрия наблюдений и устройство для инфильтрации воды (рис. 1 и 2). В почве была пробурена скважина под углом 48° длиной 1 м. Далее была вставлена пластмассовая трубка диаметром 3 см и длиной 1 м. Глубина трубы известна на всем интервале кросс-лайна 12. Более того, была изучена скорость. Значит, значения двойного времени пробега тоже известны.

Устройство для инфильтрации

В пластмассовую трубку была вставлена система для инъекции, всего 5 литров воды было инфильтровано

*SoleGeo, Geoscience Consultancy Services, 28 rue des Tartres, 92500 Rueil-Malmaison, France; Tel: +33 147 520 598.

Много-дисциплинарные науки о Земле

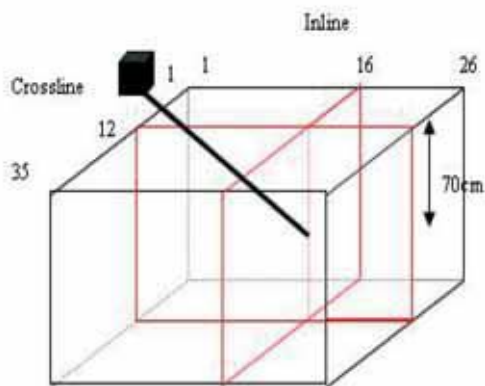


Рисунок 1 Объемное изображение геометрии.

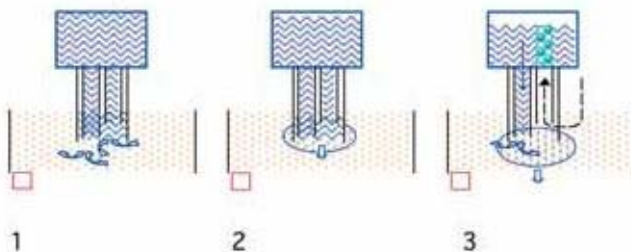


Рисунок 2 Устройство для инфильтрации воды.

за приблизительно полтора часа. Схематическое изображение устройства для инъекции дано на рис. 2.

Оно состоит из герметично закрытой емкости с водой и двух гибких труб (одна короче другой) для инъекции воды. Это специальное устройство было разработано так, чтобы можно контролировать скорость потока и предотвратить утечку воды из стенок трубок. Можно выделить три стадии:

- Инфильтрация воды в песок. Поток воды останавливается при заполнении нижнего предела двух трубок, когда гидравлическое давление ниже определенного уровня.
- Насыщение ведет к изменению давления в поровом пространстве песка (P возрастает). Пузырёк воздуха увеличивается из-за гравитации и капиллярных сил до достижения равновесия.
- Когда труба с открытым концом больше не окружена насыщенным песком, происходит замещение воздухом, который изменяет давление в емкости. Этот феномен ведет к увеличению градиента давления и усилению инфильтрации потока до достижения состояния равновесия (стадия 2).

Съемка и обработка

Поверхность наблюдений примерно 1 м длиной и 75 см толщиной. Съемка проводилась вдоль профилей (26 линий) на расстоянии 3 см. Параметры наблюдений были следующими:

- Частота антенны: 800 МГц
- Частота дискретизации: 12671 МГц
- Количество отсчетов: 512
- Временное окно: 40 нс

Было проведено три 3D съемки в разное время – перед инфильтрацией в 11.40, в 12.50 (после инъекции примерно 1 л); и в конце манипуляций (после инфильтрации оставшихся 4 литров) в 13.40.

Для облегчения и ускорения проведения 3D съемки лишь за 15 минут, были проведены наблюдения полной кратности для нормального падения. Расстояние между приемниками изменялось лишь в нескольких экспериментах для определения скорости распространения. Тем не менее, из-за длительности съемки, данные не отражают мгновенное количество воды в почве.

Базовый пакет обработки сейсмике Seismic Unix запускался на платформе Linux. Для обработки трасс данных георадара были созданы скрипты. В скриптах заложены функция усиления, различные фильтры, мьютинг для подавления прямой воздушной волны и конвертирование в специальный формат SEG для чтения в системе OpendTect (dGB).

Анализ данных

Данные были подвергнуты различным типам анализа. Традиционная интерпретация была проведена по кубу 3D пикировкой видимых гиперболических волн. Этот метод определил предварительные объекты или возможные границы. Направленное падение – это мощная методика атрибутного анализа для улучшения обнаружения объектов. Куб был посчитан в OpendTect, используя 3D Фурье анализ в скользящем окне. Размер окна влияет на точность расчетов: чем больше окно, тем лучше точность расчетов. Тем не менее, это отражает лишь общий угол или тренд азимута. Атрибут 'Dip' представляет собой продольный угол в сек/м. Атрибут 'Azimuth' показывает азимут угла в градусах от -180° до $+180^\circ$. Положительный азимут отсчитывается от линии наблюдений в направлении увеличения номеров поперечных профилей.

Спектральное разложение было хорошим способом сейсмической интерпретации и оценки толщины. Свойства извлекались из части серии отражений с помощью математических преобразований – ДПФ в коротком окне и Непрерывного Вейвлет-Преобразования.

Рисунок 3 показывает результаты трех съемок: до инфильтрации, после инъекции 1 л и в конце манипуляций. Первые пять наносекунд сигнала были обрезаны для подавления прямой воздушной волны, которая замаскирует весь остальной сигнал из-за высокой амплитуды.

На профиле 16 куба, снятого в 12.50, были пропикированы гиперболические волны (рис. 4 а). Тем не менее, всегда можно сделать несколько версий интерпретации.

Дальнейший расчет атрибута Dip проводится без изменения гиперболических волн. Становится легче сделать выбор для интерпретации.

Много-дисциплинарные науки о Земле

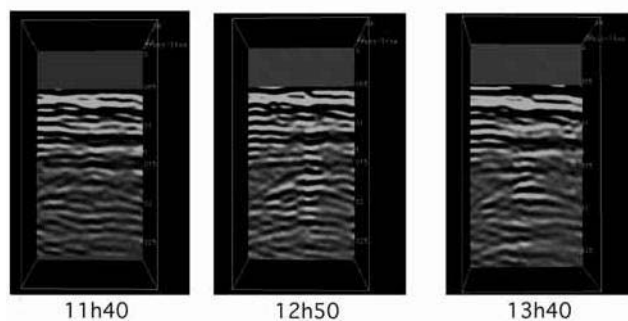
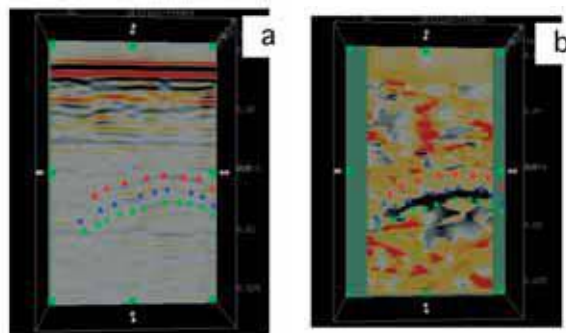


Рисунок 3 Сравнение данных инлайна 16 в хронологическом порядке съемки.



Рисунки 4 Несколько возможных пиковок гиперболы для а) обработанных данных GPR, б) после расчета углового атрибута.

Синяя гипербола отвечает явной волне на изображении атрибута Dip (рис. 4б).

Для данных георадара, вершина располагается на инлайн 12, кросслайн 11 и 16 нс двойного времени пробега. Для этого инлайна теоретическая глубина трубы эквивалентна 8.3 нс. Двойное время пробега известно, так как мы знаем геометрию и провели изучение скоростей. Вершина для атрибута Dip находится на инлайн 13, кросслайн 14 и 16.5 нс двойного времени пробега. Для этой инлайн теоретическая глубина эквивалентна 8.7 нс. Теоретические и оцененные значения для двух наборов данных очень близки.

Основание трубы расположено на инлайне 16, примерно на времени 20 нс. Значит, эти гиперболы не соответствуют концу трубы, а скорее связаны с уровнем воды в трубе. Вершину водного пузыря можно обнаружить на расстоянии примерно 20 см от конца трубы.

Благодаря атрибуту мы можем точно определить положение самой трубы (см. рис. 6). Мы можем выделить черную зону рядом с концом трубы: это должен быть водный пузырь, появившийся после инъекции 1 л воды. Объем этого пузыря оценен в 0.00648 м³, и рассчитанная пористость песка составляет 16% по следующей формуле:

$$\omega = V_{\text{water injected}} / V_{\text{bubble, assuming a water saturated sand.}}$$

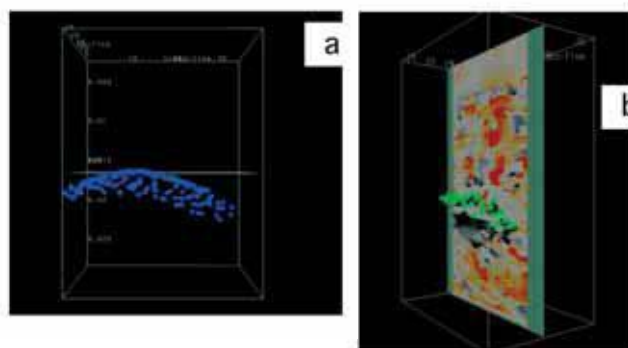


Рисунок 5 Пропикированные гиперболы по (а) данным GPR (б) после расчета атрибута Dip. С помощью этого подхода к интерпретации на двух наборах данных, теперь гиперболы могут быть пропикированы на всех профилях.

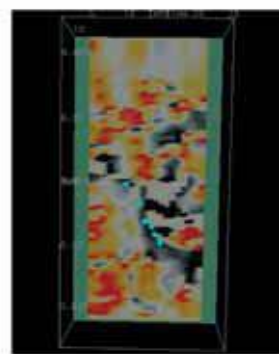


Рисунок 6 Пикировка положения трубы на кросслайне 12.

Вода должна быть в песке до инфильтрации (межпоровая вода), так как известно, что пористость песка составляет 20-30%.

Куб данных, полученный в 13.40, был подвергнут анализу с помощью атрибута падения. Трубу для инфильтрации так же можно выделить и в этих данных по описанной выше методике. Мы можем выделить черную область на конце трубы, она больше, чем в кубе данных от 12.40 на рис. 6.

Объем пузыря оценен в 0.02333 м³. К сожалению, мы не можем выделить этот пузырь на всех инлайн профилях, следовательно, объем недооценен. Расчетная пористость песка составляет 21.43 %.

Анализ с помощью спектрального разложения

Георадар – это высокочастотный метод с антенной 800 Мгц. Приведенные результаты (рис. 8 а и б) изображают временной срез куба данных от 13.40 на 20 нс после спектрального разложения на частоте 6000 Гц.

Можно четко выделить два типа записи: на конце трубы и можно выделить особую черную зону, обычно говорящую о водном насыщении. 'Ореол' вокруг трубы также можно пропикировать на различных временных срезах: он должен отвечать крайней границе водного пузыря (рис. 8 а и б).

Много-дисциплинарные науки о Земле

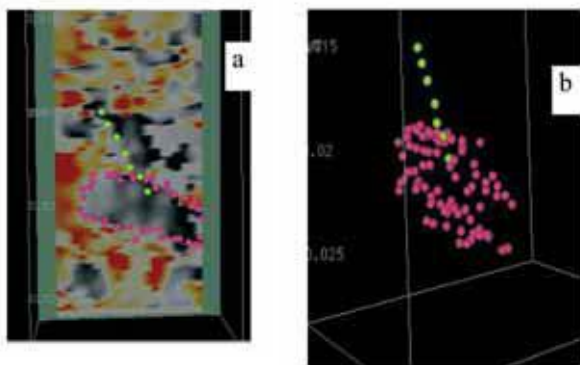


Рисунок 7 Интерпретированный водный пузырь и труба а) для кросслайна 12, б) в 3D виде после удаления данных.

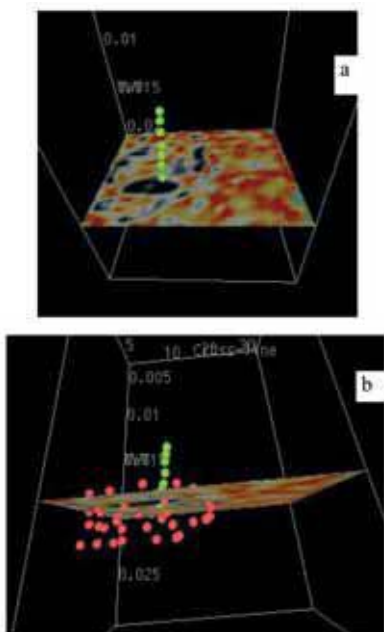


Рисунок 8 Временной срез на 20 нс, куб данных от 13.40 а) положение трубы, б) положение трубы и интерпретированного водного пузыря.

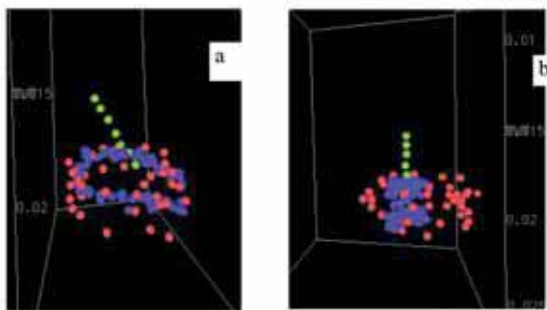


Рисунок 9 Сравнение пикировок по спектральному разложению данных (розовый) и направленному падению (голубой)

Пикировки по спектральному разложению и направленному падению очень похожи. Однако, спектральное разложение ведет к более точному обнаружению пузыря. После интерпретации спектрального разложения данных оценка объема составила 0.03402 м^3 , что привело к оценке пористости в 15%. Это значение пористости очень близко к значению, полученному для куба данных от 12.50. Несмотря на это, значение не вписывается в классический диапазон пористости песка. Это означает, что межпоровая вода должна присутствовать до начала процесса инфильтрации.

Интерпретация 4D

Цель 4D интерпретации в обнаружении изменений петрофизических параметров. Если предположить повторяемость наблюдений, то наблюдаемые изменения должны соответствовать изменению этих параметров (Oldenziel, 2003). Наблюдаемые изменения по расширению пузыря вызваны инфильтрацией воды. Темп расширения можно оценить из сравнения объемов после инъекции 1 л и 4 л. Эта величина оценивается как $9.18 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$. Скорости распространения воды определить нелегко из-за анизотропного расширения под действием силы тяжести, капиллярных эффектов и воздействия водного потока одновременно. Более того, изменяются петрофизические свойства. Впрочем, этот эксперимент по проведению повторных измерений отлично показал пространственное изменение формы несферического пузыря во время инфильтрации воды (сравните рис. 6 и 7а).

Заключение и рекомендации

Направленное падение и спектральное разложение оказались мощными инструментами для интерпретации 3D и повторных измерений георадаром. Они обеспечивают лучшее понимание зависимости распространения фронта воды от петрофизических свойств песчанника коллекторов. Похожие измерения будут проведены на отдельных площадях летом 2005 г. для подтверждения результатов количественной оценки пористости и также для учета измерений межпоровой влажности в образцах почвы перед инфильтрацией. Более того, еще предстоит количественное изучение кубов разницы с Seismic Unix. Эти наборы данных покажут разницу между данными, полученными в разное время (до, во время и после инфильтрации), и также разницу для разных тестовых площадок.

Ожидается, что куб разницы покажет количественные результаты как временные изменения формы пузыря, но и также специфическую зависимость от типа песчаного коллектора. При аккуратной калибровке это приведет к дальнейшему исследованию количественных оценок других петрофизических параметров, кроме пористости различных песчаных коллекторов. Конечная цель этого научного проекта в улучшении понимания распространения флюида в различных песчаных коллекторах и их петрофизических параметров.

Благодарности

Мы особо благодарим Albane Saintenoy (University Paris-Sud, Departement Sciences de la Terre) за их участие в

Много-дисциплинарные науки о Земле

съемки и обработке данных георадара, и также Pjotr Tucholka за конструирование устройства инъекции воды. Мы благодарим Elodie Sudriez и Gregory Meyer за написание скриптов для обработки в SU (Seismic Unix). Выражается благодарность Paul de Groot из dGB за его поддержку в использовании модулей для атрибутов угла и азимута в OpendTect.

Ссылки

Beukelaar de, P., Meinster, M., Meyer, G., Saintenoy, A., and Sudriez, E. [2004] 3D interpretation and cement fill monitoring using GPR over an abandoned gypsum mine. *66th EAGE Annual Conference, Paris. Extended abstracts*, 1-4.

Beukelaar de, P., Mazouz, S., Meinster M., Saintenoy A., and Tucholka P. [2004] Monitoring of water infiltration using GPR data. *10th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Utrecht. Extended abstracts*, 1-4.

Oldenziel T. [2003] *Time lapse seismic within reservoir engineering*. PhD thesis, Delft University of Technology, Department of Applied Earth Sciences.

Mari J.-L., Arens G., Chapellier D., and Gaudiani P. [1999] *Geophysics of Reservoir and Civil Engineering*. Editions Technip.

Meldahl, P., Al-Najjar, N., Oldenziel, T., and Ligtenberg, H. [2002] Semi-automated detection of 4D anomalies. *64th EAGE Annual Conference, Florence, Extended Abstracts* 1-4.

Partyka, G., Gridley, J. and Lopez, J. [1999] Interpretational applications of spectral decomposition in reservoir characterization. *The Leading Edge*, **18**, 3, 353-360.

Saintenoy A. et Tarantola A. [2001] Ground penetrating

radar: analysis of point diffractors for modeling and inversion. *Geophysics*, **66**, 540-550.

Suski, B., Saintenoy, A., Tucholka, P., and Vachier, P. [2003] Monitoring of saline water infiltration in the uppermost meter of unsaturated soil using resistivity measurements. *EGS/AGU/EUG Nice*.

Tingdahl, K. [2003] Improving seismic chimney detection using directional attributes. In: Nikraves, M., Aminzadeh, F., and Zadeh, L.A. Soft computing and intelligent data analysis in oil exploration. *Developments in Petroleum Science*, **51**, 157-173.

Yelf, R., 2004, Where is true time zero? *Proceedings of Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar*, 21-24 Июнь, Delft.

SoleGeo: the company

SoleGeo основана в 1999 как консалтинговая компания, специализирующаяся на определении характеристик коллектора на основе геологических, петрофизических и геофизических данных. Основанная в Париже, Solegeo недавно расширила свое международную деятельность до 1) трейнинга по атрибутивному анализу, инверсии, количественным оценкам, геофизике коллектора (совместно с Fugro-Robertson и EPTS); 2) участия в рискованных проектах (как в Северной Африке) в качестве консультанта по описанию коллекторов; и 3) работ по малоглубинной акустике, электротомографии, и георадару «под ключ» (совместно с Empec GeoSurveys).