

Последние разработки в низкочастотном спектральном анализе данных пассивной сейсморазведки. Recent developments in low frequency spectral analysis of passive seismic data

С первой промышленной работы, опубликованной журналом *First Break* в 2005 г., произошло стремительное развитие спектрального анализа низкочастотных сейсмических данных. David Walker¹ из компании Spectraseis описывает последние разработки в этой области и объясняет, как большой объем данных способствует прогрессу новых методов обработки и анализа.

Низкочастотные аномалии в сигнале, зарегистрированные широкополосными приемниками, указывают на присутствие углеводородных коллекторов. Объединение атрибутного анализа сигнала с использованием метода обработки, разработанных во время последнего исследования, дает более точную связь между сигналом и наличием углеводородов по сравнению с прежним соотношением, использующим несложные, но часто приводящие к ошибкам, низкочастотные данные. Является ли происхождение наблюденного сигнала результатом эмиссии внутри бассейна или это низкочастотный эффект рассеивания волнового поля акустически аномального углеводородного бассейна внутри другой относительно гомогенной среды – предмет исследований и тестов. Однако недавно разработанный метод моделирования с обращением во времени успешно определяет местоположение резервуара в среде, допуская, что небольшая часть аномального сигнала возникает в коллекторе.

В 2004 г. бразильская компания Spectraseis провела анализ низкочастотных сейсмических данных. В 2005 г. первый доклад был сделан Holzner, и привел к тому, что заказчик сообщает о 85%-ой корреляции между сигналом и присутствием углеводородов (Macedo, 2005). К концу 2007 г. компания Spectraseis получила заказ на пять низкочастотных сейсмических работ от важного заказчика в сфере нефтяной промышленности, а также получила новые наборы данных по известным месторождениям на Ближнем Востоке, Северной Африке, Европе и Северной и Южной Америкам. Продолжающаяся научно-исследовательская программа привела к большему пониманию этих низкочастотных сигналов и их связи с бассейнами углеводородов, а также сильно обогатила увеличивающуюся библиотеку данных Spectraseis.

Ищется научное объяснение природе эмпирически наблюденного феномена, почему углеводородный бассейн в пористой среде имеет связь с аномалиями сейсмического сигнала. Вводятся модели резонансного усиления (RAM) и резонансного рассеяния (RSM). RAM – это явление, при котором определенные частоты естественного энергетического спектра земли улавливаются в многофазной жидкостной системе порового пространства углеводородных бассейнов, и выделяются в дальнейшем с различными энергетическими уровнями. Данные разрабатываемого месторождения также свидетельствуют, что

низкочастотные энергии сигнала, связанные с продуктивными коллекторами, являются результатом динамики продуктивной среды. Но даже в такой среде по низкочастотным аномалиям можно определить наличие углеводородов. В отсутствии деятельности по добыче, в условиях разведки, определение местоположения углеводородных коллекторов в дальнейшем подтверждалось бурением.

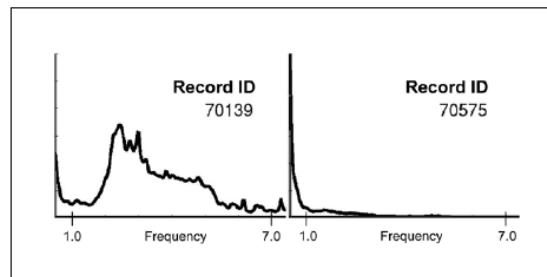


Рис. 1. Спектр пассивного волнового поля (вертикальная скорость перемещения поверхности) в диапазоне частот 1-7 Гц над продуктивной площадью (обозначено 70139) и площадью, не имеющей известных залежей углеводородов (обозначено 70575).

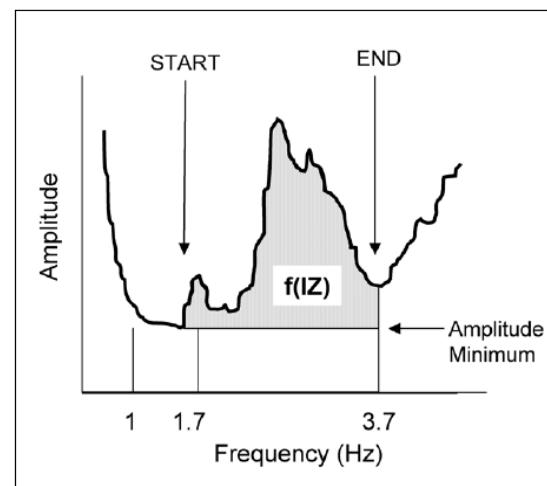


Рис. 2. Параметр анализа IZ.

¹ David Walker, Spectraseis; E-mail: david.walker@spectraseis.com.

В общих чертах, явление RSM можно объяснить так - коллектор имеет отличные от вмещающей среды акустические свойства, и волновое поле рассеяно или иначе изменено благодаря присутствию углеводородов, проявляющихся в виде низкочастотных сейсмических сигналов. Также вероятно, что RAM и RSM влияют на полученный сигнал, поскольку ни одно из объяснений не может это опровергнуть.

Уже много лет известно, что на сейсмических данных углеводородные бассейны проявляются в виде низкочастотных аномалий (Goloshubin, 2006; Chapman, 2006; и там же ссылки). Chapman (2006) в своей статье пишет о влиянии затухания в резервуаре на характеристики AVO: «аномально высокое затухание в коллекторе наблюдается при контроле данных на поверхности». Придерживаясь этого факта, углеводородный коллектор сильно влияет на рассеянные волны из-за высокого комплексного импеданс-контраста (то есть высокого поглощения) по сравнению с вмещающими породами (которые обладают низким затуханием или вообще без него). Следовательно, коллектор можно обнаружить благодаря влиянию рассеяния, например, стоячих волн.

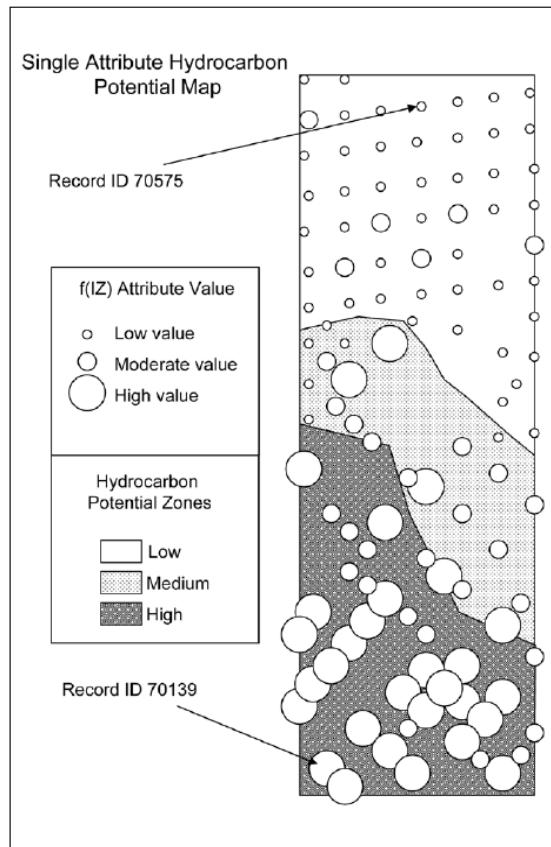


Рис. 3. Карта распределения углеводородов, полученная благодаря анализу IZ.

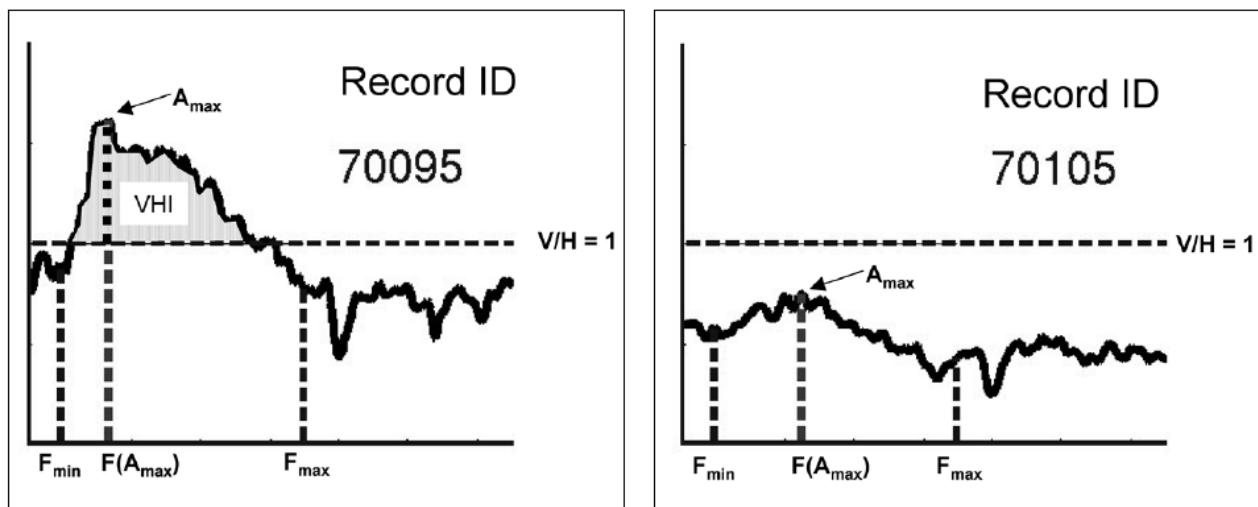
Однако, поскольку эти микро-сопряжения не являются единственным источником аномалий, наблюденных на сейсмических данных, возможно, неправильно просто соотносить низкочастотные экстремумы с наличием углеводородов. Кроме этого, присутствие углеводородов, влияющих на аномальные значения сигнала, может «скрываться» в любой частоте энергии окружающей среды или энергии сейсмических волн; в связи с этим, для обнаружения запасов углеводородов требуется более сложная обработка с применением трехкомпонентных широкополосных датчиков. Для различных месторождений обнаружено, что совокупность атрибутов сейсмического сигнала с большей надежностью, чем один параметр, определяет присутствие углеводородов.

RAM предполагает, что коллектор углеводородов выступает в роли преобразователя энергии, накапливая, а впоследствии выделяя некоторую энергию сигнала. Происхождение и механизм этого накопления является предметом проводимых в настоящее время исследований. Возможно, происхождение энергии объясняется так: движущая сила этого – океанические волны, взаимодействующие со структурами берега и/или океанским дном. Так называемый максимум океанической волны приходится на 0.1-0.2 Гц в фоновом сейсмическом шуме (Berger, 2004), который повсеместно регистрируется. Поверхностные волны проходят через целые континенты и могут использоваться для определения сейсмических скоростей вплоть до глубин 20 км (Shapiro, 2005). Интересно, что волны Рэлея с частотой около 0.1 Гц доходят до глубин значительно больших, чем глубины залегания продуктивного пласта, главным образом, в вертикальном направлении (Aki and Richards, 2002). Как будет показано ниже, чтобы определить наличие углеводородов в недрах Земли используются преимущественно вертикальные колебания в нескольких сейсмических атрибуатах.

Модель, учитывающая взаимодействие распространения волн и колебания

Механизм выделения энергии из коллектора состоит в том, что колебательные движения несмачивающихся флюидов в пористой среде передаются в среду, окружающую поры породы. Неоднородности, такие как пустоты в упругой среде, и частичное насыщение в пористой среде могут быть причиной колебательных движений. Например, изучались колебательные движения несмачивающихся флюидов, заключенных в капиллярных трубках и в идеализированном поровом пространстве (Graham and Higdon, 2000a; Graham and Higdon, 2000b; Dvorkin, 1990), и основным результатом стали колебательные движения флюидов при применении внешней силы (Hilpert, 2000). Значение частоты этих движений приходится на нижнюю границу частотного спектра (Holzner, 2007; Hilpert, 2007).

Возвращающаяся сила такого колебательного движения – это сила поверхностного натяжения, действующая на границу раздела между смачивающейся и несмачивающейся жидкостью фазой. Эти результаты использовались для исследований добычи нефти с помощью методов увеличения отдачи, названными «волновое повышение нефтеотдачи» или «вибрационная мобилизация» (Beresnev,

Рис. 4. Иллюстрация параметров для анализа отношения V/H (над залежью углеводородов).Рис. 5. Иллюстрация параметров для анализа отношения V/H (при отсутствии известных углеводородов).

2005; Hilpert, 2007; Iassonov and Beresnev, 2003; Li, 2005). Эти методы и их применение рассмотрели Beresnev и Johnson в 1994. Другой пример – это пустоты или пузырьки газа в твердой фазе, которые могут колебаться и обладать резонансной частотой (например, Landau and Lifschitz, 1997; Meyer, 1958). Хотя физический механизм колебаний отличается от того, который встречается в порах частично заполненных несмачивающимся флюидом, математическое описание процесса и результат влияния на окружающую твердую фазу – подобный. Детальное описание этого явления провели Anderson и Hampton (1980a and b). Третий пример колебательного движения – это слоистая среда. Urquiza и Correig (2004) показывают, что распространение сейсмических волн через слоистую среду можно описать различными математическими уравнениями.

Открытие, при котором возможно стимулировать колебания флюидов в многофазных системах, имеет важные следствия. Однофазный поровый флюид может поглощать энергию, но он не будет колебаться, потому что отсутствуют возвращающиеся силы, действующие между флюидами и вызывающие колебания. Далее, поскольку источник энергетической аномалии ограничен системой флюидов коллектора, определение колебаний в трех направлениях может непосредственно указать на продуктивные пласти.

Колебательный процесс – это возможное истолкование природы низкочастотного (< 10 Гц) аномального движения сигнала в земной поверхности, которое было измерено над углеводородными коллекторами (Dangel, 2003, Graf, 2007; Bloch and Akrawi, 2006, Suntsov, 2006). Считается, что совместный эффект от неоднородностей и частичного насыщения в коллекторах может вызвать их колебательные движения. Колебания флюидов в бассейнах может изменить спектральный состав внешнего волнового поля, измеряемого на земной поверхности высокочастотными широкополосными датчиками. Характерное изменение низкочастотных спектров

вдоль профиля измерений теоретически указывает на присутствие запасов углеводородов (Graf, 2007).

Описанные выше примеры колебательных механизмов в твердой фазе и их возможные применения для нахождения углеводородов побудили Frehner и др. (представлено к публикации) развивать одномерную (1D) модель, учитывающую распространение и колебание волн. Эту модель применяют для изучения физического происхождения такого сочетания, при котором прохождение акустических волн через твердую фазу совершается колебательным образом. Особое внимание надо уделять передаче энергии от сейсмических волн к осцилляциям, а также изменению спектрального состава акустических волн, когда они проходят через твердое вещество с резонансной частотой. Frehner получил модель, учитывающую взаимодействие распространения волн и осцилляций. Полученную систему двух связанных уравнений впоследствии решили в численном виде с применением метода конечных разностей. Используя численные алгоритмы, был произведен расчет дисперсионного уравнения для контактной среды и сохранения и передачи энергии. Чтобы вычислить изменение спектрального анализа для прохождения акустических волн через твердое вещество с резонансной частотой, применялось численное моделирование.

Моделирование, проводимое под руководством Frehner, показало, что падающие сейсмические волны возбуждают колебания несмачивающихся флюидов в частично насыщенной пористой среде. Требующаяся для возбуждения колебаний энергия передается от упругого твердого тела к флюиду с резонансной частотой флюида. Поэтому фронт волны теряет энергию в резонансной частоте и способствует развитию прогиба в спектре скоростей. Волновой фронт заставляет колебаться поровый флюид, чья энергия затем передается скелету горной породы. Следовательно, в спектре данных образуется энергетическая аномалия.

Наземная Сейсмика

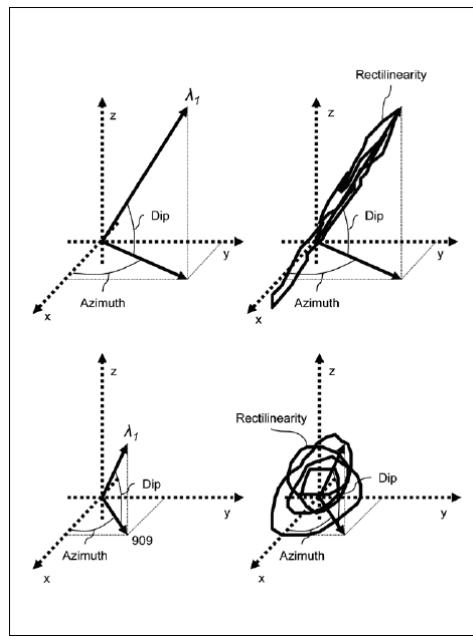


Рис. 6. Диаграммы поляризации, отображающие падение и азимут. Наверху: высокая прямолинейность и средние углы падения. Внизу: низкая прямолинейность и относительно большие углы падения. Параметр интенсивности сигнала определяется по наибольшему собственному значению λ_t .

После того, как прошел фронт волны, непрерывная передача энергии от флюида к твердому телу приводит к уменьшению амплитуды колебаний порового флюида. Следовательно, амплитуда спектра собственной частоты колебаний также со временем уменьшается. Это уменьшение зависит от мощности пласта, который содержит поровый флюид.

Разработанные во время последнего исследования сейсмические атрибуты

Чтобы определить положение коллектора, необходимы высококачественные сейсмические атрибуты низкочастотных данных, зарегистрированные высокочувствительными трехкомпонентными широкополосными датчиками. Недавно обнаружилось, что отдельные поляризации могут указать на присутствие углеводородов.

По выделенным аномалиям, соответствующим интенсивности сигнала, можно откартировать разведочную площадь (Dangel, 2003). На рис. 1 показан разительный контраст между спектрами вертикальных компонент двух трасс в частотном диапазоне 1-7 Гц. Были собраны данные вдали и непосредственно над залежью углеводородов. Станцию 70139 установили над известным месторождением газа, а станцию 70575 - на неперспективной площади.

Их местоположения показаны на рис. 3. Такое простое разделение не всегда возможно, но и простое изучение спектра вертикальной компоненты обычно неэффективно для успешного анализа низкочастотных пассивных данных.

Недавно разработанный индикатор уровня сигналов, или атрибут данных, является объединением спектра вертикальной компоненты (Z) в ограниченной ширине полосы пропускания. Этот так называемый атрибут IZ является сглаживающим фильтром и более надежным признаком, чем вертикальный амплитудный экстремум. На рис. 2 показано, что параметры для анализа IZ во временной и частотной областях определяются визуально. Узкий частотный диапазон (например, 1-3.7 Гц) позволяет избавиться от низкочастотного шума океанских волн и более высокочастотного антропогенного шума. Шумовую составляющую в спектре можно учесть, определив отдельные начальные частоты, связанные с локальными минимумами для каждого спектра в выбранном минимальном диапазоне (например, между 1-1.7 Гц). Интеграл по частоте выше этого минимального уровня сигнала используется для определения данных зоны контроля (см. рис. 2, где IZ означает интеграл данных для вертикальной компоненты; хотя в основном этот метод можно применить к любой компоненте вектора или нескольким компонентам). На рис. 2 функция $f(IZ)$ отображает зависимость, связанную с интегрированием площади, величины амплитуды по спектру и выбранного амплитудного минимума в диапазоне от локального минимума частоты (обозначено - START) до максимального значения частоты (обозначено - END). Так как остаточный шум обладает более высокими частотами, для данных (рис. 2), полученных над газовым коллектором, был вычислен интеграл от 1 до 3.7 Гц. Было найдено, что фактическая более низкая дальность действия источников антропогенного шума

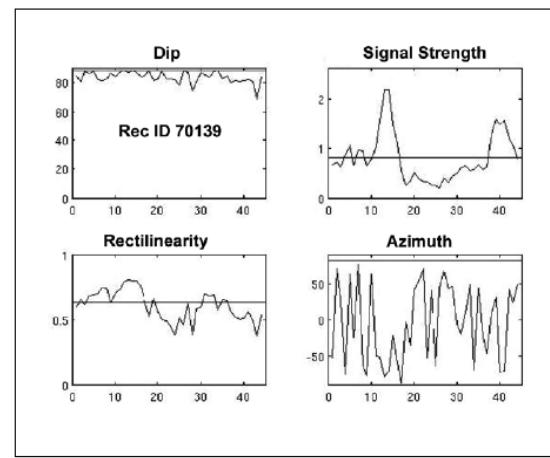


Рис. 7. Зависимости угла падения (ϕ), интенсивности сигнала (λ_t), прямолинейности и азимута (θ) от времени для диапазона частот 1-3.7 Гц, зарегистрированные станцией 70139 (над углеводородным коллектором). Отметки на горизонтальной шкале соответствуют периодам 40 с. Сплошной линией отображены значения за весь промежуток времени.

часто зависит от области и может начинаться в пределах 4-5 Гц. Карту распределения залежей углеводородов (см. рис. 3), иллюстрирующую результаты, полученные в Северной Америке, можно дополнить, основываясь на относительном уровне сигнала, выведенного из определения функции $f(IZ)$ или других сейсмических атрибутов. Обнаружилось, что более высокий уровень сигнала, или «сильный сигнал» $f(IZ)$, имеет хорошую корреляцию с газовыми месторождениями. Составленная карта возможных запасов углеводородов, полученная при анализе индикатора уровня сигнала для зоны контроля, в основном успешно коррелируется с известными месторождениями и перспективными областями. После того, как были получены низкочастотные данные для сравнения значений зоны контроля со значениями на продуктивной площади (см. рис. 3), были пробурены скважины, подтверждающие наличие коллекторов.

Анализ измерений другого сейсмического атрибута выведен из отношения V/H , где сравнивают вертикальную компоненту трехкомпонентного датчика с горизонтальной компонентой (Lambert, 2007). Высокие значения этого отношения, измеренные в низкочастотной полосе, часто указывают на наличие углеводородов. Была вычислена область под кривой из соотношения спектральной плотности площади (рис. 4, где зона, обозначенная V/H , является интегралом VH), чтобы обозначить на карте этот параметр для всех положений датчика. Выбраны пороговое значение (например, 1 на рис. 4) и минимальная (F_{min}) и максимальная (F_{max}) частоты, между которыми затем вычислен интеграл. К тому же, что касается изучения зоны контроля, то относительно более крупные аномалии были найдены над коллекторами по всей площади известных месторождений. Альтернативный атрибут V/H включает пространственную съемку наибольшего значения амплитуды, при котором V/H будет максимальным (A_{max} на рис. 4 и 5).

Анализируя поляризации для зарегистрированных низкочастотных данных, можно определить некоторые атрибуты (Saenger, 2007), которые вместе дадут надежную связь с коллектором. Первым шагом в этой процедуре является применение полосового фильтра для 3С данных во временной области, чтобы выделить необходимый частотный диапазон (к примеру, 1-4 Гц) для дальнейшего анализа (Jurkevics, 1988). Рассмотрение любого временного интервала для трехкомпонентных данных u_x , u_y и u_z , имеющих N временных выборок авто- и взаимовариации можно получить из:

$$C_{ij} = \left[\frac{1}{N} \sum_{s=1}^N u_i(s) u_j(s) \right]$$

где i и j означают индексы компонент x , y , z , а s – индексная переменная для временной выборки.

$$C = \begin{pmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\ C_{zx} & C_{zy} & C_{zz} \end{pmatrix}$$

C - ковариационная матрица, которая является действительной и симметричной и представляет эллипсоид поляризации, максимально отвечая данным.

Значение главной оси этого эллипса

можно получить, найдя собственные значения C :

$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ и собственные вектора матрицы p_1 , p_2 , p_3 :

$$(C - \lambda I)p = 0$$

где I – единичная матрица.

Здесь параметр L , названный прямолинейностью или линейностью, связывает среднее и минимальное собственные числа и максимальное собственное число и является мерой входной поляризации волнового поля. Он дает результат между 0 и 1.

Два других параметра поляризации описывают направление максимального собственного вектора матрицы $p_1 = (p_1(x), p_1(y), p_1(z))$ по наклону и азимуту. Наклон можно рассчитать по формуле:

$$\phi = \arctan\left(\frac{p_1(z)}{\sqrt{p_1(x)^2 + p_1(y)^2}}\right)$$

При горизонтальной поляризации наклон равен нулю и положителен в области положительной полуоси z . Азимут определяется как

$$\theta = \arctan\left(\frac{p_1(y)}{p_1(x)}\right)$$

и принимается положительным при движении против часовой стрелки от положительной полуоси x . Кроме этого, интенсивность сигнала выражается собственным значением λ_1 . Все четыре атрибута показаны на рис. 6.

На рис. 7 и 8 приведенный выше анализ применили для данных станций 70139 и 70575 (см. рис. 1). Ясно, что

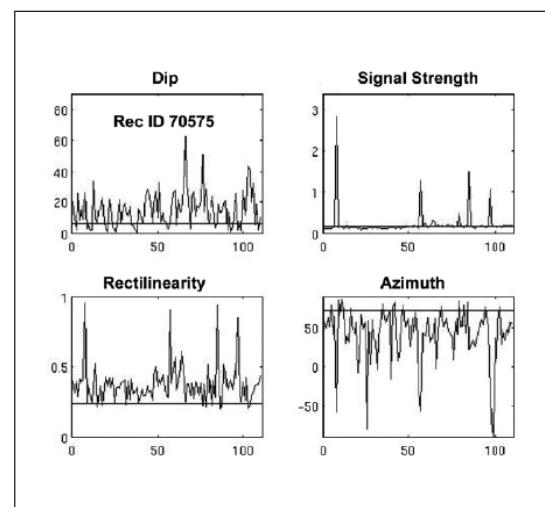


Рис. 8. Те же самые параметры, что и для рис. 7, но для станции 70575 (низкий потенциал углеводородов).

Наземная Сейсмика

разные типы волн имеют различное происхождение. Однако во время съемок на газовом коллекторе весьма устойчиво можно определить атрибуты наклонения, азимута, прямолинейности и интенсивности в частотном диапазоне 1-3.7 Гц.

Эти атрибуты, применимые к известному коллектору (станция 70139) показывают, что наклон будет очень устойчивым при углах, более 80° непосредственно над месторождением (рис. 7, см. верхнюю левую часть). Уровень сигнала будет меняться, но присутствует во всем периоде измерений. Прямолинейность будет относительно высокой и устойчивой. Азимут сильно меняется, как и ожидается для таких высоких значений углов наклона.

Для точки записи, находящейся на неперспективной площади (станция 70575), наклон будет устойчивым при низких углах наклона (20° , см. рис. 8 на верхнюю левую часть). Интенсивность сигнала остается низкой при высоких значениях выбросов. Прямолинейность будет меньше по сравнению с наблюденной над углеводородным коллектором. Значения азимута - довольно устойчивые и могут указать на источник поверхностных помех.

Моделирование обращением во времени для определения местоположения коллекторов

Дальнейшая судьба коллектора, работающего в качестве преобразователя, выделяющего часть сейсмической энергии, - это что моделирование по обратному времени сейсмической энергии, приобретенной вблизи коллектора, объединенного с достаточно точной скоростной моделью, может быть использована непосредственно для обнаружения источника энергии в среде. Применение моделирования обращением во времени (TRM) под руководством Steiner (публикация находится в печати) к данным, полученным над коллектором, обеспечивают непосредственное доказательство того, что источник низкочастотного сигнала зарождается внутри углеводородного бассейна.

TRM имеет широкое применение, например, в медицине и науках о Земле (Fink, 1999).

Прежние исследования обращения во времени концентрировались на выделении единичных осей синфазности из соотношения S/N (Kao and Shan, 2004) или на пространственной и временной точности, связанных с выделением единичных осей синфазности (Gajewski and Tessmer, 2005; Mehta and Snieder, 2006). Метод, приближенный к TRM, - это интерферометрическое сейсморазведочное построение (Schuster, 2004; Wapenaar, 2004).

Должным образом параметризованное для низкочастотных карбонатных данных, TRM определяет микро-согласия в вызывающих их местах. Сигналы меток времени скоростей частиц на приемниках – изменения во времени граничных значений, входных в TRM. Наибольшее абсолютное значение скорости частиц (среднеквадратическая скорость двух частиц) в каждой позиции сетки, которая записывается во всем TRM, хранится в соответствующей позиции.

Steiner (публикация находится в печати) отмечает, что TRM можно успешно применить к искусственным микро-согласиям, а также к реальным записям сейсмических волн, полученным на двух известных нефтяных месторождениях в Австрии. Искусственные микро-согласия, созданные в ходе двумерного численного моделирования прохождения акустических волн, используются для искусственного TRM, и устанавливают, что можно локализовать вполне определенный маленький источник. Численное моделирование показывает, как различные параметры источника влияют на точность локализации. Затем Steiner применил TRM к двум наборам полевых данных, полученных синхронизированными приемниками над вполне известным нефтяным месторождением в течение 16 месяцев. По обоим наборам данных установили, что с помощью данного метода можно определить местоположение резервуара.

Эта скоростная модель и результаты TRM, которые Steiner применил к реальному набору данных, показаны на рис. 9 и 10. Скоростная модель (см. рис. 9) адаптирована к

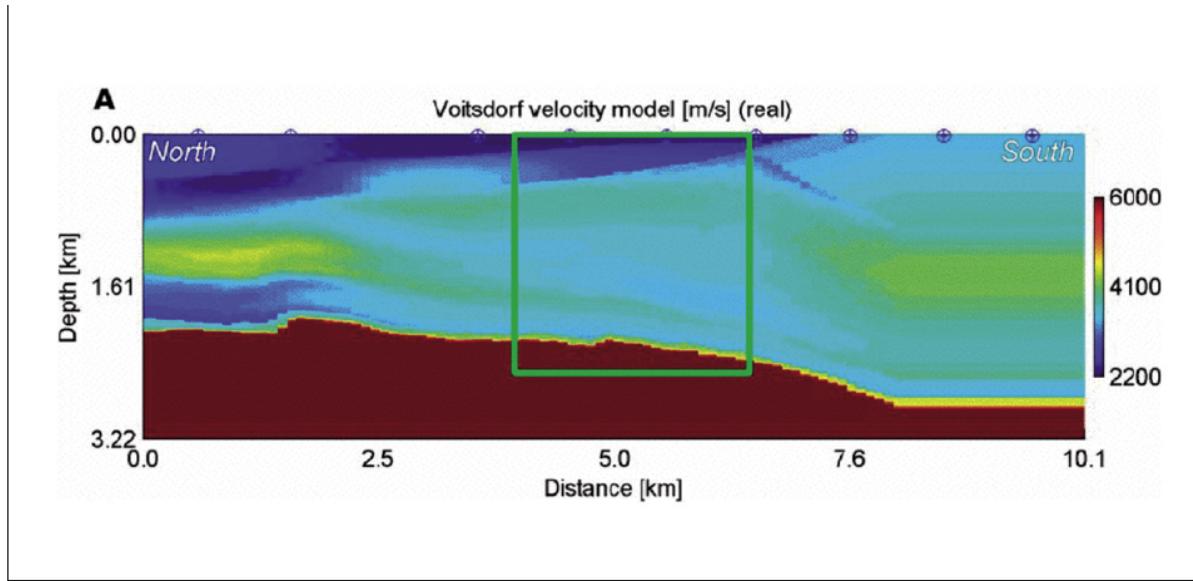


Рис. 9. Скоростная модель для рис. 10. Скоростная модель для P-волн, адаптированная для моделирования по обращению по времени.

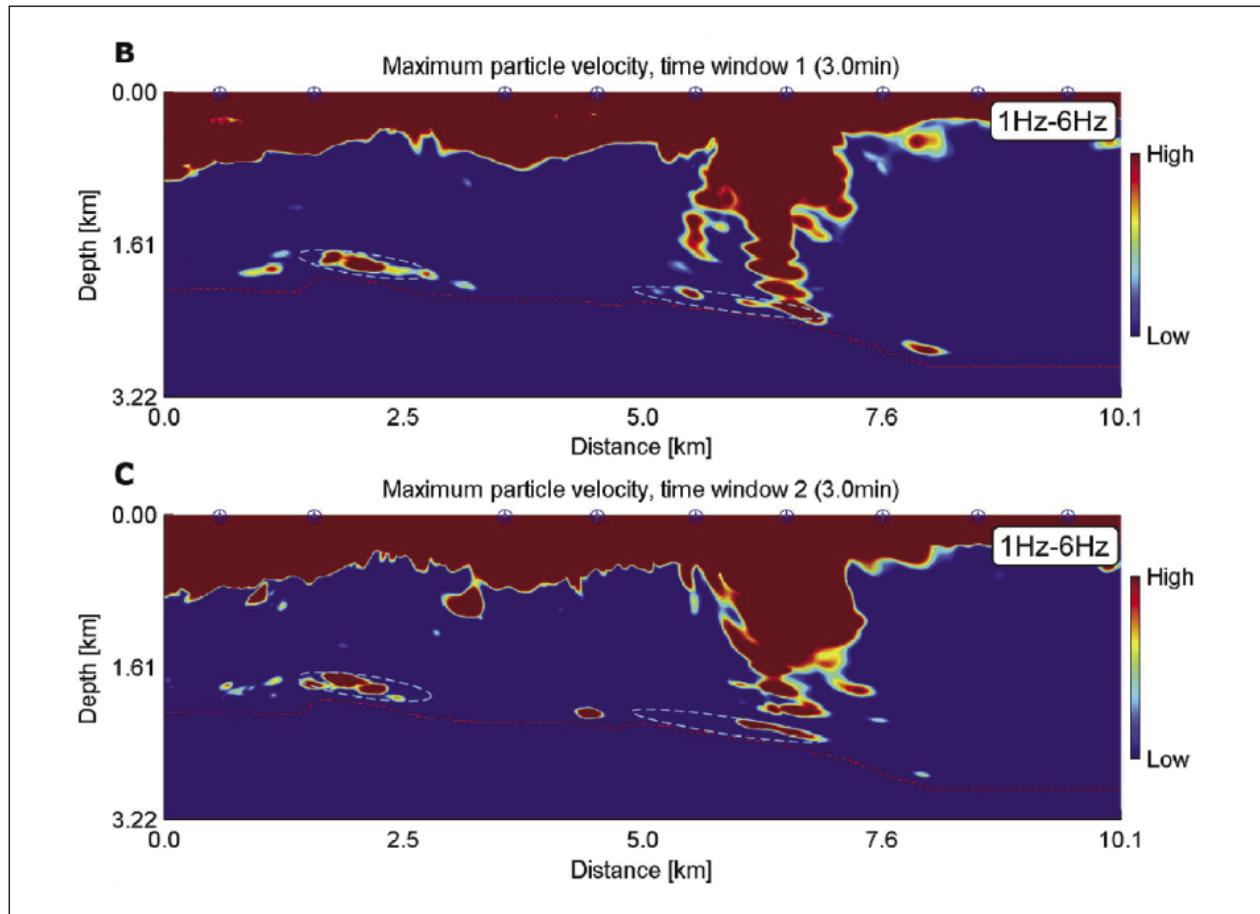


Рис. 10. Распределение максимальных скоростей частиц как результат разделения двух трехминутных периодов для синхронизации данных, полученных над двумя известными месторождениями углеводородов. Эллипсы указывают на местоположение коллекторов.

TRM для P и S-волн из суммирования скоростей при 3D изучения местности. На рис. 10 показаны результаты, полученные с помощью TRM для двух отдельных временных окон по три минуты каждое, записанных синхронно девятью датчиками на площади работ. По эллипсам установили уже известные местоположения двух коллекторов. Они соответствуют областям высоких скоростей частиц, выходящих из TRM. Steiner также использовал синтетические данные и показал, что техника TRM может разделять пластовые залежи в среде.

Промышленный шум

Исследования над действующим промыслом дают неоднозначность разделения сигналов, связанных с углеводородами, и акустических сигналов, связанных с динамикой образования (то есть с движением флюида в пласте или динамикой разрядки резервуара). Недавние исследования обратились к этому вопросу.

Синхронизированные данные над действующим месторождением в Африке ясно указывают на низкочастотную аномалию, отличающуюся от связанного с эксплуатацией высокочастотного шума. Эта область находится в удаленном месте, где практически весь антропогенный шум может

быть источником деятельности, связанной лишь с процессом добычи. Несмотря на то, что 2 Гц низкочастотные аномалии совпадали с широкополосным шумом, связанным с полевой деятельностью, три фактора указывают на низкочастотную аномалию, отвечающую коллектору: 1) низкочастотная аномалия имеет отличный спектр от обычного широкополосного шума; 2) отсутствует устойчивая корреляция по времени между уровнем сигнала в более высоких частотах, обычно связанных с антропогенным шумом, и уровнем сигнала низкочастотной аномалии; и, наконец, 3) энергия в низкочастотной полосе повышается тем больше, чем выше частота шума над коллектором.

Исследования, охватывающие добычу и разведку, в Африке показали, что низкочастотная аномалия, связанная с наличием углеводородов, указывает на площадь разведочных работ, что в дальнейшем подтвердилось бурением. Эти признаки были подобны выявленным над действующим месторождением. Вероятно, что низкочастотные сигналы не связаны с производственным шумом, поскольку на площади работ все они уверенно указывают на высокий углеводородный потенциал.

Наземная Сейсмика

Выводы

Последние научные открытия, сделанные компанией Spectraseis и ее партнерами, привели к росту надежности техники атрибутного анализа, которые, используемые в комбинации, повышают надежность исследований, нежели однокомпонентные атрибутные методы. Исследования о выделении коллекторами энергии осцилляций дали возможность непосредственного определения положения бассейна с помощью TRM. Это открытие является доказанным фактом - существует корреляция между углеводородными бассейнами и низкочастотными аномалиями сигналов. Использование данной методики при низкочастотных работах дает ценную с коммерческой точки зрения информацию для разведочных изысканий и эксплуатации месторождений. Отмечаются хорошие перспективы исследований в этой области, поскольку быстро накапливающиеся данные, получаемые в ходе исследований, приводят к важным новым открытиям, повышающим применимость и понимание низкочастотной сейсморазведки для поиска и добычи нефти и газа.

Благодарности

Автор выражает искренние благодарности Stefan Schmalholz, Erik Saenger, Marcel Frehner, Marc Lambert и Brian Steiner из Высшей политехнической школы Цюриха (ETH), чьи недавние публикации были обобщены в этой статье.

Литература

- Aki, K. and Richards, P.G. [2002] *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. 2nd Edn, University Science Books, Sausalito, CA.
- Akrawi, K and Bloch, G. [2006], Application of passive seismic (IPDS) surveys in Arabian Peninsula. *EAGE Workshop on 'Passive Seismic: Exploration and Monitoring Applications'*, Dubai, A28.
- Anderson, A.L. and Hampton, L.D. [1980a] Acoustics of Gas-Bearing Sediments, 1. Background. *Journal of the Acoustical Society of America*, **67**, 1865-1889.
- Anderson, A.L. and Hampton, L.D. [1980b] Acoustics of Gas-Bearing Sediments, 2. Measurements and Models. *Journal of the Acoustical Society of America*, **67**, 1890-1903.
- Beresnev, L.A. and Johnson, P.A. [1994] Elastic-Wave Stimulation of Oil Production - a Review of Methods and Results. *Geophysics*, **59**, 1000-1017.
- Beresnev, L.A., Vigil, R.D., Li, W.Q., Pennington, W.D., Turpening, R.M., Iassonov, P.P., and Ewing, R.P. [2005] Elastic waves push organic fluids from reservoir rock. *Geophysical Research Letters*, **32**, L13303.
- Berger, J., Davis, P., and Ekstrom, G. [2004] Ambient Earth noise: A survey of the Global Seismographic Network. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, **109**.
- Bloch, G. and Akrawi, K. [2006] Application of Low Frequency Passive Seismic Surveys in ADCO, UAE. *EAGE Workshop Passive Seismic*, Dubai.
- Chapman, M., Liu, E., and Li, X.-Y. [2006] The influence of fluid-sensitive dispersion and attenuation on avo analysis. *Geophysical Journal International*, **167**, 89-105.
- Claerbout, F. [1968] Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response. *Geophysics*, **33**, 264-269.
- Dangel, S., Schaepman, M.E., Stoll, E.P., Carniel, R., Barzandji, O., Rode, E.D., and Singer, J.M. [2003] Phenomenology of tremor-like signals observed over hydrocarbon reservoirs. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **128**, 135-158.
- Dvorkin, J., Mavko, G., and Nur, A. [1990] The oscillations of a viscous compressible fluid in an arbitrarily-shaped pore. *Mechanics of Materials*, **9**, 165-179.
- Fink, M. [1999] Time-reversed acoustics. *Scientific American*, **281**, 67-73.
- Frehner, M., Schmalholz, and S.M., Podladchikov, Y. [2007] A 1D coupled wave propagation-oscillation model: spectral modification of seismic waves propagating through solids exhibiting a resonance frequency. Submitted to: *Geophysical Journal International*.
- Gajewski, D. and E. Tessmer [2005] Reverse modelling for seismic event characterization. *Geophysical Journal International*, **163**, 276-284.
- Goloshubin, G., VanSchuyver, C., Korneev, V., Silin, D., and Vingalov, V. [2006] Reservoir imaging using low frequencies of seismic reflections. *The Leading Edge*, **25**, 527-531.
- Graf, R., Schmalholz, S.M., Podladchikov, Y., and Saenger, E. [2007] Passive low frequency spectral analysis: Exploring a new field in geophysics. *World Oil*, January, 47-52.
- Graham, D.R. and Higdon, J.J.L. [2000a] Oscillatory flow of droplets in capillary tubes. Part 1. Straight tubes. *Journal of Fluid Mechanics*, **425**, 31-53.
- Graham, D.R. and Higdon, J.J.L. [2000b] Oscillatory flow of droplets in capillary tubes. Part 2. Constricted tubes. *Journal of Fluid Mechanics*, **425**, 55-77.
- Hilpert, M. [2007] Capillarity-induced resonance of blobs in porous media: Analytical solutions, Lattice-Boltzmann modeling, and blob mobilization. *Journal of Colloid and Interface Science*, **309**, 493-504.
- Hilpert, M., Jirka, G.H., and Plate, E.J. [2000] Capillarity-induced resonance of oil blobs in capillary tubes and porous media. *Geophysics*, **65**, 874-883.
- Holzner, R., Eschle, P., Zurcher, H., Lambert, M., Graf, R., Dangel, S., and Meier, P. F. [2005] Applying microtremor analysis to identify hydrocarbon reservoirs. *First Break*, **23**(5), 41-46.
- Holzner, R., Eschle, P., Dangel, S., Frehner, M., Narayanan, C., and Lakehal, D. [2007] Hydrocarbon microtremors interpreted as nonlinear oscillations driven by oceanic background waves. *Communications in nonlinear science and numerical simulation*, in press.
- Iassonov, P.P. and Beresnev, L.A. [2003] A model for enhanced fluid percolation in porous media by application of low-frequency elastic waves. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, **108**, 2138.
- Jurkevics, A. [1988] Polarization analysis of three component array data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **78**, 1725-1734.
- Kao, H., and Shan, S.-J. [2004] The source-scanning algorithm: mapping the distribution of seismic sources in time and space. *Geophysical Journal International*, **157**, 589-594.



- Lambert, M., Schmalholz, S. M., Podladchikov, Y. Y., and Saenger, E. H. [2007] Low frequency anomalies in spectral ratios of single station measurements: Observations across an oil and gas field in Austria.. Expanded Abstracts, 1352-1356.
- Landau, L.D. and Lifschitz, E.M. [1997] *Mechanik*. 14 Edn., Vol. 1, Harri Deutsch.
- Li, W.Q., Vigil, R.D., Beresnev, I.A., Iassonov, P., and Ewing, R. [2005] Vibration-induced mobilization of trapped oil ganglia in porous media: Experimental validation of a capillary-physics mechanism. *Journal of Colloid and Interface Science*, 289, 193-199.
- Macedo, I., Dittz, R., Santos de Oliveira, A., Holzner, R., and Graf, R. [2005] Observation and modeling of seismic background noise. *Ninth International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Salvador - Bahia, Brazil.
- Mehta, K., and Snieder, R. [2006] Time reversed imaging for perturbed media. *American Journal of Physics*, 74, 224-231.
- Meyer, E., Brendel, K., and Tamm, K. [1958] Pulsation Oscillations of Cavities in Rubber. *Journal of the Acoustical Society of America*, 30, 1116-1124.
- Peterson, J. [1993] Observations and modeling of seismic background noise. *U.S. Geological Survey Open File Report*, 93-322.
- Saenger, E.H., Torres, A., Rentsch, S., Lambert, M., and Schmalholz,