

Региональное преобразование временных координат в глубинные с использованием сейсмических скоростей ОГТ для горизонта Natih E в Северном Омане

Regional time–depth conversion of the Natih E horizon in Northern Oman using seismic stacking velocities

Paul Veeken¹, Jack Filbrandt², и Mohammed Al Rawahy²

Предисловие

В данной статье описана методика суммирования скоростей ОГТ при осуществлении глубинного преобразования региональных временных горизонтов в Северном Омане (Рис. 1). В качестве основы для глубинного преобразования был выбран горизонт Natih E, ввиду того, что в пределах Северного Омана на нем наблюдается четкое отражение сейсмических волн (Рис. 2 и 3). Пласт меловых отложений Natih состоит из пачек известняков, возрастом от позднего Альба до раннего Тулона. Вдобавок к богатым органическими останками осадочным отложениям более раннего возраста наблюдаются разновозрастные продуктивные пласты, таким образом, повышается вероятность продуктивности выявленных ловушек. Общепринятые скважинные методики глубинного преобразования имеют свои ограничения, особенно когда приходится иметь дело с обширными изучаемыми площадями, неравномерным распределением контрольных точек и

сложным характером тектонической эволюции (частная тектоническая инверсия; напр., Veeken и Van Moerkerken, готовится к изданию). Большинство методов являются применимыми только в случае достаточной глубины забоя скважины для калибровки набора данных. При слишком больших расстояниях интерполяции или экстраполяции данные методы, к сожалению, ненадежны. В таких случаях единственным способом оценить структурное строение разреза является использование скоростей ОГТ (Veeken, 2005). Куб скоростей представляет собой превосходный объект для дальнейшего подробного изучения (Schulz, 1999). Многие прямые качественные признаки коллектора основаны на использовании сейсмических скоростей (напр., на контрасте акустического импеданса) и поэтому изучение всех предоставляемых ими возможностей стоит приложения усилий.



Рисунок 1 Карта изучаемой области на территории Омана, в том числе Fahud-Ybal и осадочный бассейн Ghaba, сложенный солевыми отложениями (под ред. Oterdoorn и др., 1999).

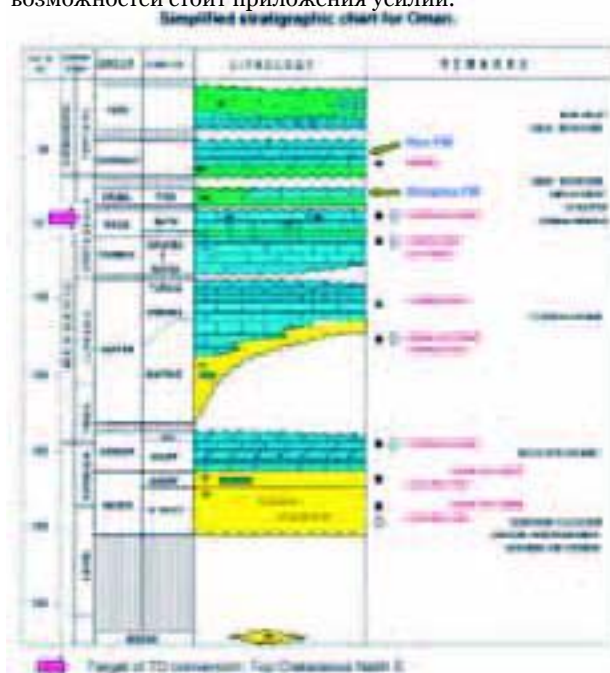


Рисунок 2 Упрощенная стратиграфическая таблица для Омана. Пласт меловых отложений Natih сложен преимущественно мелководно-морскими карбонатными осадками. Указаны эквивалентные по возрасту интервалы продуктивных пластов, но более ранние по возрасту осадочные комплексы также могут вносить вклад в продуктивность района. Залежи нефти и газа обнаружены в пределах карбонатного коллектора Natih в области осадочного бассейна Fahud

¹ранее - CGG; в настоящее время - Geops, 22 Rue Colonel Fabien, 92160 Antony, France (E-mail: pveeken@hotmail.fr)

²Petroleum Development Oman, PO Box 81, Muscat 113, Oman

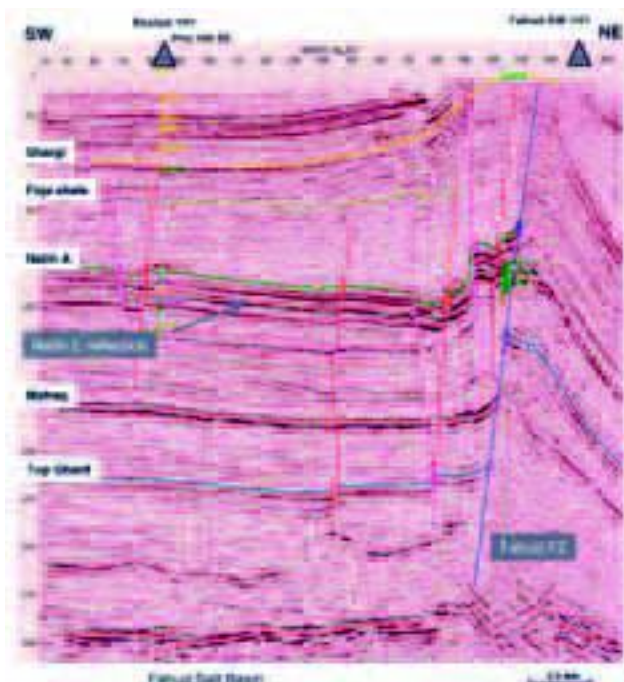


Рисунок 3 Сейсмический профиль A960203 с нанесенными маркерами, демонстрирующими характер тектонических движений и деформацию в приразломной области Fahud. Тектоническая инверсия и правосторонние перемещения вдоль разлома создали сложную обстановку осадконакопления и сжатия, что привело к аномальным значениям пластовых скоростей.

Использование «в лоб» сейсмического способа глубинного преобразования не столь допустимо, если в результате перекрытия результатов сейсмических съемок изменяется шаг дискретизации поля скоростей. Для каждой съемки заданы свои параметры и определен уникальный граф обработки данных. Необходимо выбрать съемку, в результате которой получены наиболее надежные данные скоростей, а прочие съемки необходимо привести в соответствие с выбранной. Области близ границ сейсмических съемок всегда характеризуются наименее надежными данными скоростей. Данное явление возникает в результате недостаточного охвата (количества трасс используемого при суммировании) и эффективности операторов миграции. Поэтому в граничных перекрывающихся областях необходимо применить сглаживание и редактирование. Перед использованием количественных методов обработки данных необходимо произвести гармонизацию скоростей. Качество пикирования скоростей также необходимо предварительно изучить.

Для относительно быстрого получения адекватных данных по региону, в целях экономии временных затрат и издержек, вполне достаточно использовать один только сейсмический способ глубинного преобразования. Полученные таким образом результаты на удивление хорошо выявляют поисковые объекты на первоначальном этапе разведки. На более позднем этапе складки подробно изучаются геологами, геофизиками и промышленными инженерами с обоснованием вероятных ловушек в пределах структур и вероятностей их нефтенасыщения. Использование дополнительных методов, таких как глубинная миграция до суммирования и томографическое обращение, позволяет получить еще более точные скоростные модели среды, по которым возможен прогноз давления в коллекторе. (cf. Dutta 2002). В отличие от использования формулы Дикса и томографического обращения путем трассировки лучей, при сейсмической инверсии используется информация о времени и

амплитуде. В результате ее использования также создается улучшенная скоростная модель, но неединственность решения задачи инверсии продолжает создавать неопределенность (Veeken и Da Silva, 2004).

Для данного регионального исследования глубинного преобразования было выбрано однослойное вертикальное глубинное преобразование. Данная методика соотносится со строгими временными рамками проекта. Многослойный вариант требует картирования нескорректированных поправок для каждого промежуточного слоя. Существует вероятность того, что эти ошибки глубины не всегда будут взаимно скомпенсированы. Суммарная ошибка в случае неизвестных областей, таким образом, может оказаться неправомерно завышенной. Тем не менее, во многих случаях многослойная методика дает хороший результат, особенно в случае адекватного скважинного контроля. Последнее означает, что скважины должны быть размещены с высокой плотностью, распределены по всему изучаемому району и должны обладать очевидным характером изменения скоростей, что наблюдается далеко не всегда.

Различные подходы и ограничения при определении сейсмических скоростей

При глубинном сейсмическом преобразовании, описанном в данной статье, используются интервальные скорости из данных временно-глубинных таблиц, полученных в результате определения скоростей ОГТ. Известно, что скорости ОГТ являются основными скоростями при обработке (напр. Al-Chalabi, 1973, 1994). Суммирование скоростей получают в результате стандартного скоростного анализа по выборкам ОГТ, при котором отражения приводятся к одной плоскости с использованием кинематических поправок для отраженной волны (normal moveout correction, NMO), таким образом изучается распределение когерентной энергии на графике подобию (cf. Yilmaz, 2001). Обычно используется гиперболическая функция NMO, а совмещение кривой достигается с помощью метода наименьших квадратов. Для небольших разностей вполне достаточно такого приближения второго порядка, но при больших разностях играет роль явление анизотропии и необходимо лучшее приближение (cf. Alkhalifa & Tsankin, 1995, Cambois, 2000; Thomsen, 2002). Остаточная кинематика наилучшим образом достигается использованием поправок NMO 4-го порядка. График подобию демонстрирует эффективность суммирования при использовании различных скоростных функций, где качество выполаживания отражений ОГТ после введения кинематических поправок является важнейшим критерием при проведении стандартного скоростного анализа. Если положиться на максимальное сходство, с целью пикирования скоростной функции, велика вероятность того, что будут пропущены небольшие инверсии скоростей. Суммирование будет выглядеть красиво, но результаты будут далеки от реального разреза. Еще одной проблемой является то, что иногда трудно обойти интерференцию различной энергии при пикировании скоростей. Для адекватного суммирования необходимо, чтобы значение скорости превышало скорость в среде, расположенной над отражающим горизонтом (Dutta, 2002). В действительности, для переноса данных перед проведением суммирования необходимо внесение поправок за угол отражающей границы (dip moveout, DMO) или частичная миграция во временной области (Yilmaz, 1987). Предпочтение отдается использованию миграции до суммирования перед проведением скоростного анализа (Da Silva et al., 2004). Значения скоростей NMO должны соответствовать 3D обстановке, и необходимо достичь пространственного единства поля скоростей.

Резкие изменения прослеживаются по нескольким выборкам ОГТ, соответствующие геологическим границам, разломам, областям с высоким давлением и т.п. Почти всегда необходимо сглаживание поля скоростей. На пикирование скоростей оказывают влияние следующие параметры (Dutta, 2002):

- соотношение «сигнал/помеха»
- мьютинг
- длина расстановки с эффектом анизотропии для больших разносов
- кратность суммирования
- отказ от предположения о гиперболическом приращении времен
- длина временного окна
- ширина полосы пропускания
- сложное структурное строение с меняющимися скоростями
 - 3D сглаживание скоростей, почти всегда необходимое для получения хорошего результата суммирования скоростей

Анализ скоростей можно проводить не только по маркерам с высокой амплитудой, но и по участкам с меньшими амплитудами (меньший контраст акустического импеданса), если поправки NMO введены верно (Veeken, 2005). Для получения хороших результатов разрезы ОГТ должны быть максимально избавлены от помех и многократных отражений, к ним необходимо применить DMO - преобразование и миграцию до суммирования (Da Silva и др., 2004).

Известно, что наилучшая скорость суммирования не всегда преобразуется в наилучшую интервальную скорость (cf. Robein 2003). Формула Дика позволяет осуществлять преобразование суммированных скоростей в интервальные при соблюдении некоторых основных принципов. Интервальные скорости представляют собой вертикальные скорости в пределах интервала между верхней и нижней границами. Это может быть скорость отдельного литологического пласта или средняя скорость для нескольких пластов в пачке. Иногда интервальные скорости принимаются в качестве эквивалента скоростям в породе, но для понимания их истинного значения необходимо учитывать природу их происхождения. Сейсмические интервальные скорости получены с использованием сигнала частоты 8-120 Гц, в то время как времена прохождения петрофизического акустического каротажа измеряются на частотах 5 - 10 КГц.

Суммирование скоростей производится для отдельных ОГТ (обычно с использованием равномерной сетки 250 x 250 м). Объекты, выбранные для пикирования скоростей на разрезе ОГТ, часто соответствуют отражениям с высокой амплитудой, которые легко выявить. Более того, отражения, используемые для определения скоростей, могут изменяться от разреза к разрезу, т.е. они не принадлежат одному и тому же сейсмическому горизонту. В настоящее время наблюдается возрастание популярности пикирования скоростей на постоянном горизонте. Данная методика дает лучшие результаты с меньшим количеством проблем, связанных с пикированием. При осуществлении такой сейсмической обработки на постоянном горизонте учитываются геологические объекты. Каждое значение NMO при заданном времени двойного пробега (two-way time, TWT) определяет гиперболическую кривизну соответствующего отражения и определяет скорость ОГТ для двойного пробега луча, от источника до отражающего горизонта к приемнику. Она преобразуется в среднеквадратичную скорость в предположении, что удаление стремится к нулю, границы субгоризонтальные и пластовые скорости постоянны. Среднеквадратичная скорость представляет

вертикальную скорость, измеряемую от соответствующего источника до исследуемого горизонта, в то время как суммирование скоростей предполагает 3D распространение луча по объему породы.

Полученная с помощью суммирования скоростная модель построена с использованием независимых измерений вертикальных скоростей. Вследствие этого ошибка при пикировании скоростей необязательно будет распространена на всю вертикаль модели. Ошибки могут быть скомпенсированы на более глубоком уровне. Каждой точке определения скорости в выборках ставится в соответствие собственная эффективная скорость, представляющая собой скорость, соответствующую гипотетическому вертикальному распространению луча сквозь колонну породы от нулевой плоскости до отсчета времени определения.

Временно-глубинные таблицы и скоростные функции

Информация о скоростях позволяет построить временно-глубинные таблицы в отдельных точках ОГТ для дальнейшего использования при глубинном преобразовании. Таблицы интерполируются и экстраполируются по всей изучаемой площади, поэтому в рассмотрение включаются все точки (X,Y,TWT). Каждой точке вдоль сейсмического профиля таким образом соответствует временно-глубинная функция, которая в пределах сейсмического куба преобразуется в соответствующую эффективную скорость. В данном исследовании в качестве входных данных используется грид TWT для горизонта Natih E, но таким же образом может быть использован любой горизонт, находящийся в пределах определения сейсмических скоростей. Экстраполяция характера скоростей может оказаться ненадежной и, разумеется, необходимо предварительно оценить качество входного пикирования скоростей.

Исходная эффективная скорость и система временных отсчетов для горизонта – время пробега (one-way time, OWT) – умножаются для выполнения начального глубинного преобразования, также определяются невязки в скважинах. Таким образом, вычисляются и вводятся поправки глубины. Затем могут быть пересчитаны эффективные скорости. На полученных при этом картах эффективных скоростей отсутствуют помехи, что позволяет получить окончательную карту глубин. В пределах этой карты желательно применить сглаживание, поскольку сглаживание глубин также приведет к сглаживанию карты времен. Предполагается, что наилучшим для пикирования горизонтом является TWT (это не всегда так в случае использования различных источников данных или в областях с низким качеством данных), и произвольные изменения здесь не допускаются. Обычно пикирование времен становится менее надежным при удалении от скважинных контрольных точек, но маркирующий горизонт Natih E хорошо прослеживается в пределах всей изучаемой площади, поэтому расчет пикирования времен сомнений практически не возникает. Глубина геологического маркера и пикировка TWT известны по контрольным точкам в скважинах, в итоге получается «псевдо»-скорость по скважине, называемая здесь средней скоростью. Позже она используется при сглаживании поля эффективных скоростей для того чтобы убедиться, что на окончательной карте глубин достигнуто совмещение скважин. Таким образом, средняя скорость определяется как вертикальная скорость в скважине с помощью глубины скважины и сейсмического времени двойного пробега для сейсмического маркера в одинаковом местоположении. Она является средней скоростью на вертикальном интервале от нулевого уровня до точки отсчета.

здесь графике наблюдается большой разброс значений скоростей, при этом отчетливо наблюдаются два различных множества. Цветом выделена их зависимость от географического распределения данных, при этом предполагается, что на картину поля скоростей значительное влияние оказала тектоническая инверсия. Для Северного Омана хорошо известно явление инверсии третичного периода, произошедшей во время второй фазы Альпийской складчатости (напр. Hanna & Nolan, 1989; Loosveldt и др., 1996, Veeken & van Moerkerken, 2005). Она была вызвана правосторонним сдвиговым смещением вдоль разлома Maradi.

Ввиду разнородности исходных данных (различные сейсмические исследования, подрядчики, интерпретаторы, 2D и 3D съемки, различные базы данных по скважинам) необходимо использование строгой процедуры гармонизации. Данные были подробно проанализированы и по ним была получена статистика (Рис. 6). Ниже приведены этапы глубинного преобразования и оценены результаты их выполнения. Затем основная карта изогипс сравнивается с другими смоделированными картами для лучшего определения степени чувствительности выделенных объектов к возможным изменениям поля скоростей.

Методика сейсмического глубинного преобразования

Основными входными данными для глубинного преобразования являются поле скоростей ОГТ, система временных отсчетов времени двойного пробега для сейсмического горизонта (Рис. 7) и данные по скважинам. Ввиду сокращения контурных карт до масштаба А4 отдельные изолинии становятся трудноразличимыми, но основные тенденции по-прежнему прослеживаются. Все данные скоростей были приведены к плоскости отсчета, расположенной на 150 м ниже среднего уровня моря с использованием скорости смещения 2100 м/с. В результате возник сдвиг времени двойного пробега в -142 мс. С помощью формулы Дикса скорости были приведены к этой новой плоскости отсчета. Эти скорости получены в результате различных 3D и 2D сейсмических съемок. Во многих случаях наблюдается географическое перекрывание съемок, для этих областей



Рисунок 6 Поточковая диаграмма глубинного преобразования с использованием сейсмического способа вертикального растяжения

необходимо подобрать способ расчета оптимального поля скоростей. В идеале необходимо использовать входные данные, прошедшие DMO-обработку. С 1990-х гг процедура DMO в Омане почти всегда была частью стандартной процедуры обработки PDO. Тем не менее, отсутствие данных DMO не является непреодолимой проблемой, поскольку структурное строение изучаемых мелового/третичного уровней в основном довольно несложно. Только в основных приразломных областях (Maradi и Fahud) наблюдается большая степень тектонического влияния. Сейсмическое глубинное преобразование в этих областях не очень надежно ввиду упомянутой ранее тектонической инверсии. Для указанных областей больше подходят другие способы глубинного преобразования.

Для большинства сейсмических съемок, задействованных в данном исследовании, применялся стандартный граф обработки. Последовательность **Преобразование статических поправок >> DMO >> скоростной анализ (ручная корреляция) >> суммирование трасс >> миграция.**

Многочисленные отражения являются общей проблемой для изучаемого региона, особенно в области малых глубин набора сейсмических данных. Для всех полученных данных удаление (длина расстановки сейсмоприемников) составляет не менее 4,5 км, максимальное удаление для большинства данных составляет 6 км. В качестве контрольных точек при проведении данного регионального исследования были выбраны 255 калибровочных скважин. С помощью обратной интерполяции (интерполированная поверхность грида в отдельных точках (X,Y) между узлами грида) в местах размещения

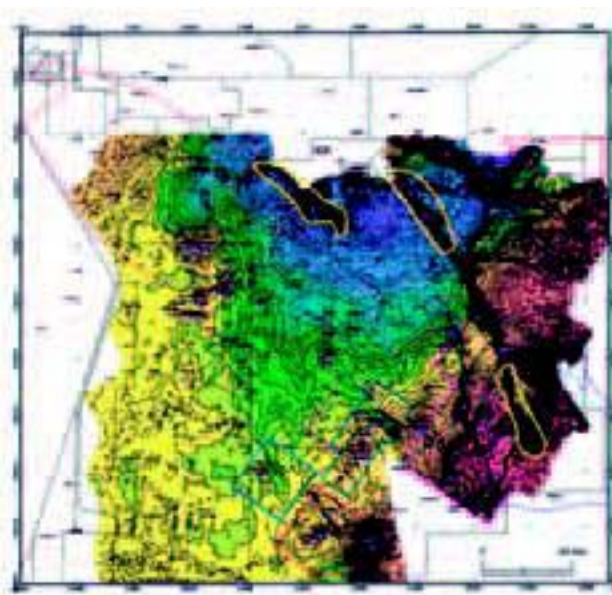


Рисунок 7 Карта двойного времени пробега (TWT) для маркирующего горизонта Top Natih E в Северном Омане. Многоугольниками обозначены различные съемки и зоны тектонических нарушений. Многоугольниками выделенной желтым зоны разломов согласуются с участками, в которых начальная разница между глубиной по скважине и глубиной TDQ составляет более 125 м. Данные области осложнены сильными тектоническими нарушениями и претерпели структурную инверсию в Третичном периоде. Обстановки осадконакопления и сжатия здесь были довольно сложными, что оказало отрицательное влияние на надежность определения сейсмических скоростей. В результате сжатия контурных карт до масштаба А4 отдельные изолинии трудно различимы, но общие тенденции по-прежнему видны. Интервал между изолиниями TWT составляет 25 мс.

скважин можно вычислить среднюю скорость. 15 таких скважин были размещены в областях, подвергнутых сильному тектоническому воздействию, и при проведении указанного глубинного преобразования игнорировались.

Глубинное преобразование отдельных съемок

Повторно приведенные данные скоростей и TWT для горизонта Natih E были загружены в модуль быстрого глубинного преобразования (Time-Depth conversion Quick (TDQ), также известный как Depth Team Express) рабочей станции Landmark™. Как уже упоминалось, данная методика использует функции глубинного преобразования, чтобы осуществить простое вертикальное растяжение и сжатие. Для этого импортированные скорости V_{rms} (скв) были преобразованы в интервальные с помощью формулы Дикса (1955):

$$V_{int\ nth\ layer} = [(V_n^2 T_n - V_{n-1}^2 T_{n-1}) / (T_n - T_{n-1})]^{1/2},$$

где V_n – скорость ОГТ нижележащего слоя; V_{n-1} – скорость ОГТ вышележащего слоя; T_n – время пробега до нижней границы; T_{n-1} – время пробега до верхней границы;

Необходимо принять ряд дополнительных предположений: параллельность границ, небольшие удаления, отсутствие латеральных изменений скорости и углы погружения отражающих границ меньше 5-10°. Теперь можно рассчитать соответствующие временно-глубинные (TD) таблицы. Затем производится их линейная интерполяция и экстраполяция во временной области с целью получения функций для каждой произвольной (X,Y) точки в пределах изучаемого участка. В результате линейной интерполяции между двумя парами TD, ближайшими к расположению TWT целевого объекта получают величины TD для вертикального глубинного преобразования в каждой произвольной (X,Y,TWT) билинейно интерполированной точке. Таким образом, модуль TDQ поможет непосредственно, с помощью линейной интерполяции, получить глубину для каждого временного горизонта, пересекающего область TD, что, строго говоря, не является методом последовательного снятия влияния вышележащих слоев. В действительности вычисляется глубина, соответствующая временной области с помощью интерполяции заданных пар TD и создается новая многопараметровая область TD. В качестве входных данных могут использоваться среднеквадратичные, средние или интервальные скорости. Среднеквадратичные

Таблица 1 Статистика глубин по скважинам и «сейсмических» глубин за время проведения сейсмических съемок, за исключением скважин, расположенных в областях со сложным структурным строением.

Съемка	Средняя невязка по скважинам (м)	Количество скважин
1995	55	27
1997	32	27
1998	29	18
1999	51	3
92_sub-area	49	50
97_sub-area	51	48
99_sub-area	33	52
3D1	41	29
3D2	41	27
3D Barik	46	18
3D MKN	24	3
3DMB	53	7
3D MUS	71	11

и средние скорости программа автоматически преобразует в интервальные. Затем возможно вычисление глубины для любой точки (X,Y,TWT), либо вычисление времени для каждой точки (X,Y,Z). После такого простого глубинного преобразования необходима коррекция глубин с целью учета скважин. Если имеем дело с перекрывающимися сейсмическими съемками, необходимо также проведение процедуры гармонизации.

Грид начальной глубины и гармонизация съемок

Для каждой съемки производится начальное глубинное преобразование. С помощью скважинного контроля можно проанализировать качество данных по скоростям и привести результаты различных съемок в соответствие друг с другом. Значения неисправленных карт изогипс (первичные данные, полученные на выходе TDQ) подвергаются обратной интерполяции в точках пересечения со скважинами, после чего определяется разница между их величинами и глубиной маркирующего горизонта по скважине (Таблица 1). Данные статистики основаны на исходных значениях глубин отдельных съемок в местах расположения скважин. Съемка с минимальной разницей глубин и достаточно большим количеством скважин выбирается в качестве опорной и фиксируется. В случае Natih E в качестве опорного грида была выбрана съемка 1998 год. Различия в глубинах при использовании данных различных скоростных съемок могут быть географически визуализированы в отдельных подземных точках (SSP, sub-surface point). После совмещения данных 2D и 3D необходимо применить определенную степень сглаживания скоростей с целью учета невязок, отсутствия корреляции, эффектов погружения и степени анизотропии. Средняя величина невязки времени двойного пробега на пересечении 2D и 3D профилей составляет 12 мс. Сглаживание выполняется только после того, как данные 3D съемок подвергаются объемному смещению, как описано в следующем разделе. Статистический анализ является основой для гармонизации 3D скоростных полей.

Увязка отдельных съемок

Съемка с наименьшим расхождением глубин, охватывающая большое количество скважин (данные 1998 года) была зафиксирована и выступала в роли опорной системы отсчетов глубин. Прочие съемки были последовательно увязаны с опорной системой отсчетов глубин в перекрывающихся областях (Рис. 8). Количество объемных сдвигов данных вблизи находящихся съемок определялось путем вычисления разницы в перекрывающихся областях для всех глубинных (SSP) точек. Это вновь было осуществлено с помощью обратной интерполяции. Полученное среднее значение разницы было добавлено к системе отсчетов глубин, которая затем была объединена с опорными данными 1998 г. Данная процедура повторялась до тех пор, пока не были добавлены все системы отсчетов глубин и не была получена составная 'мозаичная' система отсчетов глубин (Рис. 9). В результате небольшого ручного редактирования было показано, что изолинии в перекрывающихся областях не были искусственно искривлены. Это объясняется тем, что градиенты, расстояние между изолиниями и начальная форма изолиний во всех перекрывающихся областях были очень схожи между собой. Использование такой методики объемного сдвига дает уверенность в том, что характер или градиент, изначально наблюдаемый в данных скоростей, будет в максимальной степени сохранен. Необходимо отметить, что данная система отсчетов глубин по-прежнему не увязана с глубинами по скважинам.

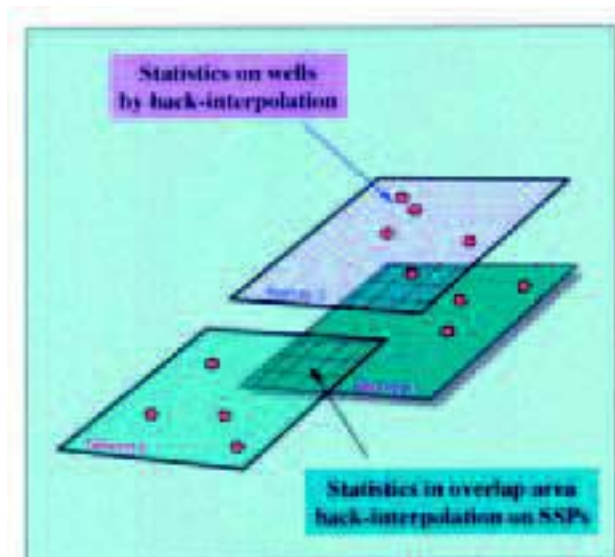


Рисунок 8 С помощью статистики по скважинам с обратной интерполяцией и данных начальных глубин TDQ по глубинным точкам можно осуществить гармонизацию скоростных полей. Для уменьшения величины суммарной погрешности при определении глубин для отдельных съемок вычисляются и применяются усредненные объемные сдвиги данных.

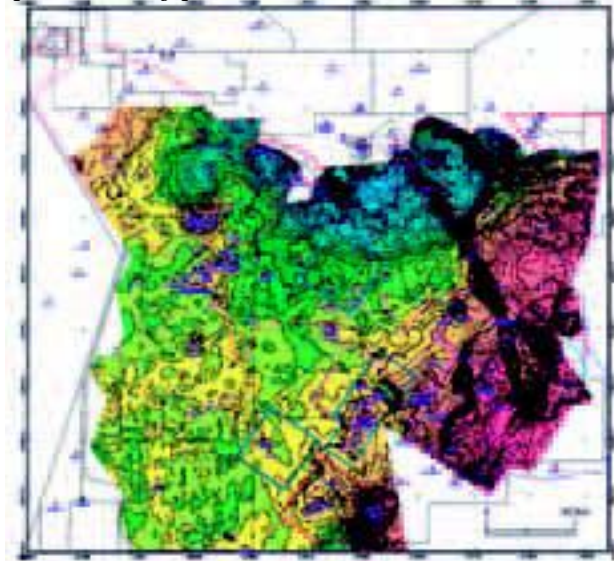


Рисунок 9 Неувязанная 'сбитая' карта глубин маркирующего горизонта Natih E, основанная на мозаичном составлении глубинных преобразований TDQ с использованием данных по 13 отдельным съемкам ОГТ. Интервал между изолиниями глубины составляет 50 м.

Необходимо еще кое-что сделать. В результате объемного сдвига невязки в скважинах будут изменены, иногда – в положительную сторону (т.е. в сторону уменьшения погрешности) но в других случаях – в отрицательную сторону. Это, как будет далее показано, учитывалось на этапе коррекции глубин.

Коррекция остаточных глубин

Составная система отсчетов глубин в скважинах подвергается обратной интерполяции, при этом определяется разность между глубиной маркирующего горизонта по скважине. Коррекция остаточных глубин производится для всей изучаемой площади путем использования весового алгоритма (кригинга). Простой зависимости между погрешностью и отсчетом времени или

© 2005 EAGE

глубиной горизонта не существует. Корректирующая система отсчетов добавляется к составленной карте глубин с целью получения исправленной системы отсчетов глубин, соответствующей результатам исследования скважин. Полученная в результате исправленная карта глубин обладает меньшими погрешностями в областях, удаленных от участков увязки со скважинами, по сравнению с исходной составленной картой глубин (на которой средний разброс значений по скважинам составляет 4%). Распределение увязки по скважинам не является произвольным, прогнозирование в участках, не охваченных бурением, остается весьма проблематичным. Статистический анализ коррекции остаточных глубин в скважинах показывает, что исходная разность между сейсмикой (значения глубин на неувязанной составленной системе отсчетов глубин) и между глубиной по скважине составляет в среднем 51 м. Моделирование многонаправленной вариограммы разностной системы отсчетов выявляет разрыв примерно на 35 м с диапазоном 5000 м в экспоненциальном приближении. Это означает, что в пределах 5 км от точки увязки со скважиной погрешность прогнозирования на окончательной карте глубин будет составлять менее 35 м (при 1 стандартном отклонении). Данное значение ошибки ожидается после коррекции остаточных глубин, поэтому оно подходит для

Расчет карты эффективных скоростей и ее сглаживание

По исправленной системе отсчета глубин была рассчитана соответствующая система отсчетов скоростей ($V_{эфф}$). На этой карте наблюдаются погрешности, возникшие в результате объединения съемок и невязок TWT. Частично они были отредактированы вручную, а впоследствии система отсчетов была пересчитана с увеличением в 5 км, что было сделано с целью сглаживания изолиний. Это простой вариант исправления данных; попыток применить методику усреднения, что было бы лучшим вариантом, не предпринималось. Эти процедуры подавили высокочастотный шум в поле скоростей (Рис. 10).

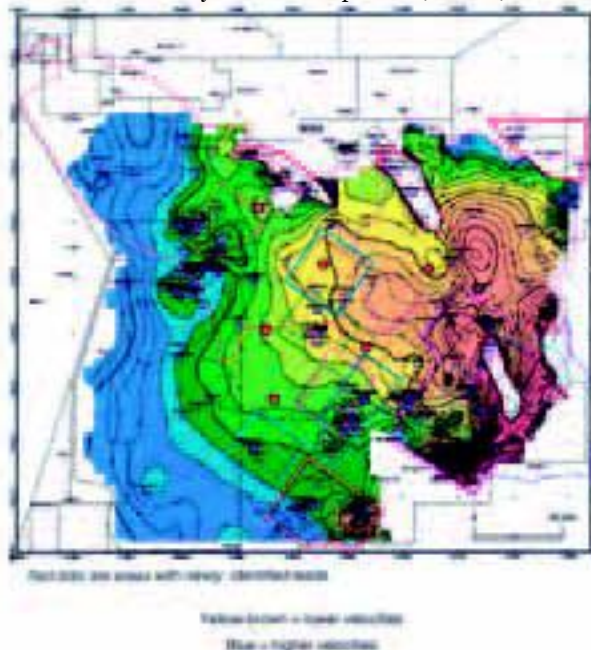


Рисунок 10 Сглаженная карта $V_{эфф}$ горизонта Top Natih E. Сглаживание карты глубин является предпочтительным, поскольку в карте глубин содержится информация как о времени, так и о скоростях. Предполагается, что наилучшей для прогноза расположения маркирующего горизонта является карта времени двойного пробега, которую не следует изменять произвольно. Интервал между изолиниями скоростей составляет 50 м/с.

Небольшое исправление (фильтрация) значения VCP по скважинам гарантирует, что полученная в результате карта глубин будет соответствовать глубинам по скважинам. Существует риск того, что сглаживание затронет высокочастотные аномалии, связанные с геологическими изменениями в перекрывающей толще. Сглаженная система отсчетов $V_{эф}$ и несглаженная система временных отсчетов объединяются для получения окончательной карты глубин. Применение сглаживания непосредственно к исправленной системе отсчетов глубин отразилось бы в нежелательном структурном сглаживании.

В зонах тектонических нарушений, характеризующихся инверсионными геологическими структурами (напр. области Fahud и Maradi), разница глубин со скважинами очень большая (превышение при использовании сейсмических скоростей составляет несколько сотен метров). Разброс значений также велик в областях солевых отложений, расположенных на юго-востоке. Все скважины с разницей, превышающей 125 м (таких оказалось 15) были исключены из статистического анализа и не учитывались при проведении окончательного глубинного преобразования. Многоугольники в пределах разломных областей были оцифрованы с целью уменьшения влияния больших исправлений глубины в процессе построения системы отсчетов и контурирования остаточных глубин. Предполагается, что в некоторых случаях большой разброс глубин возник в результате того, что поле сейсмических скоростей не было адекватно мигрировано в областях с резким тектоническим погружением. Искривление пути луча в расчет не принималось. Определение скоростей ОГТ автоматически производилось перед этапом временной миграции, DMO – преобразование не всегда производилось предварительно. Сдвиги латеральной миграции для крутопадающих слоев могут быть довольно большими (cf. Hutton et al., 1996; латерально > 1600 м, вертикально 180 мс), также изменится вертикальный временной отсчет. Прочими причинами являются:

- неверная корреляция скоростей ввиду отсутствия трасс и/или наличия помех
- неверная временная корреляция маркирующего горизонта на сейсмических разрезах
- явление выветривания на взбросо-надвиговых блоках разлома
- влияние газа
- неподходящие для применения формулы Дикса условия

Оценка региональной карты глубин горизонта Natih E

С целью сохранения максимального пространственного разрешения окончательные системы отсчетов были рассчитаны с инкрементом 200 м. При использовании больших инкрементов (напр. 500 м) необходимо соблюдать осторожность. Сглаженная система отсчетов эффективных скоростей была подвергнута фильтрации с целью установления соответствия со средней скоростью по скважинам от поверхности до горизонта, рассчитанной с использованием глубины по скважине и отсчета времени пробега (OWT). Для получения окончательной системы отсчетов глубин данная система отсчетов скоростей умножалась на исходную карту OWT горизонта Natih E. В данной временной карте содержатся небольшие отклонения, непосредственно относящиеся к локальным перекрывающим скоростным аномалиям (напр. Выклинивание известняков Simsima; Al-Mahrooqi и др., 2000). Для подсчета геологических изменений в перекрывающей толще необходимо картирование внутренних структур. Дополнительную информацию о скоростном составе малоглубинных отложений, не доступную МОГТ, в данном случае можно получить с помощью МОВ. Необходимо провести анализ начальных скоростных разрезов с целью установления наличия полезной информации (напр. подвергающаяся интерпретации энергия отражений, точная кинематика и/или инверсия

скоростей с глубиной).

Окончательная карта глубин (Рис. 11) показывает, что большинство скважин были пробурены на локальных поднятиях, в пределах, по крайней мере, одной замкнутой изолинии глубины (интервал между изолиниями 25 м). Данное наблюдение внушает уверенность в том, что карта глубин в действительности соответствует основной карте.

Непроверенные купола на увязанной карте глубин Natih E

На окончательной карте глубин Natih E было выявлено 6 малоамплитудных глубинных куполов. Большинство из них соответствуют куполам TWT, но их формы наглядно отличаются. Глубины куполов варьируют в пространстве. Эти ловушки расположены в различных структурных областях; основываясь на возможном типе нефтенасыщения, типе коллектора (напр. Natih E или A/B) и географическом местоположении с учетом возможных продуктивных пород можно произвести их сортировку (cf. Terken, 1999). На юге присоединение к глубинному интервалу материнской породы (Huqf) осуществляется посредством разломов, что вносит дополнительную сложность в модель нефтенасыщенности.

Категорически важно убедиться в правильности временных изолиний в исследуемой области вблизи обнаруженных ловушек, поскольку эти данные являются основными исходными данными при проведении процедуры глубинного преобразования. Необходимо подробное исследование перекрывающей толщи с целью установления наличия резких изменений мощности и литологического состава, оказывающих сильное влияние на поле скоростей. Кроме того, необходимо установить вид и степень структурной деформации. Например, если замкнутая область с глубиной увеличивается и расширяется - это может быть признаком того, что данная структура возникла в результате тектонических процессов, а не

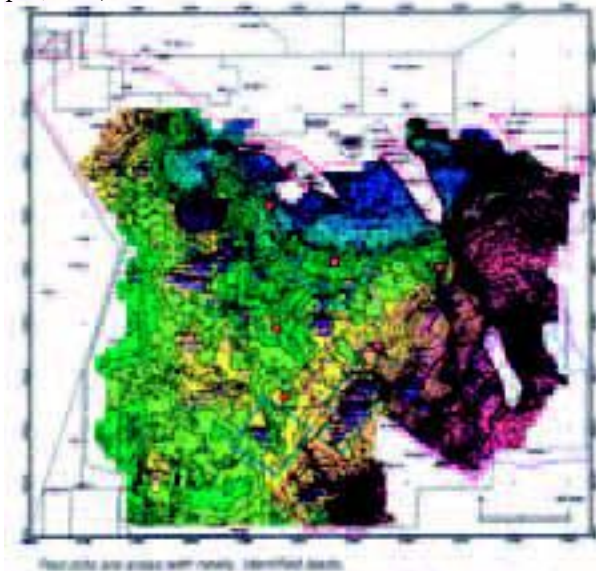


Рис. 11 Исправленная окончательная карта глубин маркирующего горизонта Top Natih E. Красными точками обозначены области куполов, требующие дальнейшего изучения. Необходимы дополнительные исследования характеристик коллектора с целью уменьшения риска и повышения надежности сортировки этих объектов. Интервал между изолиниями глубин составляет 25 мс.

возникла в результате аномалии скоростей малоуглубинной верхней части разреза. Такие аномалии зачастую обладают вертикальными границами, а их влияние с глубиной уменьшается.

Необходимо также провести корреляцию скоростей по ловушкам для установления возможных разрывов. По опыту известно, что геофизики-обработчики не учитывают инверсию скоростей с глубиной, но такие инверсии имеют место, напр. граница, расположенная под Rus FM. Повторная корреляция кинематических поправок на разрезах ОГТ, совместно с полной интеграцией характера изменения скоростей по скважинам, повысило бы надежность поля скоростей. Для улучшения данных по скоростям также рекомендуется тщательный анализ целостности горизонта. Для решения некоторых проблем со скоростными данными, связанным с влиянием перекрывающей толщи, наилучшим образом подошли бы адекватная трассировка лучей и миграция карты. Может оказаться полезным скоростной анализ с высокой плотностью и остаточными кинематическими поправками (анизотропией) (напр. Cambois, 2003).

Хотя какой-либо систематической зависимости между погрешностью глубины и литологией перекрывающей толщи на данном этапе не отмечено, существует корреляция между погрешностью прогноза глубины (разность между начальной глубиной TDQ и окончательной системой отсчетов глубин) и географической областью. Средняя погрешность для Северного Омана по оценкам составляет порядка 9 м. Сейсмический способ имеет систематическую ошибку и оценка прогнозированной глубины в целом оказывается завышенной (Рис. 12). Это соответствует эффекту анизотропии, при котором горизонтальная скорость оказывается на 10% выше вертикальной (Sheriff, 2002). После ввода поправок средняя погрешность уменьшается, но в областях, удаленных от скважин, скомпенсирована не полностью. Коррекция отражает результаты редактирования/сглаживания эффективной скорости и фильтрации с большим оператором, с целью избегания «бычьих глаз».

Погрешности и подсчетные параметры

Для выявленных ловушек были произведены несколько быстрых грубых оценок подсчетных параметров. Погрешности при временной интерпретации и в данных скоростей являются основными входными данными. Погрешность глубины в скважинах вычисляется из исходной карты глубин, полученной сейсмическим способом, средняя коррекция исходных значений глубины составляет около 50 м. Эти значения формируют систему отсчетов, таким образом, строится карта остаточных поправок.

Теперь можно немного по-другому взглянуть на погрешность глубин. Карта глубинных поправок может выступать в качестве основы для расчета величины погрешности глубины (Рис. 13а). Поправки глубины вычисляются следующим образом:

Поправка глубины = исправленная глубина – несглаженная неисправленная глубина.

Моделирование вариограммы наглядно отображает пространственное изменение системы отсчетов глубин и выявляет разрыв в 35 м на удалении 5000 м от точки увязки со скважинами (Рис. 13б). Это означает, что средняя погрешность на больших удалениях

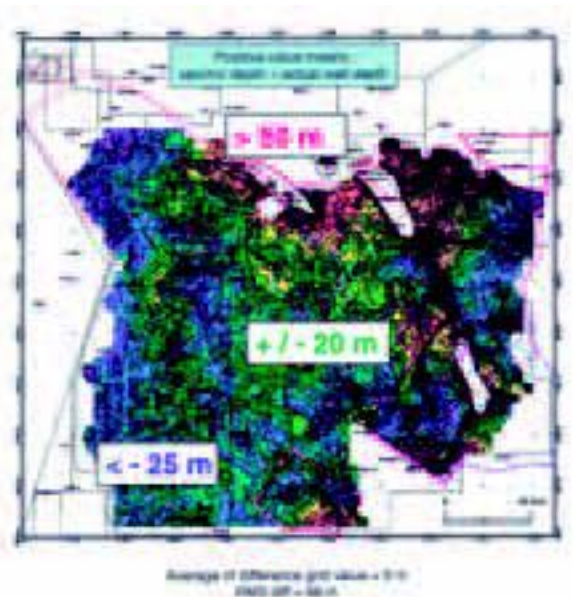


Рис. 12 Карта погрешности глубины для глубинного преобразования TDQ верхней части Natih E в Северном Омане. Производная среднеквадратичной скорости (RMS diff) является средней величиной значений разностной системы отсчета и наталкивает на мысль о разбросе в данных. Интервал между изолиниями составляет 25 м.

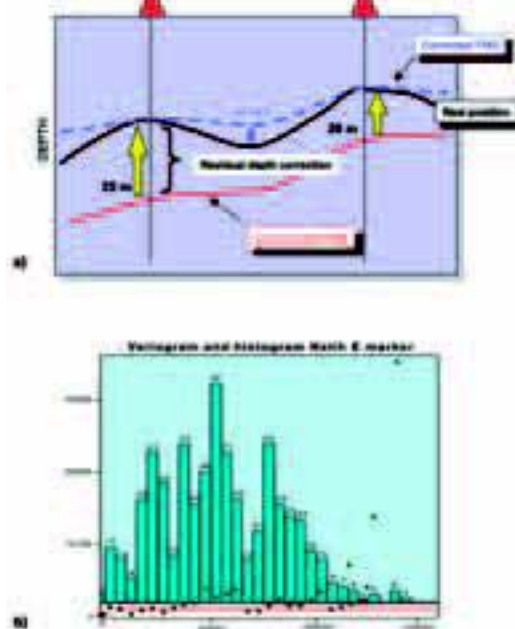


Рис. 13 (а) Коррекция остаточных глубин для неисправленного начального горизонта глубин. Обратите внимание на несоответствие и погрешность исправленного горизонта в соответствии с истинным расположением отражающего горизонта на удалении от области увязки со скважинами. **(б)** Вариограмма, рассчитанная в Sigstave™, показывает пространственные изменения в поправках остаточных глубин для маркирующего горизонта Natih E. Простая экспоненциальная кривая с радиусом корреляции 5000 м и плато 35 м была использована в качестве грубого приближения. Для удалений, не превышающих 35 км, прогнозирование выполняется удовлетворительно.

от точки увязки со скважинами в системе отсчетов составляет порядка 35 м. Вариограмма также показывает, что на удалении в 2.5 км средняя погрешность оценивается равной 15 м. Удаление в 2.5 км, равное половине удаления диапазона, выбрано не случайно, а с целью показать влияние на прогноз близрасположенных точек увязки. Эта погрешность в 15 м заключена в приближенной экспоненциальной кривой, которая демонстрирует скорость изменения погрешности с удалением. Погрешность может быть разделена на 2 части: низкочастотная периодическая составляющая и высокочастотная случайная составляющая. Периодическая ошибка может быть распространена на большие площади; она влияет на среднюю глубину купола и, в меньшей степени, на его форму, но это в большой степени зависит от конкретной ситуации и приведших к ней причин. Если бы поправки всюду находились в верном направлении, что спорно, то уменьшение погрешности на опорной карте глубин на удалении от задействованных скважин можно было бы оценить равным 15 м ($= 50 - 35$), что составило бы 0.33 ($= 15/50$) от исходной разницы глубин. Все предположения являются в большой степени упрощенными и, разумеется, улучшение прогноза глубин лучше вывести из набора «слепых» скважин, т.е. не задействованных при вычислениях данных каротажа, хотя скважины и не распределены случайным образом. Фактор $(1 - 0.33) = 0.67$ был округлен до 0.7 и был использован применительно к карте поправок глубин. Система отсчетов в точках размещения скважин была обнулена с целью создания предварительной карты погрешностей глубин.

Для ловушек, выявленных на опорной карте глубин (увязанной карте глубин) был применен метод Монте-Карло. В результате было обнаружено, что некоторые ловушки в серии реализаций остаются довольно устойчивыми. С помощью структурного моделирования была получена объективная и надежная оценка глубинных куполов при наличии достаточного количества факторов и в статистическом смысле было достигнуто схождение распределенных значений к среднему. Подобные вероятностные расчеты необходимы при оценке размеров и рентабельности ловушек.

Ловушки были сортированы на основе объема, погрешности объема и моделей нефтенасыщения, построенных для существующих углеводородных залежей.

Выводы

Однослойное вертикальное глубинное преобразование с использованием полученных сейсмическим способом таблиц T-D, позволяет получить наглядное представление о глубинном структурном строении исследуемого горизонта Natih E, расположенного в северном Омане. Тем не менее, использование этой несложной методики вертикального растяжения и сжатия не учитывает явления искривления лучей. Графики изменения эффективной скорости с глубиной показывают, что функции V_0-K применимы только в ограниченных областях. Использование этих функций применительно к большим площадям, неувязанным со скважинами, является потенциально ненадежным.

В пределах участков, перекрываемых несколькими сейсмическими съемками, необходимо произвести гармонизацию скоростных полей. Региональная карта глубин является еще одним способом ознакомиться со структурным подземным строением и является вспомогательной при оценке рисков, связанных с ранее выделенными ловушками.

Способ сейсмического глубинного преобразования основан на использовании как маркирующих горизонтов с высокой амплитудой, так и малоамплитудных объектов (с меньшим контрастом акустического импеданса), которые могут быть подвергнуты глубинному преобразованию при вводе надежных кинематических поправок. Основным условием является приведение к плоскости отражений по выборкам ОГТ.

Полученные сейсмическим способом скорости, обычно вычисляемые с помощью формулы Дикса, всегда являются неточными, вследствие чего необходима их коррекция. Эти исправления вносятся в точках увязки со скважинами, а затем интерполируются и экстраполируются по всей изучаемой площади. Оценка глубины горизонта в целом получается завышенной (на 5-10%). Статистика для маркирующего горизонта Natih E после устранения выбросов (15 скважин: зона разломов Maradi и соляные структуры) демонстрирует среднюю разницу в 45 м, т.е. погрешность при истинной вертикальной глубине в 1300 м составляет 4%. Эта погрешность уменьшается после увязки со скважинами. Моделирование вариограммы для разницы остаточной глубины в скважинах предполагает среднюю ошибку в 35 м в диапазоне 5 км. На удалении в 2.5 км эта ошибка составляет примерно 15 м. Поскольку картированные смыкания складок для горизонта Natih E по глубине составляют от 25 до 45 м, необходимо убедиться в пригодности исходных данных (картировании времени двойного пробега и/или наличии перекрывающих скоростных аномалий).

Способом сейсмического глубинного преобразования получают основную систему глубинных отсчетов, при этом выделяются области, для которых необходимо проведение более подробных исследований. На окончательно полученной карте глубин горизонта Natih E были выявлены 6 дополнительных ловушек. Скоростные аномалии в верхней маломощной части разреза приводят к завышению и/или завышению на временных разрезах, которые в действительности не существуют. Для решения некоторых из этих проблем необходимо задействовать данные по восстающим скважинам, данные преломления и подробное геологическое исследование перекрывающей толщи. Для выявления поисковых объектов и ловушек рекомендуется использование высокоразрешающей единой для горизонта корреляции скоростей.

Региональное картирование отложений Rus, Base Tertiary и Base Simsim, совместно с данными литологии, полученными по разведочным, эксплуатационным и нагнетательным скважинам, исследуется с целью установления причин латеральной скоростной изменчивости в маломощной перекрывающей толще. Данная процедура позволит повысить надежность картирования коррекции остаточных глубин в верхней части Natih E и категорически улучшит карты глубин. Эти карты в основном необходимы при выявлении небольших ловушек с ограниченной амплитудой антиклиналей, которые не были выявлены ранее.

Благодарности

Мы благодарим компании CGG и PDO за предоставление результатов глубинного преобразования. Хотим особо поблагодарить S. Phelps, H. VanVoorstvader, I. Mandhary, A. McGinn, C. Bolstad, и N. Benjamins за их активную поддержку. Отдельная благодарность B. Riyami, S. Al Hatmy, S. Mazrui и H. Rashdi за оказанную помощь при подборе данных. Jamie Irons и Dave Butcher (служба поддержки пользователей Landmark) оказали существенную поддержку при работе с данными. Был высоко оценен опыт A.Young, E. Lamers, P. Van Krimpen и G. Hoetz

Конструктивные замечания со стороны наблюдателей позволили внести улучшения в материал. В заключение благодарим наших коллег из PDO и CGG, без которых эта публикация бы не состоялась.

Литература

- Al-Chalabi M. [1973] Series approximations in velocity and travel-time computations. *Geophysical Prospecting* **21**, 783-795. Al-Chalabi M. [1994] Seismic velocity - a critique. *First Break* **12**, 589-596.
- Al-Chalabi M. [1997a] Time-depth relationships for multi-layer depth conversion. *Geophysical Prospecting* **45**, 715-720.
- Al-Chalabi M. [1997b] Parameter non-uniqueness in velocity versus depth functions. *Geophysics* **62**, 970-979.
- Alkhalifah T.A. and I. Tsvankin 1995. Velocity analysis for transversely isotropic media. *Geophysics* **60**, 1550-1566. Al-Mahrooqi S., Al-Rawahi M., Filbrandt J., Terken J., and Veeken P. 2000. Simsim carbonate wedges and their impact on Shuaiba prospectivity in North Oman. *GeoArabia*, Geo2000 Abstracts, Bahrain, **5**(1), 28-30.
- Cambois G. [2000] Can P-wave AVO be quantitative? *The Leading Edge* **19**(1), 1246-1251.
- Cambois G. 2003. CGG software reconciles geologists and geophysicists. *First Break* **21**, 12, 25.
- Da Silva M., Rauch Davies M., Soto Cuervo A., and Veeken P. [2004] Data conditioning for a combined inversion and AVO study. *66th EAGE Conference, Paris, Extended Abstracts*, P306.
- Dix C.H. [1955] Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics* **20**, 68-86.
- Dutta N.C. [2002] Geopressure prediction using seismic data: Current status and the road ahead. *Geophysics* **67**, 6, 2012-2041.
- Hanna S.S. and Nolan S.C. [1989] The Maradi fault zone: evidence of Late Neogene tectonics in the Oman mountains. *Journal of the Geological Society of London* **146**, 867-871.
- Hatton L., Worthington M.H. and Makin J. [1996] *Seismic Data Processing, Theory and Practice*. Blackwell Publishing, Oxford.
- Loosveld R.J.H., Bell A., and Terken J.J.M. [1996] The tectonic evolution of interior Oman. *GeoArabia* **1**, 1, 28-51.
- Marsden D. [1992] Vo-K method for depth conversion. *The Leading Edge* **11**, 8, 53-54.
- Oterdoom W.H., Worthing M.A., and Partington M. [1999] Petrological and tectonostratigraphic evidence for a mid-Ordovician rift pulse on the Arabian peninsula. *GeoArabia* **4**, 4, 467-500.
- Robein E. 2003. *Velocities, Time-imaging and Depth-imaging in Reflection Seismics: Principles and Methods*. EAGE Publications, Houten, The Netherlands.
- Schulz P. [1999] *The seismic velocity model as an interpretation asset*. SEG/EAGE short course no.2, Houston.
- Sheriff R.E. [2002] *Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics*, 4th edition. SEG, Tulsa.
- Terken J. [1999] The Natih petroleum system. *GeoArabia* **9**, 2, 157-180.
- Thomsen L. [2002] Understanding seismic anisotropy in exploration and exploitation. SEG DISC No. 5, short course handout.
- Van Buchem F., Razin P., Homewood P.W., Philip J.M., Eberli G.P., Platel J.P., Roger J., Eschard R., Desaubliaux G.M.J., Boisseau T., Leduc J.P., Labourdette R., and Cantaloube S. [1996] High-resolution sequence stratigraphy of the Natih Formation (Cenomanian/Turonian) in northern Oman: Distribution of source rocks and reservoir facies. *GeoArabia* **1**, 1, 65-91.
- Veeken P.C.H. [2005] Seismic stratigraphy, basin analysis and reservoir characterisation. In: *Handbook of Geophysical Exploration* (eds K. Helbig and S. Treitel). Elsevier Science Publishing Co., in press.
- Veeken P.C.H. and Da Silva M. 2004. Seismic inversion methods and some of their constraints. *First Break* **22**, 6, 47-70. Veeken P.C.H. and Van Moerkerken B. [2005] Injectites and early post-depositional deformation of Precambrian dolomite rocks in the Huqf Supergroup, northern Oman. 2nd EAGE North African/Mediterranean Petroleum and Geosciences Conference, Algiers, Abstracts.
- Yilmaz O. [1987] *Seismic Data Processing. Investigations in Geophysics*, No. 2. SEG, Tulsa. Yilmaz O. [2001] *Seismic Data Analysis*, Vols 1 and 2. Investigations in Geophysics, Geophysics, No. 10. SEG, Tulsa.