

Двух- и трехмерная литостратиграфическая интерпретация сейсмических данных с целью получения характеристики формации Unayzah в центральной части Саудовской Аравии

Costas G. Macrides, Marty Rademarkers, Frederique Fournier u Pierre Yves Dequirez

АННОТАЦИЯ

В данной статье рассматривается интегрированная литостратиграфическая интерпретация наборов двух- и трехмерных сейсмических данных, полученных по формации `Unayzah в центральной части Саудовской Аравии. Методология включает методику статистического распознавания образов для интерпретации сейсмических фаций. При этом, для прогнозирования свойств коллектора по сейсмическим признакам, применяются подходы, основанные на статистической оценке. Методология позволяет определить пространственную протяженность фации песчаника `Unayzah по площади работ. Это имеет значение для планирования разработки коллектора и определения перспективы разведочных работ на участке, охваченном двумерными сейсмическими данными. Во втором шаге была предсказана средняя пористость коллектора, в дополнение к информации, полученной из распределения фаций. Во всех исследованиях рассматривались статистические неопределенности с целью оценки риска.

ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассматриваются привлеченные методы и результаты, полученные при детальной литостратиграфической интерпретации сейсмических данных с целью контроля изменений в латеральной направлении коллектора `Unayzah (центральная часть Саудовской Аравии). Формация `Unayzah представляет собой сложную последовательность континентальных кластических отложений, состоящих из песков разветвленных русел на равнине (braid-plain) и золотых песков, и пойменных илов. В основном ловушки представляют собой сочетание структурных и стратиграфических составляющих (Evans и др., 1997). Формация `Unayzah ограничена двумя основными несогласиями. Первым несогласием является Pre-`Unayzah (PUU) в подошве формации, которая эродирована в морские глины Qusaiba (исходные породы для Центральной Аравии). Второе несогласие – Pre-Khuff (PKU), в кровле формации, которая перекрывается морскими кластическими отложениями Khuff. Стратиграфическая схема `Unayzah показана на рис.1. Коллектор `Unayzah, сложенный песчаником, является в значительной степени прерывистым, и его пространственные изменения трудно контролировать, используя только скважинную информацию. Следовательно, использование сейсмических данных в целях определения литологии является ключевым моментом разведки и разработки этого коллектора.

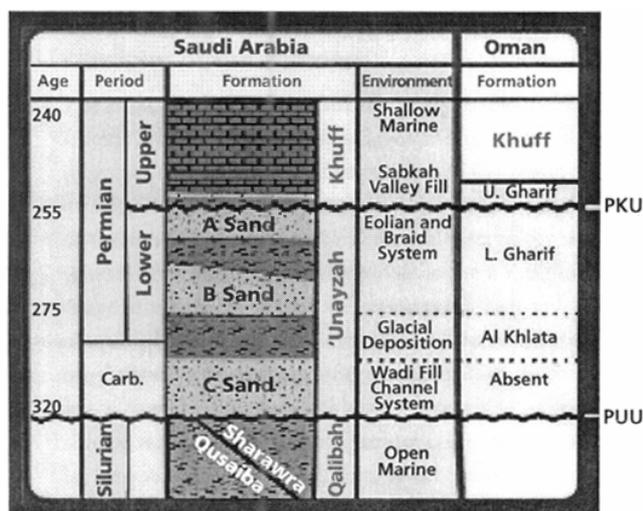


Рис.1. Стратиграфическая колонка формации 'Unayzah

Исследуемая площадь (рис.2) составляет приблизительно 1000 кв. км (386 кв. миль), и простирается от месторождения Ghinah до месторождений 'Unayzah и Layla. Коллектор насыщен легкой нефтью. Исследования сосредоточены на геологических изменениях Upper 'Unayzah (скважины U1 и J1 на рис.3 и 4). В скважине U1 это типичные мощные отложения песчаника (речного и эолового), а в скважине J1 в отложениях Upper 'Unayzah преобладают тонкозернистые алевролиты и глины. Данные по исследуемой площади (рис.2) включают набор трехмерных данных после суммирования, и пять двумерных разведочных профилей, отстрелянных на восток от площади Layla и частично перекрывающихся с трехмерными профилями. Исследования преследуют двойную цель:

Использование трехмерных сейсмических данных с целью улучшения оценки углеводородного потенциала коллектора 'Unayzah путем прогнозирования наличия песчаников, изменений пористости и типов фаций. Двумерные сейсмические профили вносят вклад в идентификацию новых площадей для разведки к востоку от Layla.

Методики, включенные в это исследование, основываются на геологической интерпретации сейсмических признаков, и используют статистическое распознавание образов или оценку. Оба подхода, в свою очередь, основываются на калибровке трехмерных сейсмических признаков по скважинным данным и позволяют давать количественную характеристику неопределенностей, ассоциированных с геологической интерпретацией.

Участок трехмерных сейсмических данных включает 15 скважин, данные по которым подверглись детальной интерпретации. В результате были определены литофации, эффективная пористость, относительное содержание ила, глины и песка, а также рассчитана водонасыщенность. Два из пяти двумерных профилей пересекают этот участок на востоке, где имеются только две скважины (M28 и M32). Они расположены достаточно близко к сейсмическим профилям. К обоим наборам данных (двух- и трехмерным) была применена детальная калибровка по скважинным данным, сопровождаемая стратиграфическим обращением после суммирования (Врас и др., 1992).

Оба набора данных характеризуются сходными полосами пропускания. Кривые псевдоимпеданса, выделенные в восточной части трехмерного обращенного

объема, были использованы для ограничения процесса обращения двумерных профилей. Такая методология обработки позволила существенно улучшить качество данных (спектральное отбеливание и фильтрация помех) и обеспечить строгий контроль сейсмического импульса, что весьма важно для детальной стратиграфической интерпретации. Качество увязки между скважинными данными и прилегающими сейсмическими трассами показано на примере скважины U1 (рис.5). При выборе основных стратиграфических маркирующих горизонтов (Top Khuff, Top Khuff D (ангидрит), Top `Unayzah, PUU) использовался акустический импеданс и коэффициенты отражения, выведенные по результатам обращения. Акустический импеданс, осредненный в 20-миллисекундном окне, которое начинается от кровли горизонта `Unayzah, представлен на рис.6. Результаты обращения, полученные в результате подхода с использованием нескольких трасс и уточненного пикинга, представляют собой исходную точку для последующей количественной интерпретации.

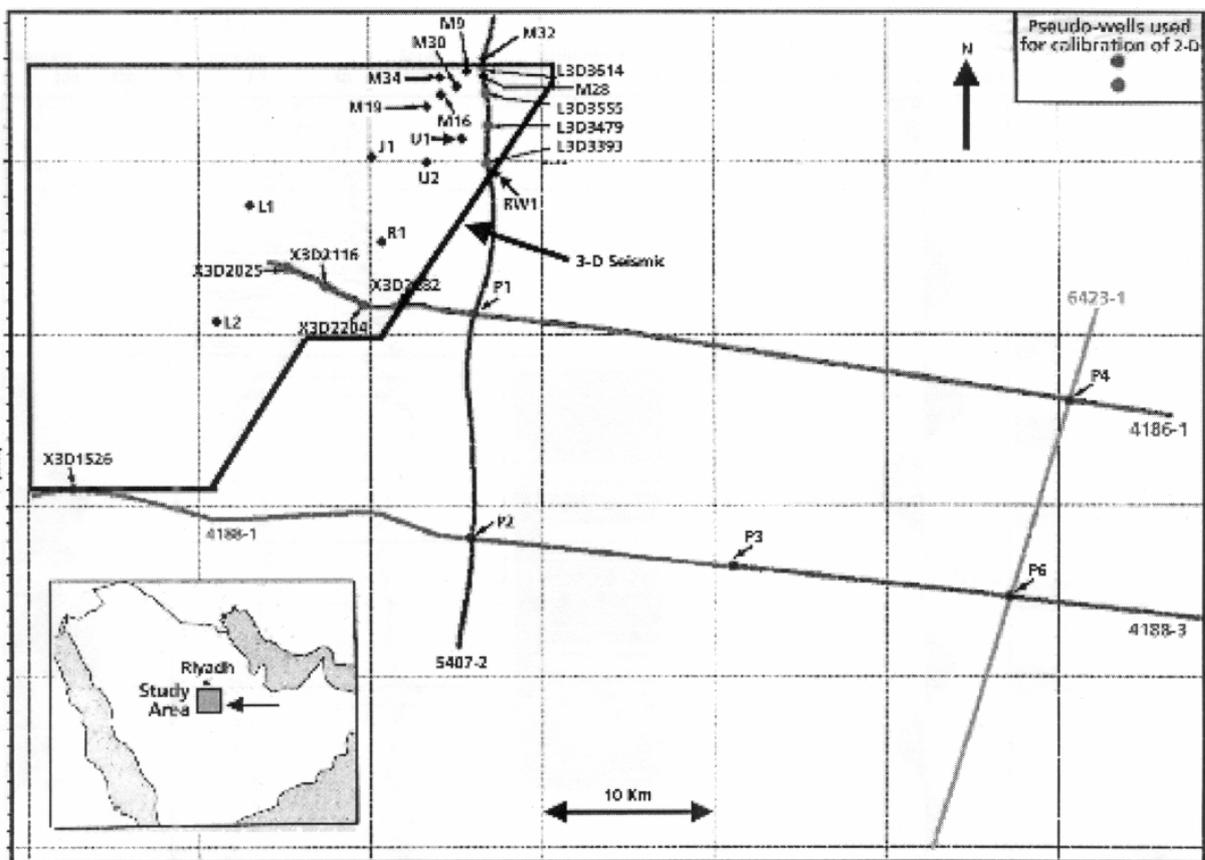


Рис.2. Топокарта исследуемого участка

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ ФАЦИЙ

Принципы подхода

Принцип заключается в автоматическом анализе особенностей сейсмических трасс на уровне коллектора и в соотношении (если это возможно) их изменений с геологическими изменениями коллектора. Методология (рис.7) состоит в описании каждого участка сейсмической трассы совокупностью сейсмических признаков. Эти признаки определяют многомерное пространство, в котором трассы представлены в виде точек, координатами которых являются определенные

величины различных признаков для интересующих нас трасс. В этом пространстве признаков выполняется статистический кластерный анализ с целью группирования сходных трасс. Каждая группа трасс соответствует определенной сейсмической фации. В этих рамках выполняются два комплементарных подхода (рис.8): управляемый и неуправляемый фациальный анализ.

В неуправляемом анализе, сейсмические трассы просто группируются в пространстве признаков с целью определения различных фаций. Наш подход (Fournier, 1997) характеризуется двумя ключевыми моментами.

Во-первых, пользователь предварительно не определяет количество трасс или количество групп, применяя стратегию проб и ошибок. Количество трасс (групп) определяется автоматически на основании естественной структуры трасс в пространстве признаков. Фактически, количество фаций (трасс) соответствует количеству мод, которое представляет многомерная функция плотности вероятности, которая рассчитывается в пространстве признаков с применением кернфункции или методики к «ближайших соседей» (Silverman, 1977).

Во-вторых, чтобы определить классы, мы не делаем какого-либо предположения (непараметрический подход); следовательно, классы согласуются с фактической структурой данных в пространстве признаков. Классы не обязательно имеют скругленную форму вследствие ограничений, накладываемых предположением о гауссовом распределении. Для каждой трассы рассчитывается вектор вероятности присвоения к той или иной фации, и, в конечном счете, трасса присваивается фации с наибольшей вероятностью. Эта вероятность присвоения может быть использована в качестве показателя надежности, ассоциированного с прогнозированием фаций. При неуправляемом подходе, геологическая интерпретация фаций выполняется апостериори, путем анализа соответствий сейсмических фаций трасс вокруг скважин характеристикам коллектора, известным в этих скважинах. Эта интерпретация может быть также подтверждена фациальной классификацией синтетических трасс, ассоциированных со скважинами, или с возможными геологическими фациями коллектора.

В управляемом подходе, геологическая интерпретация сейсмических фаций является непосредственной, поскольку геологическая априорная информация вводится с самого начала в качестве основополагающей для определения фаций. Ввод геологической априорной информации осуществляется посредством обучающих трасс, которые характеризуют изменения, ожидаемые на уровне коллектора. Обучающими могут быть трассы вблизи типичных скважин, или синтетические трассы, ассоциированные с различными геологическими моделями коллектора. Выполняется дискриминантный анализ с целью из всех имеющихся признаков тех, которые позволяют оптимальным образом разделить различные группы обучающих выборок. На основе этих признаков строится функция классификации, которая предназначена для присвоения всех трасс одной из обучающих групп.

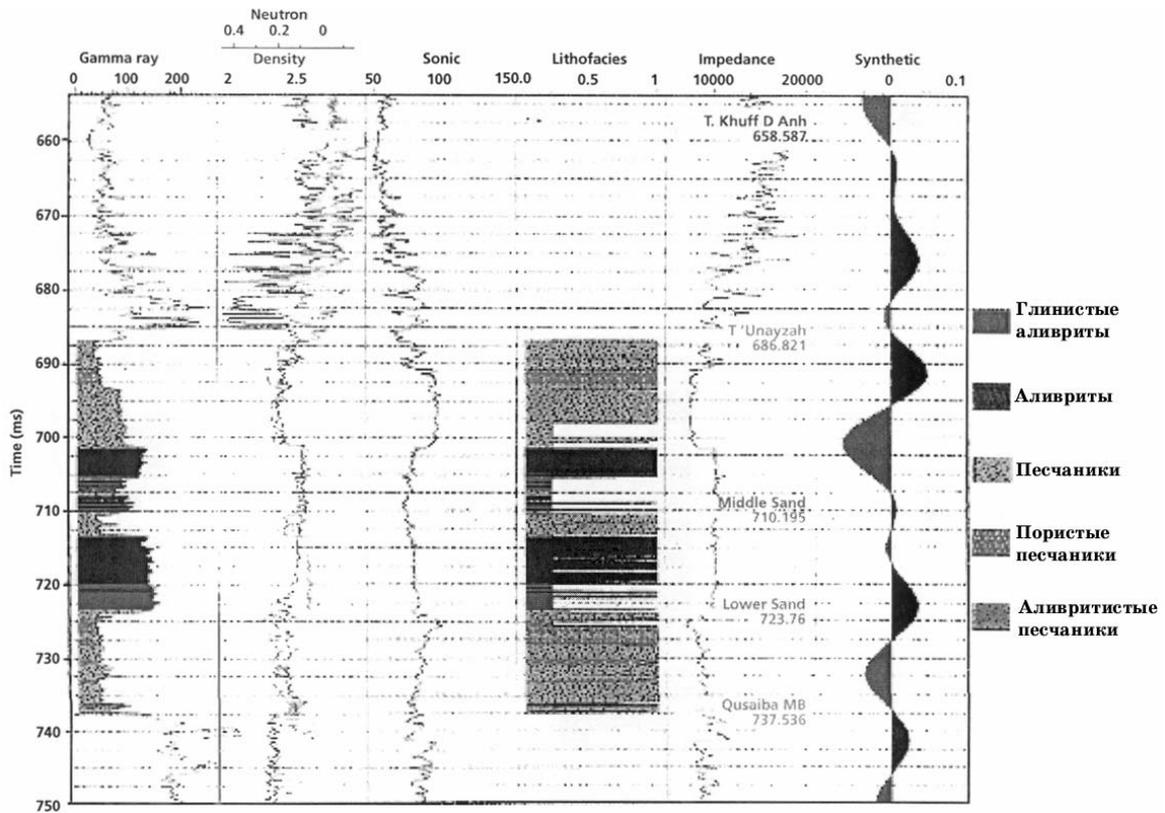


Рис.3. Составное изображение (во времени) по скважине U1 с ассоциированной синтетической трассой (полярность Agatso, в отличие от общепринятой SEG)

Управляемый и неуправляемый подходы представляют собой комплементарные точки зрения сейсмических данных (Dequirez и др., 1995). Неуправляемый процесс допускает связь между данными и, следовательно, обеспечивает «нейтральный взгляд» на изменения на уровне коллектора. Неуправляемый подход может обнаруживать геологические изменения, которые еще не вскрыты скважиной или ожидаются, или сейсмические фации, которые связаны с сейсмическими аномалиями, обусловленными сбором или обработкой данных, а не изменениями коллектора. Однако геологическая интерпретация сейсмических фаций, полученных в результате неуправляемого подхода, иногда затруднена, в частности, при ограниченном скважинном контроле. Напротив, при управляемом процессе, карта фаций уже имеет сопутствующее геологическое толкование. Сложность заключается в возможном искажающем воздействии выявления фаций вследствие ошибочной геологической априорной интерпретации. Следовательно, один из способов контроля надежности результатов управляемой интерпретации заключается в их сопоставлении с результатами неуправляемого подхода. Фации, общие в обоих подходах, являются достоверными; что касается других фаций, требуется более глубокое исследование данных. Независимо от того, какой подход используется, рассчитывается вероятность надежного присвоения какой-либо трассы соответствующей фации. Эта мера неопределенности может быть использована в качестве показателя надежности.

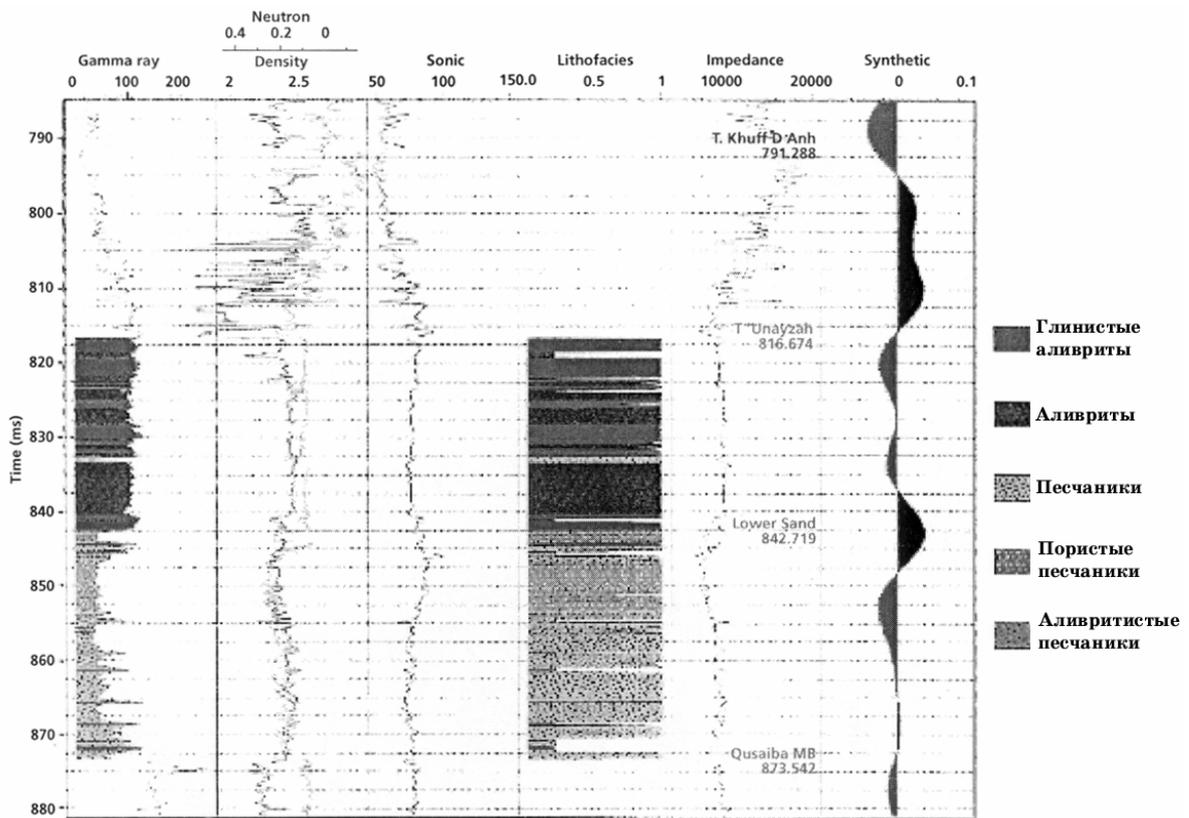


Рис.4. Рис.3. Составное изображение (во времени) по скважине J1 с ассоциированной синтетической трассой (полярность Agatso, в отличие от общепринятой SEG)

Интерпретация сейсмических фаций по трехмерному набору данных

Результаты неуправляемого анализа сейсмических фаций

Исследуется 20-миллисекундное временное окно ниже кровли горизонта `Unayzah; оно приблизительно соответствует формации Upper `Unayzah, мощность которой однородна. Другая причина выбора постоянного, а не изменяющегося временного окна, заключается в недостаточной надежности базисного (basal) горизонта Upper `Unayzah, который весьма сложно пикировать на большей части исследуемой площади. Признаки, определяющее пространство свойств – это коэффициенты отражения различных временных выборок внутри окна, после анализа основных компонентов с целью ограничения количества сейсмических признаков. Коэффициенты отражения получены по стратиграфическому обращению. В конечном счете, были выбраны четыре компонента, которые учитывают 87% общей изменчивости всех трасс. В результате анализа четырехмерной функции плотности вероятности были определены семь классов или геологических фаций; соответствующая карта представлена на рис.9. Для каждой фации, после осреднения трасс, относящихся к фации с вероятностью более 0.85 (рис.10), была рассчитана типичная трасса. Эта репрезентативная трасса демонстрирует сейсмические особенности каждой группы во временном окне Upper `Unayzah.

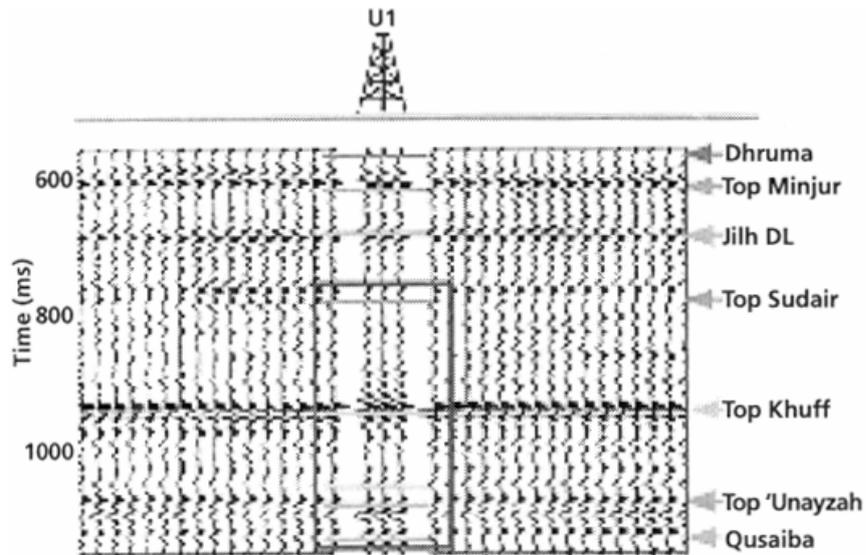
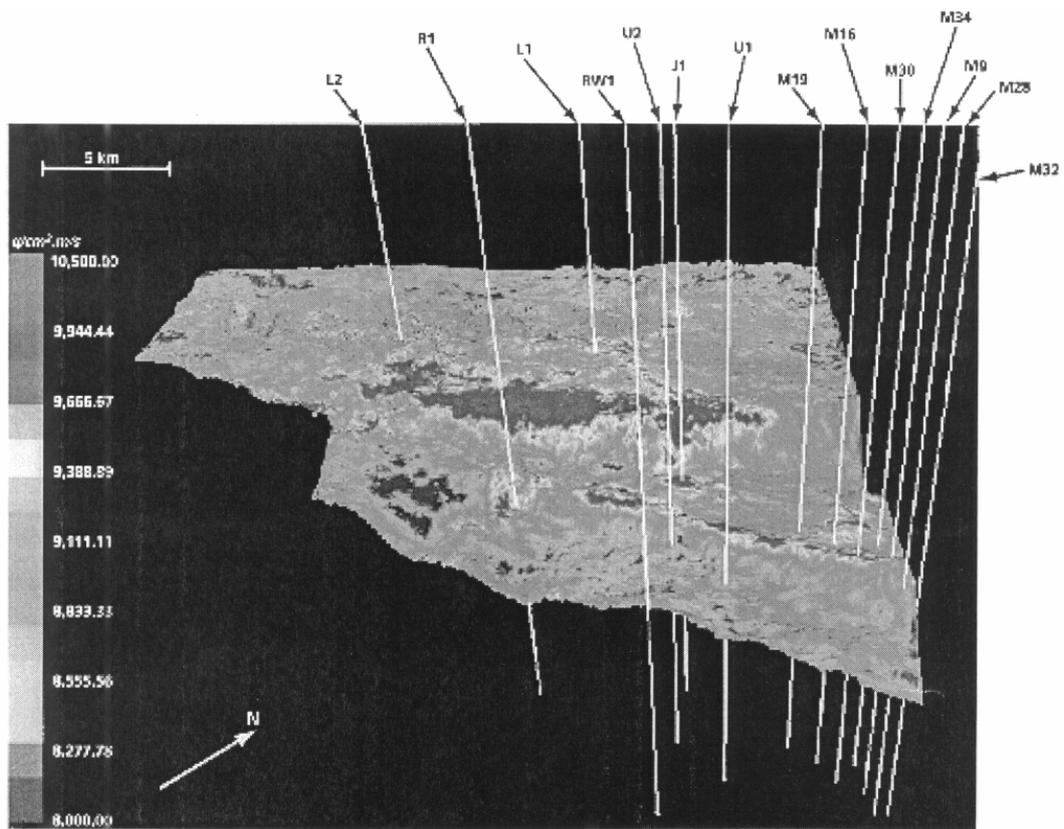


Рис.5. Синтетическая сейсмограмма в сравнении с прилегающими реальными трассами по скв. U1 на профиле 3444 (полярность Агатсо, в отличие от общепринятой SEG)



Средний акустический импеданс
на уровне Upper 'Unayzah

Рис.6. Горизонт Top 'Unayzah, кодированный цветом, с импедансом обращения после суммирования, осредненным в 20-миллисекундном окне ниже кровли 'Unayzah

Фации 1 (светло-синий цвет), 3 (красный цвет) и 5 (розовый цвет) показывают глубокий минимум ниже кровли 'Unayzah, после которой следует дублет с небольшими экстремумами и низкой кажущейся частотой. Изменения амплитуд минимума и дублета выделяют эти три группы, которые пространственно связаны и расположены в основном вокруг скважины L1, скважин M и скважины J1, а также в юго-западной части исследуемой площади.

Для фации 2 (зеленый цвет) характерен широкий, слабый низкочастотный минимум на уровне Upper `Unayzah. Эта фация охватывает основную часть площади вокруг фаций 1, 3 и 5.

Фация 6 (оранжевый цвет) включает весьма ограниченное количество трасс, начиная с максимума ниже Top `Unayzah.

Фация 7 (желтый цвет) представляет особый интерес, поскольку она совпадает со скважиной U1, где Upper `Unayzah демонстрирует мощный разрез песчаников (флювиальных и эоловых). Скважина U2, вскрывшая флювиальные песчаники, также тесно связана с фацией 7, которая снова появляется вдоль тренда «северо-запад – юго-восток» к западу от Layla и имеет характер меандрирующего русла (рис.9). Морфологии трасс фации 7 свойственно наличие умеренного минимума ниже Top `Unayzah, сопровождаемого интенсивными максимумом и минимумом.

Фация 4 (темно-синий цвет) выглядит не сильно отличающейся от фации 7, но характеризуется более слабым максимумом. Она также располагается в центральной западной области трехмерных данных.

Гистограммы вероятности, ассоциированные с определением фаций, показаны на рис.11. В основном вероятность правильного присвоения высока. Для того, чтобы оставить на карте фаций (рис.9) только трассы, которые определяют фации с высокой степенью достоверности, было применено граничное условие (вероятность присвоения не менее 0.9). Выделенные трассы, принадлежащие фации 7, обозначены желтым цветом. Поскольку эта фация пространственно совпадает только с теми скважинами, где Upper `Unayzah показывает наличие песчаника, возможна интерпретация, которая связывает эту фацию с фацией, склонной к опесчаниванию.

Другие прогоны, соответствующие неуправляемым подходам, с другим временным окном или другим количеством главных компонентов, показывают те же основные тренды. Различие между участками L1, M1 и R и зоной U плюс коридор, ориентированный с северо-запада на юго-восток, заметно на всех картах. Важно также подчеркнуть, что пространственные особенности сейсмических фаций для Basal Khuff (с временным окном над Top `Unayzah) отличаются от таковых на карте фаций Upper `Unayzah. Это подтверждает, что особенности фаций Upper `Unayzah не связаны со сбором или обработкой данных, поскольку они изменяются вместе с окном анализа. Геологическое подтверждение и интерпретация результатов неуправляемого процесса довольно сложны вследствие ограниченного количества скважин (некоторые фации не вскрыты скважинами). Кроме того, скважины распределены неравномерно (в основном они сосредоточены на участке M, в северо-восточной части трехмерного блока).

Управляемый анализ сейсмических фаций

В данном подходе, геологическая информация вводится априори, как основополагающая для анализа сейсмических фаций. В управляемом анализе обучающимися считаются те трассы, которые располагаются вокруг скважин, типичных с точки зрения геологии. Привлекаются различные тесты, предназначенные для определения следующих факторов:

- 1) Наиболее отличительных признаков, касающихся искомым геологических изменений, представленных набором обучающих трасс;
- 2) Влияния размера окрестности вокруг обучающих скважин, которая определяет, сколько обучающих трасс будет выделено
- 3) Влияния местоположения скважины; для этого используется начальная точка на уровне коллектора, или точка после выполнения процесса преобразования глубина-время;
- 4) Влияния расстояния в пространстве признаков, которое используется для построения функции присвоения: имеются расстояния, ассоциированные с линейным, квадратичным или непараметрическим анализом. Выбирается расстояние, которое позволяет получить высокий процент правильной классификации для обучающего набора, и с наименьшим количеством признаков.

Здесь скважины U1 и J1 являются обучающими соответственно для:

- песчаников в Upper `Unayzah (фация 1, желтый цвет);
- алевролитов в Upper `Unayzah (фация 2, зеленый цвет).

Некоторые из обучающих трасс, которые выделены вокруг скважин, изображены на рис.12. Анализируется 26-миллисекундное окно, начинающееся от Top `Unayzah. Обучающие трассы на скважине J1 характеризуются глубоким минимумом, после которого следует слабый максимум. На скважине U1 обучающие трассы демонстрируют слабый минимум, сопровождаемый интенсивным максимумом и минимумом.

Линейный – дискриминантный анализ, основанный на величине AMP4 коэффициента отражения на 6 мс ниже Top `Unayzah, является удовлетворительным, поскольку он объясняет 98% разделения двух классов, и обеспечивает стопроцентно правильную классификацию обучающих трасс (с применением процедуры перекрестной проверки).

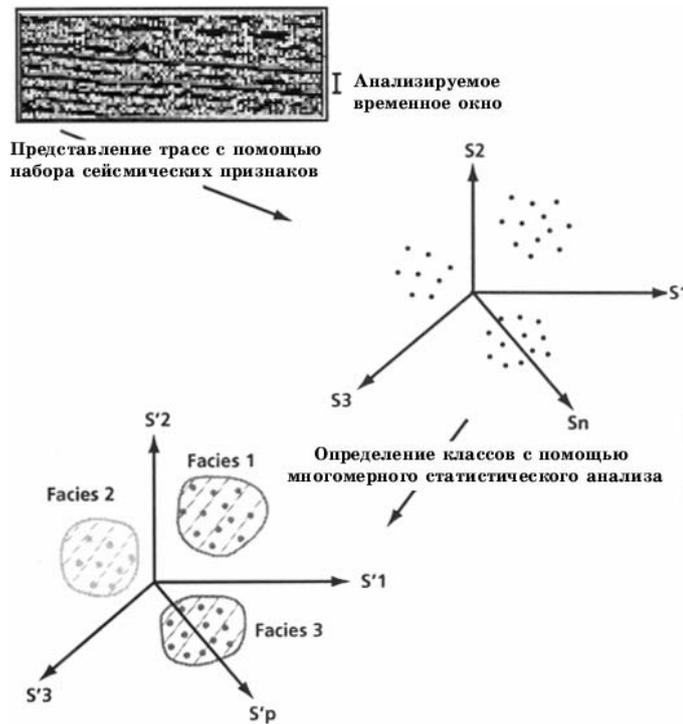


Рис.7. Общая методология анализа сейсмических фаций

Используется обучающий куб вокруг каждой скважины, состоящий из 81 трассы (9×9). Линейный, квадратичный и дискриминантный анализы дают сходные результаты; поэтому мы приняли решение оставить самую простую (линейную) методику. Положение скважины влияет на результаты незначительно; начальное положение дает несколько лучшие результаты. Обучающие трассы и выбранный дискриминантный признак AMP4 позволяют построить функцию присвоения. Эта функция применяется для классификации тех трасс, которые не включены в обучающий набор. Полученная карта фаций представлена на рис.12. В основном трассы вокруг скважин, которые не участвуют в дифференциации, правильно классифицированы относительно известной геологии, и отнесены преимущественно к зеленой фации, ассоциированной с алевролитами. Исключение составляет скважина U2, отнесенная к желтой фации (что также правильно с геологической точки зрения).

Вероятности, ассоциированные с прогнозированием фаций, достаточно высоки; более 90% трасс классифицировано с вероятностью более 95%. Для зеленых фаций (алевролиты) вероятность несколько выше, чем для желтых фаций (песчаники). Пространственное распределение фации типа U1 заметно совпадает с распределением фации No.7, склонной к опесчаниванию, которая определена по неуправляемому подходу (рис.9).

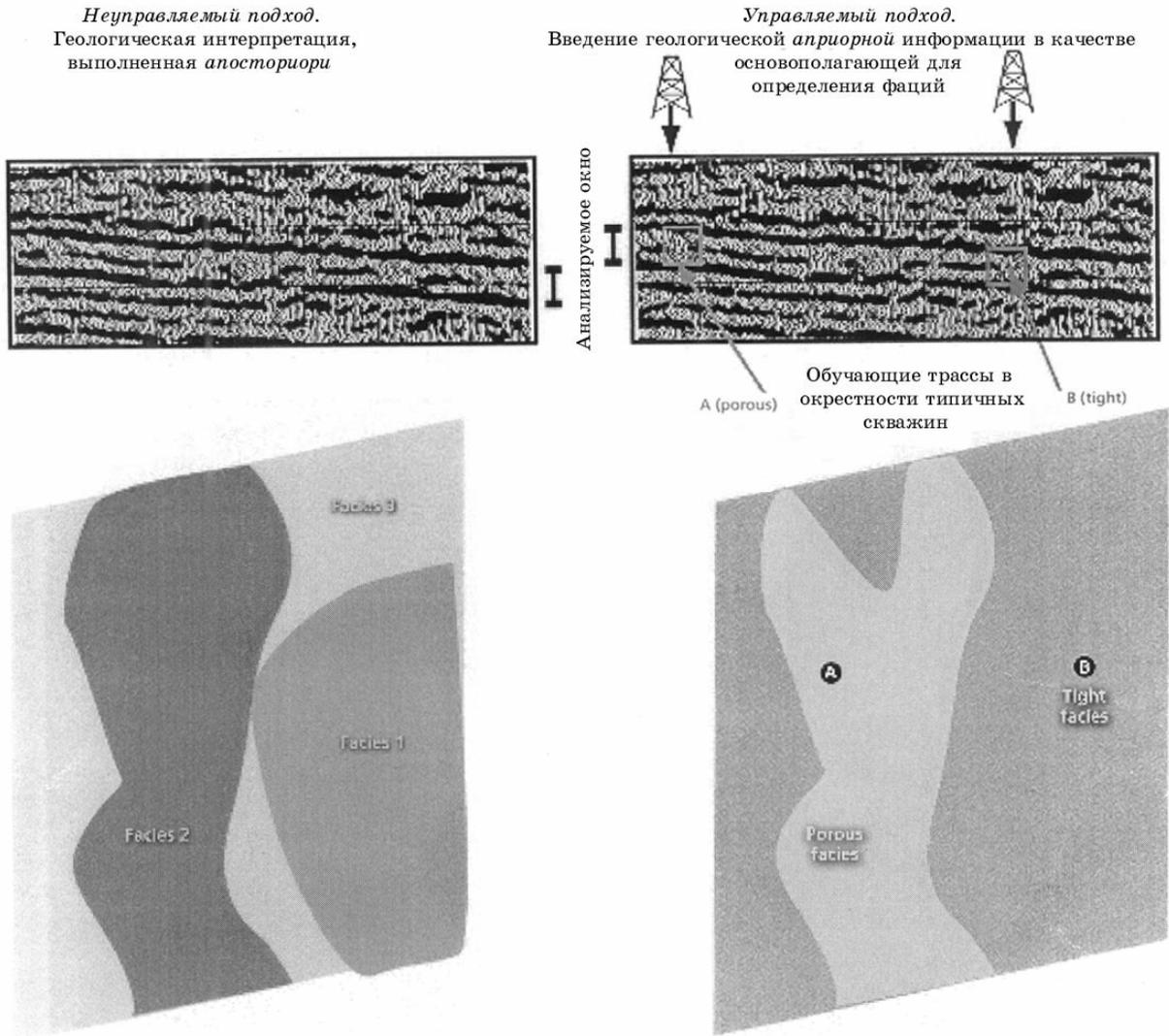


Рис.8. Два комплементарных подхода для анализа фаций

Далее, мы добавили к обучающему набору три скважины, чтобы охарактеризовать (если это возможно) менее заметные изменения в Upper `Unayzah. Снова использовалась окрестность вокруг каждой из скважин, состоящая из 81 скважин. В таблице перечислены пять обучающих групп.

ГРУППА	СКВАЖИНЫ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФАЦИИ UPPER `UNAYZHAN
1.	Скважина U1 (класс 1, желтый цвет) для золотых песчаников
2.	Скважина R1 (класс 2, оранжевый цвет) для типичных глинистых песчаников
3.	Скважина U2 (класс 3, желтый цвет) для флювиальных песчаников
4.	Скважина L1 (класс 4, темно-синий цвет) с алевритами и глинами в Upper `Unayzah, перекрываемыми алевролитами Khuff
5.	Скважина J1 (класс 5, зеленый цвет) с алевритами и глинами

Наиболее различительными признаками являются AMP4, AMP12, AMP14 и AMP8, коэффициенты отражения соответственно на временах 6, 22, 26 и 14 мс ниже маркирующего горизонта Top `Unayzah. Эти признаки обеспечивают надежное различение, но не такое же, как в предыдущем примере с двумя классами. На рис.14 показано пространство различительных признаков (в неполном виде). На этом графике взаимной зависимости, обучающие трассы представлены звездочкой цвета соответствующей фации. Черные квадраты обозначают трассы вокруг скважин, которые не используются в обучающем наборе. Карта фаций с пятью классами изображена на рис.15.

Синтез фациального анализа

Наиболее важным моментом является сходимости между результатами неуправляемого и управляемого (с двумя классами) процессов. Оба подхода обеспечивают выделение фации (она показана желтым цветом). Эта фация совпадает со скважинами, которые показывают высокий процент песчаника в Upper `Unayzah. Напротив, скважинам, где в Upper `Unayzah вскрыты преимущественно алевролиты, никогда не присваиваются желтые сейсмические фации.

Была предпринята попытка различить эоловые и флювиальные пески, используя управляемый анализ на рис.15. В качестве основы взяты 5 обучающих скважин. Полученные результаты оказались не столь убедительными, и различие между обучающими трассами получилось менее заметным, чем ранее. Другой недостаток состоит в том, что для целей взаимной проверки пропускается недостаточное количество скважин. Выявленные тренды существенно отличаются от трендов на карте фаций при неуправляемом анализе. Однако, при объединении фаций 1 и 3 управляемого подхода пятого класса, наблюдаются особенности, характерные для преобладания песка, что весьма сходно с фациями, встреченными в других результатах.

Более детальная интерпретация различных фаций, обнаруженных при неуправляемом подходе, невозможна вследствие отсутствия скважин. Однако, такая интерпретация может быть выполнена, если ввести синтетические трассы, полученные путем прямого моделирования возможных различных конфигураций геологических фаций в формации `Unayzah.

Интерпретация сейсмических фаций по разведочным двумерным профилям

Двумерные сейсмические профили в трехмерном блоке пересекаются только двумя скважинами M28 и M32. В контексте этого весьма ограниченного количества скважин, особенно в восточной части двумерных данных, интерпретация фаций при управляемом подходе на основе трасс, прилегающих к скважинам, невозможна. Остаются два варианта: неуправляемый подход, или управляемые подходы, в которых используются обучающие трассы из набора трехмерных данных. В последнем варианте требуется проверить, что двумерные трассы по особенностям частоты и фазы достаточно сходны с трехмерными сейсмическими трассами.

Для этой цели мы сопоставили оба набора данных в пространстве основных компонентов коэффициентов отражения, полученных при стратиграфическом обращении. Мы проанализировали 20-миллисекундное окно ниже горизонта Top `Unayzah, как определено на двумерных профилях. Затем 11 амплитуд окна были спроецированы на пространство основных компонентов, сформированное амплитудами трехмерных данных (рис.16).

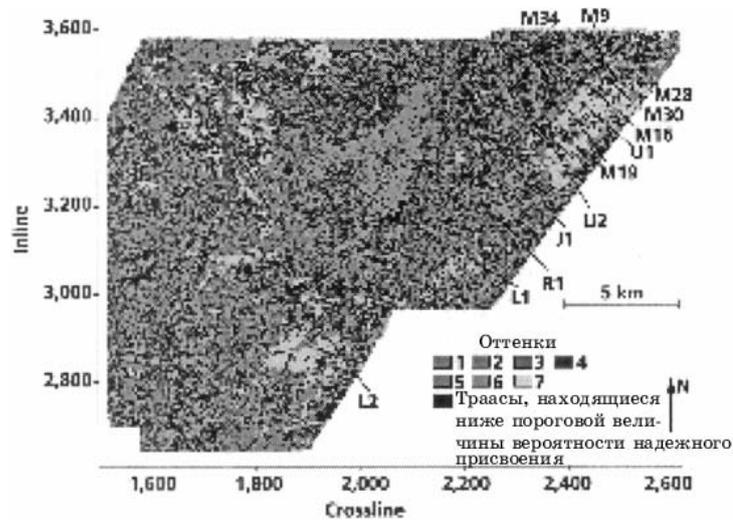


Рис.9. Карта сейсмических фаций для неуправляемого подхода; фация 7, склонная к опесчаниванию, выделена желтым цветом. Пороговое значение вероятности = 0.9

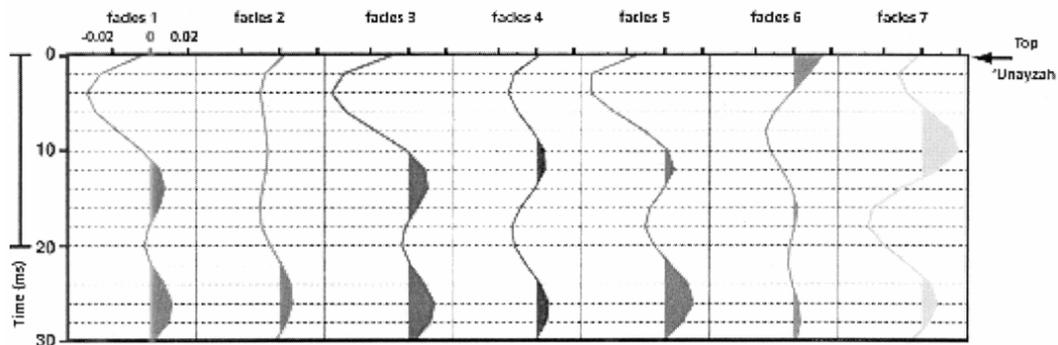


Рис.10. Типичные трассы различных сейсмических фаций, полученных при неуправляемом подходе (полярность Agatso, в отличие от общепринятой SEG)

Просмотр соответственных положений двух наборов данных (двух- и трехмерных) показывает:

- Общую согласованность двумерных данных с трехмерными данными (в единицах разброса и удлинения множества точек);
- Наличие незначительного смещения между двумя наборами точек. Установить происхождение этого смещения не представляется возможным именно из-за его очень малой величины. Возможно, оно может быть обусловлено несущественными различиями, связанными со сбором данных/обработкой, или с изменениями геологии коллектора.

Вследствие этого незначительного различия, мы отдали предпочтение неуправляемой интерпретации фаций. При этом мы все держали в уме (с количественной точки зрения) результаты анализа трехмерных данных.

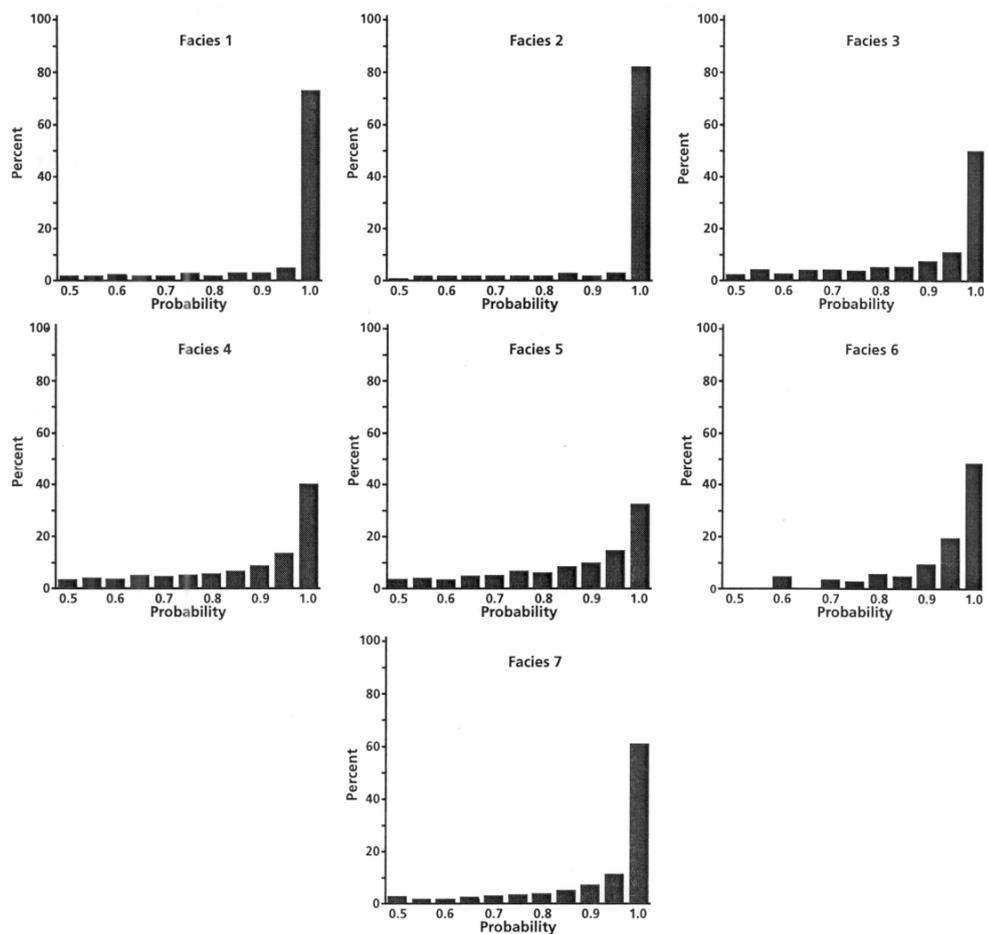


Рис.11. Гистограммы вероятности надежного присвоения для каждой из фаций при неуправляемом подходе

Неуправляемый анализ двумерных профилей

Мы нашли три решения для определения фаций. Эти решения зависят от рассматриваемых признаков (трех или четырех основных компонентов, которые объясняют соответственно 85% и 97% общей изменчивости), и от параметра сглаживания, который используется для оценки многомерной функции плотности вероятности. Расчет основных компонентов выполняется только на двумерных трассах; трехмерные характеристики не оказывают какого-либо влияния на выделение компонентов.

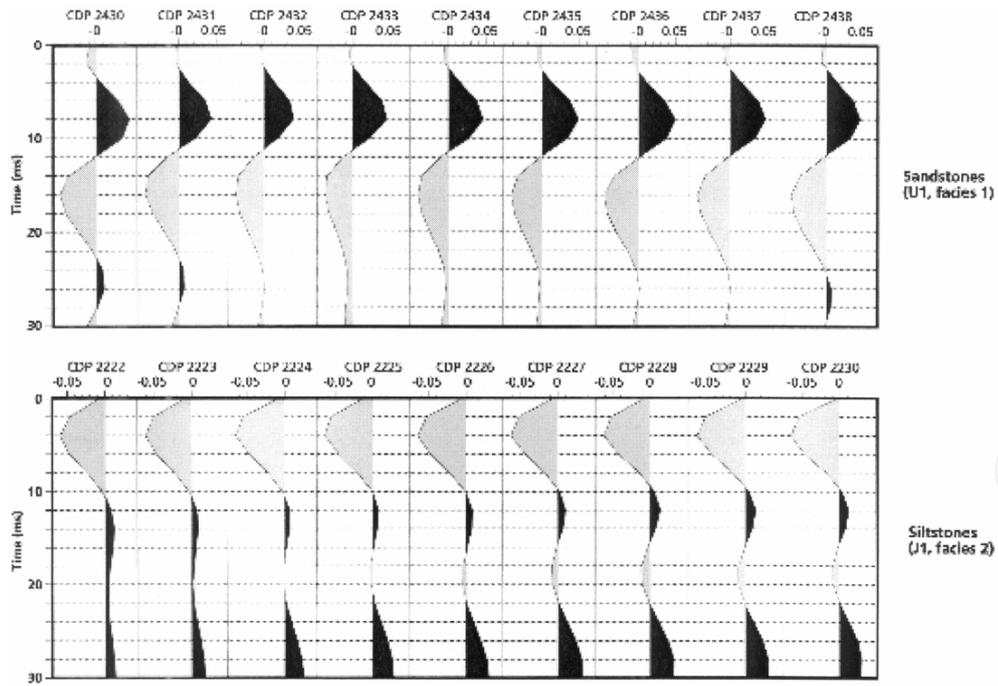


Рис.12. Примеры обучающих трасс (полярность Агатсо, в отличие от общепринятой SEG) для управляемого подхода с двумя классами

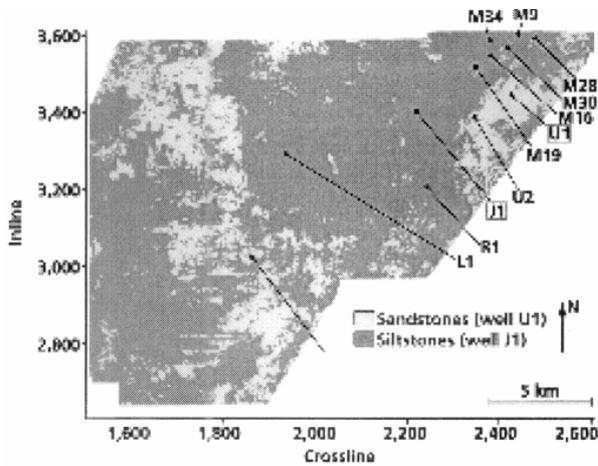


Рис.13. Карта сейсмических фаций для управляемого подхода с двумя классами (U1 и J1)

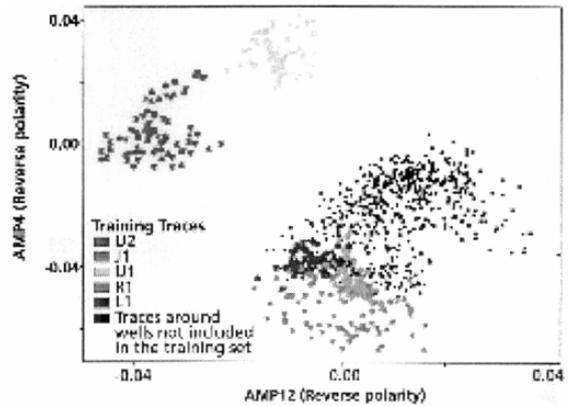


Рис.14. График взаимной зависимости различных признаков AMP4 и AMP12 для управляемого подхода с пятью классами

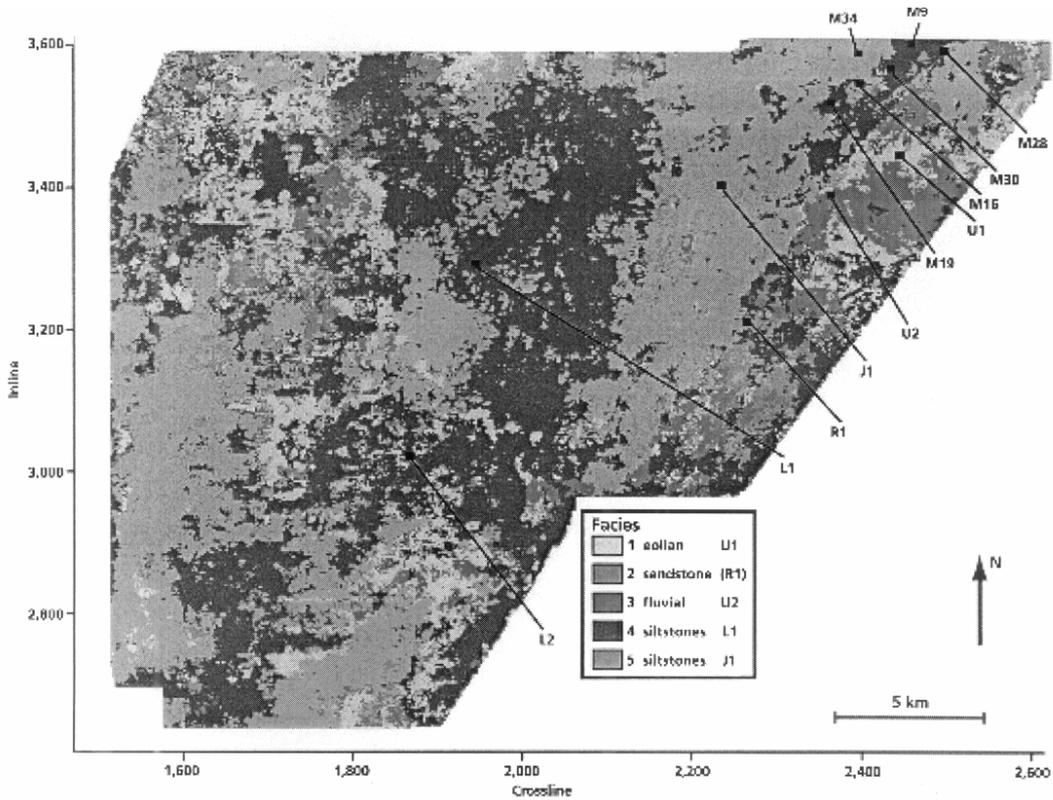


Рис.15. Карта сейсмических фаций для управляемого подхода с пятью классами

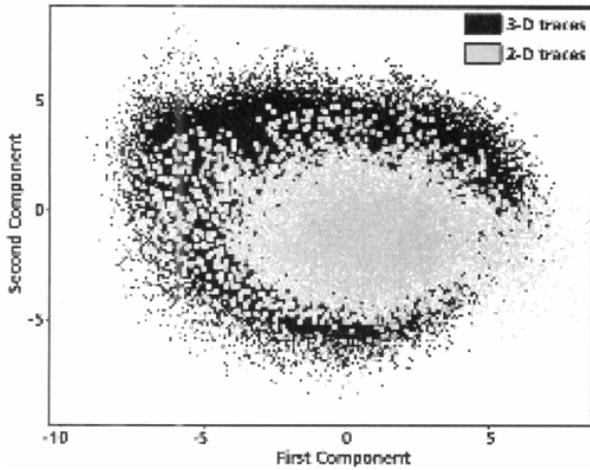


Рис.16. Сопоставление наборов двух- и трехмерных данных в пространстве основных компонентов

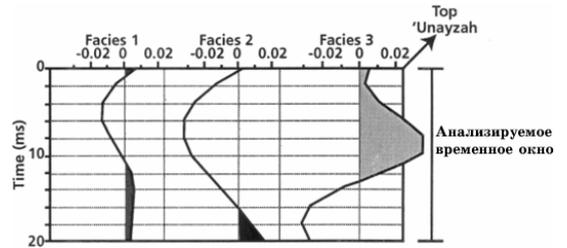


Рис.17. Типичная морфология фаций, полученных при неуправляемом анализе двумерных данных

Во всех случаях, идентифицируется фация с ограниченным пространственным распространением. Она объединяет трассы, сходные типом U1-U2, который установлен на наборе трехмерных данных. Типичная морфология этих фаций (желтый цвет на рис.17) – максимум, сопровождаемый сильным минимумом – существенным образом отличается от морфологии большинства трасс, присвоенных другим группам, где в общем случае наблюдается сильный минимум, сопровождаемый умеренным максимумом (рис.17). Особенности трасс этой фации сходны с фацией 7, выявленной на трехмерных данных, и связаны с наличием песка в Upper Unayzah, но, в общем, они характеризуются более высокими амплитудами.

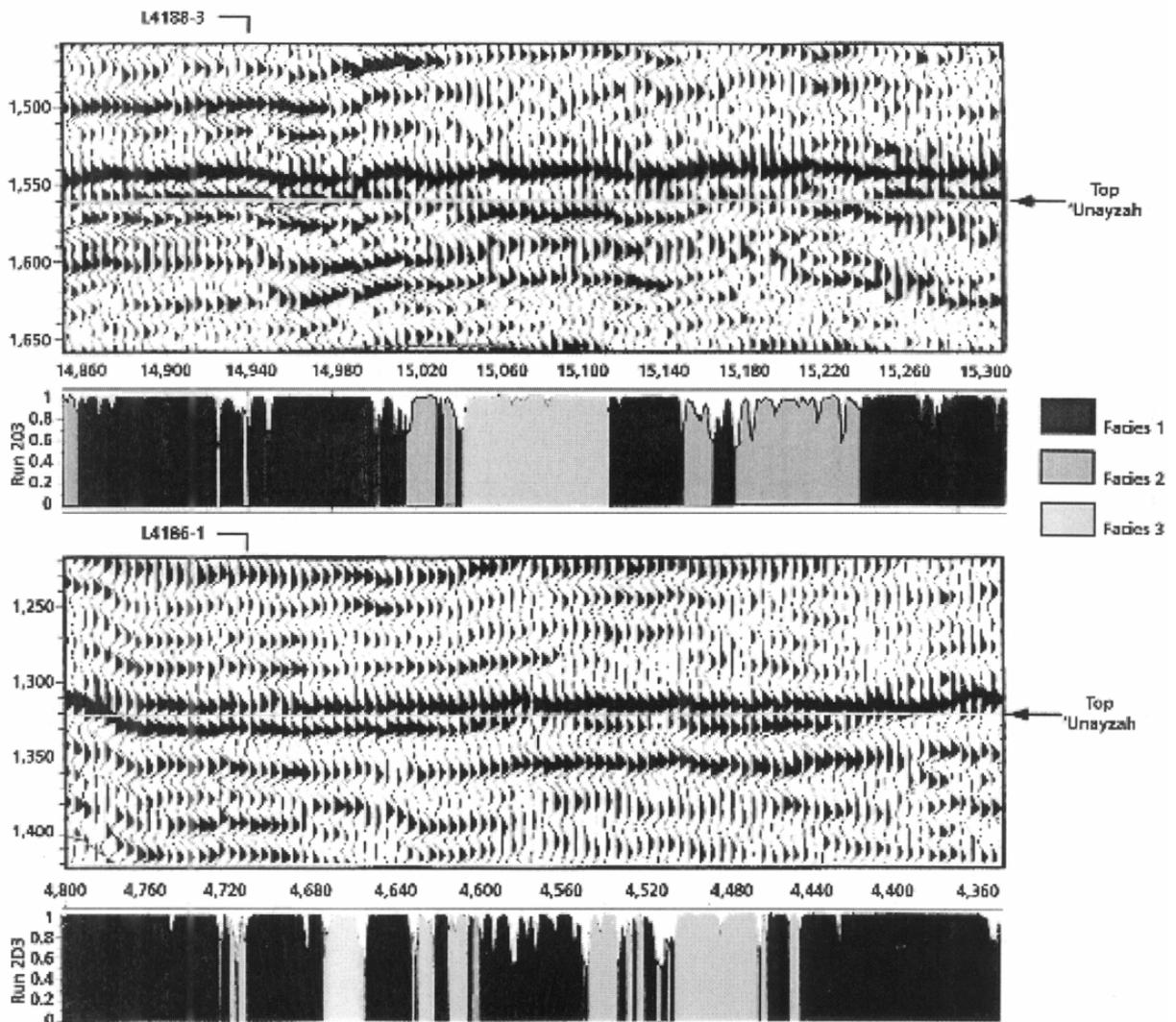


Рис.18. Прогнозирование сейсмических фаций на двумерных профилях L4188-3 и L4186-1. Фация 3, склонная к опесчаниванию, обозначена желтым цветом

Вследствие морфологии и положения в пространстве признаков, желтая фация, общая для трех серий, может иметь геологическую интерпретацию, сходную с желтой фацией, обнаруженной в трехмерных данных – как в управляемом, так и в неуправляемом анализе. Потенциально эта фация может быть связана с наличием песчаников в Upper `Unayzah. Желтая фация распределена в основном на части профилей L4188-3 и L4186-1 (рис.18), где цветовой код показан ниже кривой надежного присвоения.

Итоги анализа сейсмических фаций

Сильными сторонами методологии статистического распознавания образов, которая используется в анализе сейсмических фаций, являются: возможность количественной характеристики неопределенностей интерпретации, способность привлечения геологической информации, и гибкость, которая обеспечивается сочетанием управляемого и неуправляемого подходов. Более того, карта фаций не является картой другого признака, поскольку она оптимальным образом объединяет ряд признаков.

Этот метод обеспечил возможность получения характеристики участков, потенциально склонных к опесчаниванию. Результаты, полученные по трехмерным данным, более надежны вследствие хорошей сходимости между управляемым и неуправляемым анализами, и наличия достаточного количества скважин для ограничения геологической интерпретации сейсмических фаций. Это не относится к разведочным двумерным профилям, отстрелянным к востоку от Layla, где скважинный контроль был весьма ограниченным. Тем не менее, стало возможным идентифицировать сейсмические особенности, потенциально связанные с наличием фации песчаника в Upper `Unayzah. Обширное моделирование может стать дополнительным подходом для подкрепления геологической значимости этой фации.

КАЛИБРОВКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ПО СВОЙСТВАМ КОЛЛЕКТОРА

Основы и методика

Цель данного исследования состоит в прогнозировании средних свойств коллектора с помощью сейсмических признаков. Если анализ сейсмических фаций позволяет выполнить количественную геологическую интерпретацию динамических особенностей, то статистическая калибровка дает оценку и неопределенности свойств коллектора, таких как пористость, относительное содержание минеральных компонентов, литофаций и т.д.

Основой методологии является анализ связи между интересующими нас свойствами коллектора и сейсмическими данными. Если такие связи существуют, строится статистическое соотношение, которое позволяет преобразовать сейсмические данные в связанные с ними свойства в положении каждой трассы (Fournier и Derain, 1995). В окрестности скважин, где имеются геологические и сейсмические данные, выполняется корреляционный анализ. Для представления сейсмических данных может быть использована синтетическая трасса по скважине, или «супертрасса», полученная в результате осреднения реальных трасс вокруг скважины. Чаще всего, синтетические данные могут обеспечить только общее направление в определении признаков, коррелируемых со свойствами коллектора. Это связано с тем, что совпадение с реальными данными никогда не бывает настолько совершенным, чтобы можно было использовать одно и то же статистическое соотношение на синтетических и реальных трассах.

Методика калибровки принадлежит семейству средств статистической оценки. Ее выбор зависит от характера соотношения между геологическими и сейсмическими данными, и от количества скважин. Некоторые методики позволяют оперировать нелинейностью (например, непараметрической регрессией, Joseph и др., 1993), и/или учитывать пространственные связи (например, совместный кригинг – cokriging, Doyen, 1988). Однако эти методики подходят для вывода статистических соотношений из экспериментальных данных только при наличии достаточного количества скважин. Методики оценки могут быть многомерными; следовательно, возможно интегрирование нескольких сейсмических признаков для повышения точности прогнозирования свойств коллектора. Однако количество признаков следует ограничить, чтобы избежать избыточного соответствия (overfit) набора калибровочных данных и прогноза искусственно завышенной производительности.

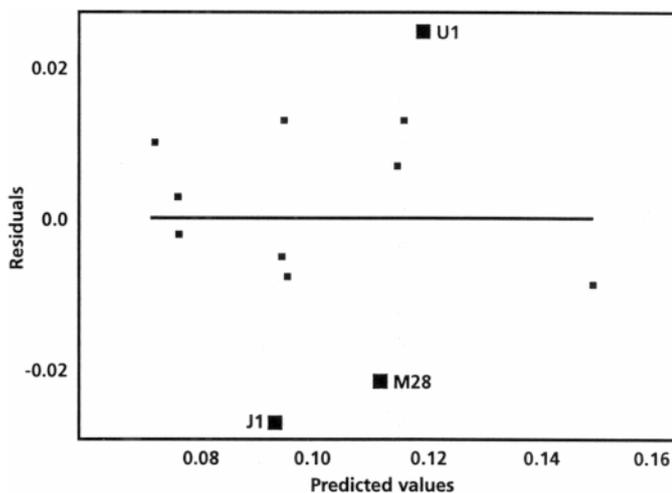


Рис. 19. Графики контроля качества для линейной регрессии средней пористости в Upper `Unayzah

При имеющихся в нашем распоряжении 12 скважинах, мы ограничили выбор методики калибровки линейной регрессией. Это означает, что если мы не видим какого-либо линейного соотношения между искомыми свойствами коллектора и некоторыми сейсмическими признаками, эти свойства не будут предсказаны по сейсмическим данным. Имея большее количество скважин, мы могли бы создать сценарии, учитывающие нелинейность. По этой же причине мы игнорировали пространственные связи, поскольку пространственная модель не может быть выведена из данных. Эта интерпретация была ограничена участком трехмерных работ по причине, которая уже упоминалась при описании интерпретации двумерных профилей.

Свойства коллектора, представляющие интерес

По каждой скважине имеется литофациальная колонка с пятью различными литологиями: глинистые алевриты, алевриты, песчаники, пористые песчаники и алевритистые песчаники. Они были определены в результате электрофациального анализа данных плотностного каротажа, ГК и данных плотности по нейтронному каротажу. Имеются также данные пористости, объема минералов и водонасыщенности.

Было принято решение сосредоточить калибровку на эффективной пористости и относительном содержании литофаций, что необходимо для ограничения геологической модели с учетом информации, полученной по сейсмическим данным. Поскольку сейсмические и скважинные данные имеют разные масштабы, масштаб вышеназванных параметров перед калибровкой был пересчитан. Эффективная пористость была усреднена по разрезу Upper `Unayzah, и, аналогично, глобальные относительные содержания литофаций были рассчитаны в этом интервале.

Регрессионный анализ

Чтобы иметь ориентир для выбора сейсмических признаков, существенным образом связанных со свойствами коллектора, мы систематически анализировали соответствующие графики взаимной зависимости. Что касается сейсмических

данных, мы рассматривали признаки, выделенные из акустических импедансов или коэффициентов отражения (те и другие получены после стратиграфического обращения). Мы проанализировали синтетические трассы, прилегающие к скважинам. Согласно результатам анализа, два параметра существенным образом связаны с сейсмическими данными: это средняя эффективная пористость и относительное содержание песчаников. Для каждого случая, после исследования влияния сглаживания сейсмических данных путем расчета «супер-трассы» на каждой скважине, была построена модель регрессии.

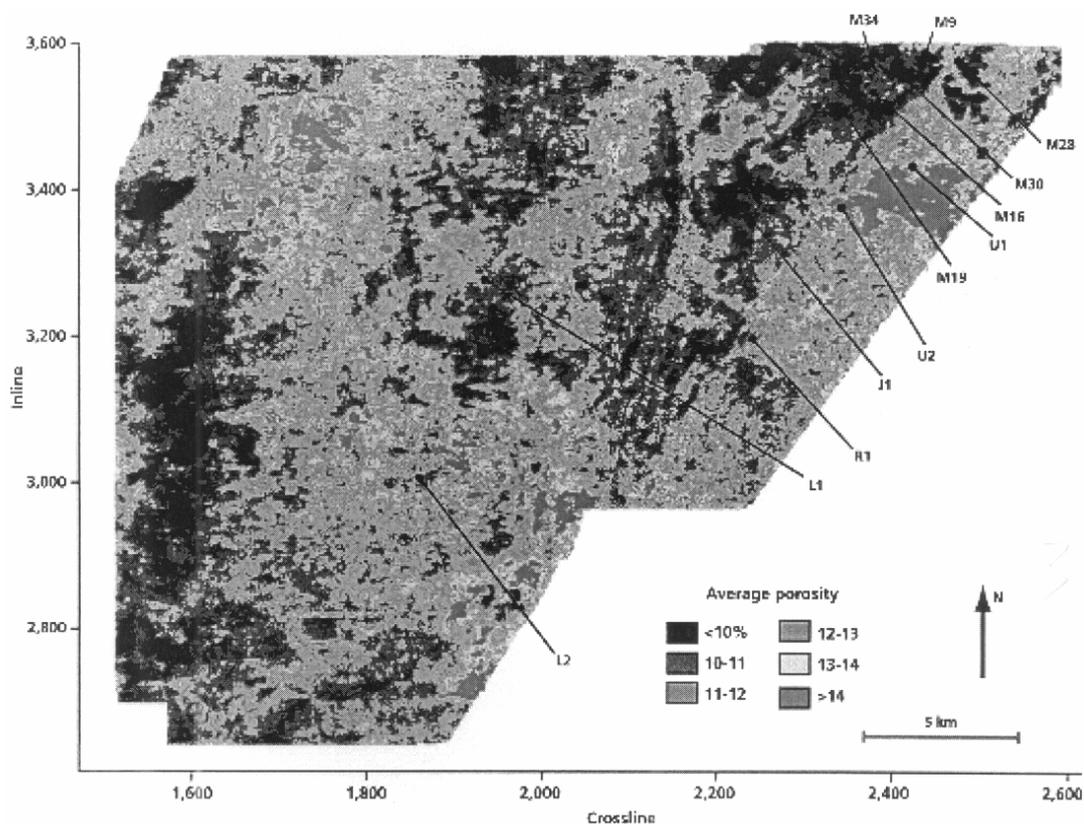


Рис.20. Карта средней пористости, рассчитанной по сейсмическим данным

Лучшая из построенных регрессий для средней пористости в интервале Upper `Unayzah` включает все имеющиеся скважины и основывается на трех коэффициентах отражения на 2, 12 и 20 мс ниже горизонта Top `Unayzah`. Эта модель правильно объясняет данные калибровки (коэффициент отклонения (coefficient of variation) R^2 равен 0.69), и показывает удовлетворительную диагностику качества (рис.19). Построена модель регрессии и для относительного содержания песчаника.

Результаты прогноза

Предыдущие модели, построенные по калибровочному набору данных (12 скважин и ассоциированных трасс), были применены в положении каждой трассы с целью получения оценки пористости и относительного содержания песчаника со связанным доверительным интервалом.

Карта пористости (рис.20) показывает участки высокой пористости вокруг скважин U1 и U2, а также вдоль тренда северо-запад – юго-восток, что совпадает с

распределением «желтой» сейсмической фации, которая связана с наличием песчаника. Карта относительного содержания песчаника показана на рис.21. Хорошее совпадение двух подходов (интерпретации фаций и статистической калибровки признаков) подтверждает действительность интерпретации, поскольку демонстрирует сходимость двух диаметрально противоположных взглядов на данные. Более того, карты пористости и относительного содержания песка дополняют наше представление о коллекторе в пространстве между скважинами. Участки высокой пористости всегда связаны с песчаником на карте фаций. Напротив, некоторые участки, которые, согласно прогнозу, должны быть представлены на карте фаций песчаником, демонстрируют не такую высокую пористость, как ожидалось; возможно, это обусловлено цементацией песчаника.

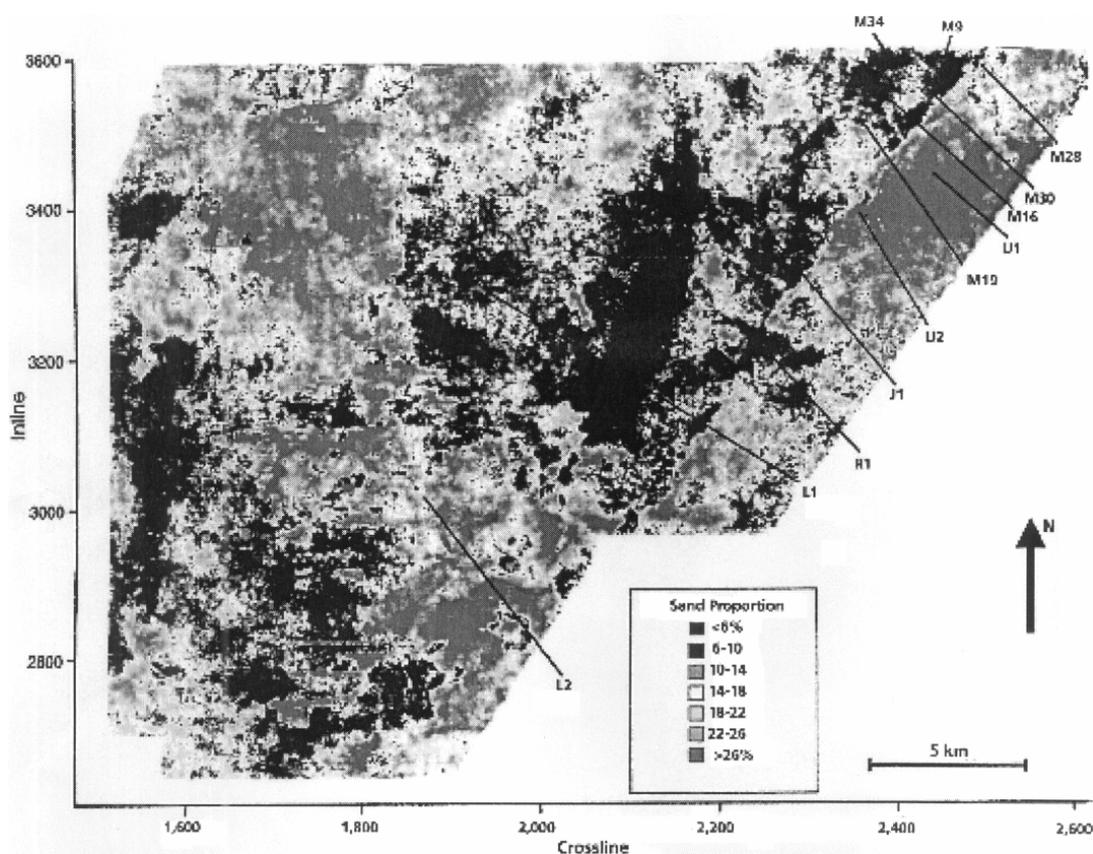


Рис.21. Карта относительного содержания песка, рассчитанного по сейсмическим данным

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена детальная литостратиграфическая интерпретация набора трехмерных сейсмических данных и пяти двумерных профилей по формации Upperg `Unayzah в центральной части Саудовской Аравии. Эта кластическая формация демонстрирует сложные геологические изменения, которые ставят под сомнение разведку и разработку коллектора. В этих рамках мы показали, что сейсмические данные могут вносить существенный вклад в описание изменений коллектора между скважинами.

Анализ сейсмических фаций, основанный на подходе статистического распознавания образов, и выполненный на наборе трехмерных данных, обеспечил проведение геологической интерпретации динамических особенностей с ассо-

цированным критерием надежности. В частности, мы идентифицировали в Upper `Unayzah склонную к опесчаниванию фацию, пространственная протяженность которой была закартирована. Количественная статистическая калибровка сейсмических признаков позволила построить карты средней пористости и относительного содержания песка с ассоциированными неопределенностями. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами анализа сейсмических фаций. Наконец, несмотря на отсутствие адекватного скважинного контроля, стала возможной увязка результатов интерпретации фаций по пяти двумерным разведочным профилям с набором трехмерных данных. Двумерные результаты не столь точны, как трехмерные, но они могут принимать участие в определении участков разведочных работ к востоку от площади Layla. В частности, имеется бесспорное доказательство наличия фации, склонной к опесчаниванию в Upper `Unayzah, которая аналогична фации, обнаруженной в результате трехмерного анализа.