

# МИГРАЦИЯ ДУПЛЕКСНЫХ ВОЛН - МЕТОД КАРТИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТЫХ ЗОН ТЕКТОНИЧЕСКОГО ГЕНЕЗИСА.

Хромова И.Ю., к.г.-м. н.

В статье рассматриваются результаты практического применения миграции дуплексных волн на примере месторождения нефти в Тимано-Печорской провинции.

## Резюме:

В ходе разработки одного из месторождений Тимано-Печорской провинции было выявлено существенное (кратное) различие продуктивности скважин на фоне выдержанного по литологическим и емкостным свойствам карбонатного резервуара. Задача выделения зон трещиноватости по сейсмическим данным решалась в рамках различных подходов: по геометрическим атрибутам, по когерентности, спектральным разложением волнового поля. На последнем этапе была применена миграция дуплексных волн, которая не только подтвердила полученные ранее результаты, но и позволила наиболее четко выделить отдельные линейные аномалии и ранжировать их по проницаемости/экранируемости. Дуплексные волны – это один из типов волн, которые в ходе обработки сейсмических данных, направленной на выделение однократно отраженных волн, воспринимаются как помехи и устраняются. В то же время дуплексные волны содержат информацию о свойствах вертикальных границ и могут быть использованы для построения их изображений. В процессе распространения дуплексные волны имеют два отражения: одно от некоторой базовой границы, другое – от целевой субвертикальной границы. В статье показывается пример использования этих волн для выделения и прослеживания субвертикальных зон трещиноватости в карбонатных коллекторах одного из месторождений Тимано-Печорской нефтяной провинции.

## Введение.

Истощение легкоизвлекаемых запасов нефти вынуждает нефтяников приступать к исследованию и разработке залежей, вмещенных в коллекторах с ухудшенными свойствами, на больших глубинах, в неантиклинальных ловушках, в общем, так, где все труднее и дороже извлекать углеводороды из недр. Ковровое разбуривание в таких условиях становится непозволительной роскошью для многих нефтяных компаний.

В этом свете актуальнейшей проблемой становится обнаружение и картирование зон открытой трещиноватости, дренирующих массивные толщи средне- и низкоёмких коллекторов. Прицельное вскрытие такой зоны может многократно повысить эффективность эксплуатационного бурения и последующей разработки.

При поисках трещиноватых зон следует различать трещиноватость различного генезиса: эндогенного и экзогенного. Трещиноватость эндогенного генезиса напрямую зависит от условий

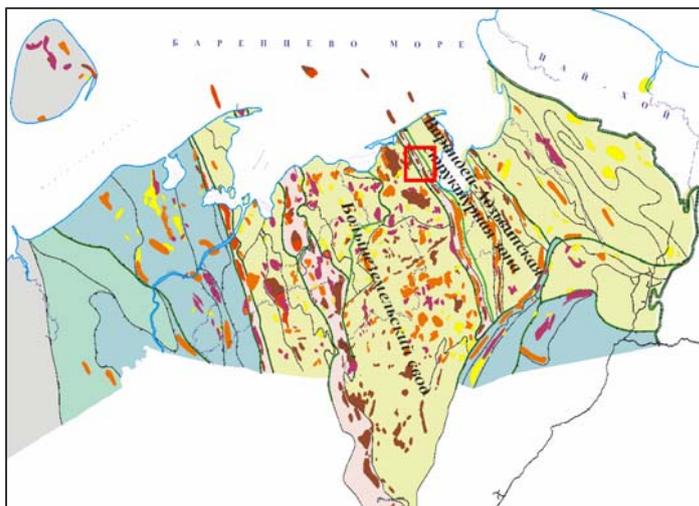


Рисунок 1. Обзорная карта северной части Тимано-Печорской провинции. Красный прямоугольник указывает на местоположение изучаемого месторождения.

осадконакопления и литологического состава пород. Трещиноватость такого рода связана с растрескиванием плотных напряженных пород и носит пластовый характер.

Трещиноватость экзогенного типа возникает в результате приложения внешних сил: разрывов растяжения на изгибе, при сдвиге и пр. Зоны тектонических деструкций в меньшей степени зависят от литологического состава пород и разрушают комплексы пород в субвертикальной плоскости.

В Тимано-Печорской провинции отмечается широкое развитие трещиноватых резервуаров, сформировавшихся вследствие активных тектонических перестроек. Благоприятным полигоном для исследования зон

трещиноватости тектонического генезиса послужило одно из месторождений, резервуар которого сложен пластами карбонатных пород, суммарной толщиной 100-150 метров.

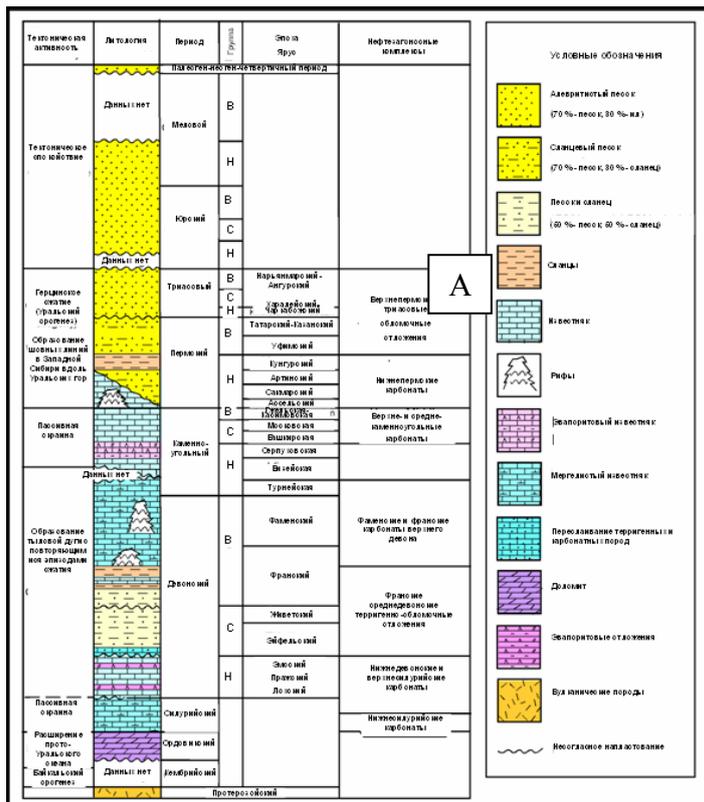
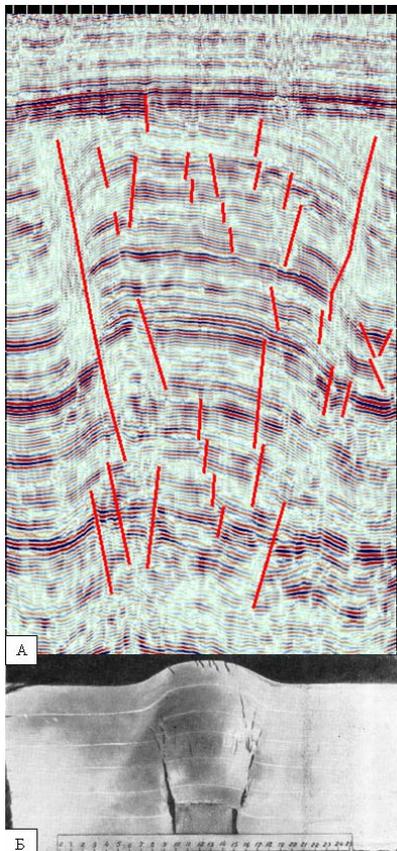


Рисунок 2. Обобщенные данные о стратиграфии, тектонической активности и нефтеносных комплексах пород Тимано-Печорского бассейна.

## Геологическое строение.

Рассматриваемое месторождение расположено в северной континентальной части Варандей-Адзвинской структурной зоны Тимано-Печорской провинции (рис. 1). В строении осадочного чехла (рис. 2) принимают участие терригенно-карбонатные комплексы палеозойского возраста, накапливавшиеся в условиях пассивной окраины Уральского палеоокеана, и терригенные комплексы - продукты разрушения Уральского орогена мезозойского возраста.

Значительный вклад в строение изучаемого участка земной коры внесли разрывные дислокации различного генезиса и времени заложения, связанные со стадийным тектоническим развитием, синхронным эволюции Уральско-Пай-Хойской геосинклинали. Структурообразующими оказались напряжения сжатия, связанные с заключительной стадией Уральского орогенеза – воздыманием Пай-Хоя в позднем триасе. Давление, направленное с востока, явилось причиной



формирования узкого валообразного гребневидного поднятия, надвинутого на жесткое основание Большеземельского свода. Аллохтонный гребень нарушен сколом встречного падения с образованием клиновидного блока, при горизонтальном сжатии выжатом вверх. Клиновидный блок был смят в брахиантиклинальную складку с крутыми внешними крыльями. Внутреннее строение выжатого вверх блока осложнено серией разрывов, оперяющих клинообразующие сколы в основании клина (рис. 3).

Продолжающиеся напряжения сжатия породили в пределах тектонической пластины деформации сдвига. В рыхлых терригенных породах триаса, захоронивших породы резервуара, сдвиг проявлен в образовании вторичных систем S-образных трещин отрыва, направленных под углом 45° к шарниру складки (рис. 4). Направление нарушений запад-северо-западное.

Массивно-пластовая залежь нефти помещена в карбонатном резервуаре раннепермского возраста, который состоит из трёх пачек коллекторов, разделенных уплотнёнными карбонатными прослоями. Верхняя пачка построена органогенно-обломочными известняками и характеризуется выдержанными по площади емкостными свойствами. Средняя пачка представлены известняками интенсивно

окремнелыми (до перехода в карбонатно-кремнистые породы) и

Рисунок 3. А) Временной разрез вкрест структуры, который демонстрирует сложное тектоническое строение валообразного поднятия. Б) Система разрывов, осложняющих модели антиклиналей поперечного изгиба из влажной глины при быстром подъеме жесткой глыбы в основании (по М.В.Гзовскому, Е.И.Чертковой).

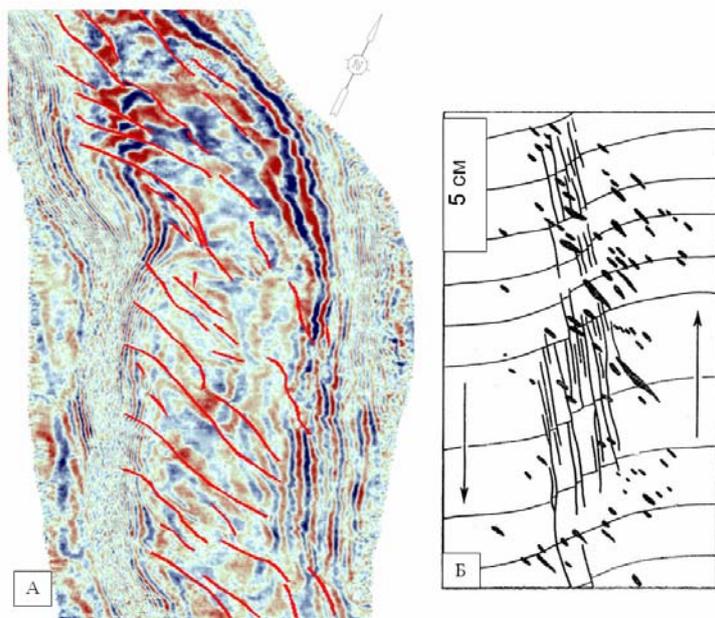


Рисунок 4. А) Временной срез куба сейсмических данных на 100 мс выше целевого объекта. Б) Ряды кулисообразных трещин, предшествующих образованию разрыва, полученные экспериментально во влажной глине (по фотоснимку из работы Е.Клоса, 1955)

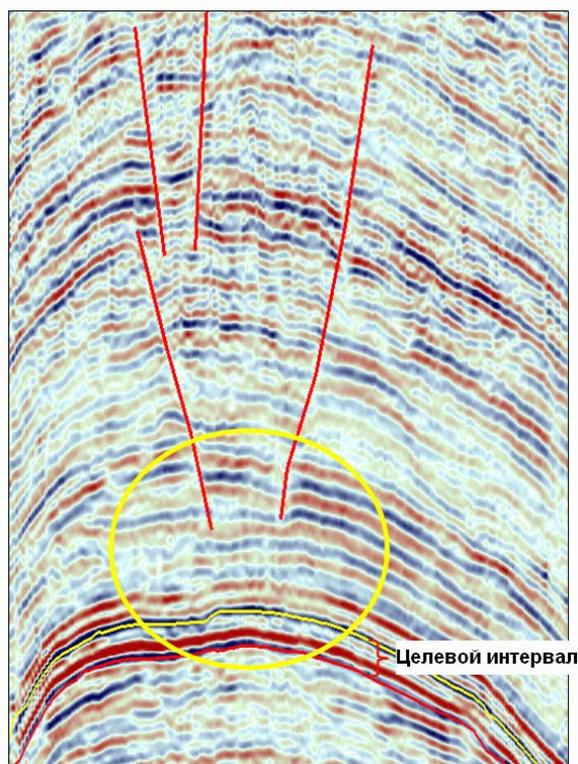


Рисунок 5. Временной разрез, демонстрирующий затухание амплитуды тектонических нарушений вниз по разрезу.

силицитами неравномерно известковистыми, среди которых особое место занимают спонголиты. Породы средней пачки характеризуются более высокой пористостью, чем известняки верхней пачки, но гораздо меньшей проницаемостью. Нижняя пачка характеризуется фациальной изменчивостью и построена породами от чистых известняков рифовых фаций и мелководного шельфа до глинисто-карбонатных пород толщ заполнения. Флюидоупором служит 100-метровая толща кунгурских глинистых отложений.

Амплитуда смещения по сигмовидным тектоническим нарушениям, порожденным сдвиговыми деформациями и раздробившим перекрывающую терригенную триасовую толщу, ослабевает вниз по разрезу и полностью затухает в глинистой кунгурской пачке (рис. 5). Вероятно, в нижележащем однородном карбонатном резервуаре залежи корни этих тектонических нарушений проявляются в виде линейных зон трещиноватости, с которыми связаны повышенные дебиты нефти в скрывающих их скважинах.

### История исследований трещиноватости вместе с историей разработки

На этапе разведки на месторождении по данным 2Д сейсмической съемки была получена карта поверхности кровли карбонатного комплекса, на которой проявилась простая узкая валообразная брахиантиклинальная структура амплитудой 130 м. Было пробурено 9 поисково-разведочных скважин, по кернавым данным определены фильтрационно-емкостные свойства, довольно выдержанные по площади. Однако, дебиты при испытаниях и опробованиях в соседних скважинах отличались кратно: от 5-7 м<sup>3</sup>/сут до 300 м<sup>3</sup>/сут.

Поисково-разведочный этап завершился проведением площадных сейсморазведочных работ, по результатам которых существенно детализировалось строение осадочного чехла:

структурный план месторождения осложнился многочисленными морфологическими формами: куполами, седловинами, структурными выступами и т.д.

Анализ геометрической формы поверхности отражающего горизонта по кровле резервуара показал, что высокодебитные скважины расположены в зонах увеличения кривизны поверхности. Исходя из предположения, что в местах интенсивного изгиба пластов породы подвергаются усилиям растяжения и деструкции с образованием трещиноватых зон, первую эксплуатационную скважину (№12) на месторождении было рекомендовано пробурить в аналогичную зону

повышенных значений кривизны поверхности. Гипотеза о совпадении трещиноватых зон с участками градиентных наклонов поверхности подтвердилась: скважина №12 при испытании дала приток нефти дебитом 190 м<sup>3</sup>/сут при депрессии 0.11 МПа.

Дальнейшее эксплуатационное разбуривание на месторождении велось по регулярной сетке, утвержденной проектным документом. За годы разработки пробурено ещё 14 скважин, существенно отличающихся друг от друга продуктивностью. Особенно удивила скважина №34, которая по данным интерпретации ГИС и исследования керна (сплошной отбор со 100% выносом) характеризовалась самыми высокими на месторождении емкостными свойствами, самыми большими нефтенасыщенными толщинами, и которая дала приток дебитом 6 м<sup>3</sup>/сут, несмотря на все меры по повышению интенсификации притока. В наличие трещиноватости и её огромном влиянии на разработку уже никто не сомневался.

Дальнейшие исследования трещиноватости велись широким фронтом: микроскопические исследования керна, специальные методы ГИС (в основном многоволновая акустика), гидродинамические исследования, интерпретационная обработка данных сейсморазведки. В ходе исследований возникла острая необходимость в ранжировании уровней трещиноватости; различными методами исследований выделялись различные по размеру объекты: **микротрещиноватость**, **мезотрещиноватость**, **макротрещиноватость**.

В каменном материале отмечалась интенсивная микротрещиноватость, но полным выносом керна обладали скважины с относительно низкой продуктивностью. В высокодебитных скважинах керн либо не отбирался по разным причинам, либо не был поднят из-за интенсивной раздробленности.

В 11 скважинах было проведено измерение многоволнового акустического каротажа (ХМАС, АВАК). При интерпретации этих данных во всех скважинах в разной мере отмечалась азимутальная анизотропия скоростей, с повышенной интенсивностью мезотрещиноватости в первом-третьем квадрантах азимутов (0°-90° и 180°-270°, северо-восточное направление). В тоже время, в высокодебитных скважинах в некоторых интервалах присутствовали глубокие каверны, в которых показания акустического каротажа были существенно искажены или даже вообще отсутствовали.

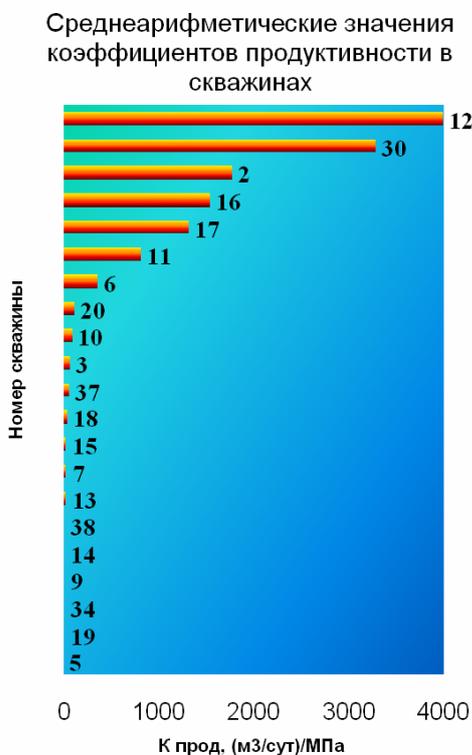


Рисунок 6. Среднеарифметические значения коэффициентов продуктивности скважин (сверху вниз по мере убывания).

По результатам обработки ГИС (методы электрометрии) с учетом информации об интервалах поглощения бурового раствора в процессе бурения в разрезе скважин были выделены предположительно трещиноватые прослои. Характерно, что в большинстве скважин такие прослои были отмечены внутри плотных низкопоровых известняков, разделяющих пачки коллекторов. Только в высокодебитных скважинах такая закономерность нарушалась: предположительно трещиноватые интервалы выделялись дополнительно и в других породах.

Во всех работающих скважинах за годы разработки было проведено около 200 замеров пластового давления (по 3-15 в скважине), 9 замеров дебитометрии, два гидропрослушивания. По данным гидродинамических исследований скважин были рассчитаны коэффициенты продуктивности и проницаемости. В зависимости от режима замера давления, от размера штуцера эти коэффициенты изменялись в определенном довольно широком интервале, что характерно для трещиноватых резервуаров: поведение раскрытых трещин очень чувствительно к создаваемым в ходе замеров депрессиям. Тем не менее, в большинстве скважин на месторождении среднеарифметическое значение коэффициентов продуктивности варьировалось от единиц до первых сотен кубических метров в сутки на

МегаПаскали. Выделялись шесть скважин-лидеров, в которых коэффициент продуктивности превышал 1000 м<sup>3</sup>/сут/МПа, достигая 4000 м<sup>3</sup>/сут/МПа (рис. 6).

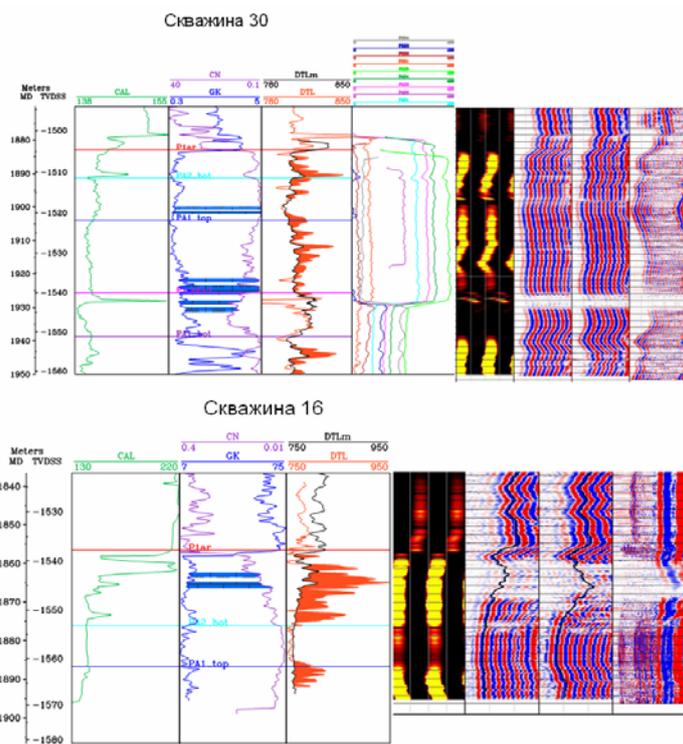


Рисунок 7. Каротажный планшет скважин №30 и №16.

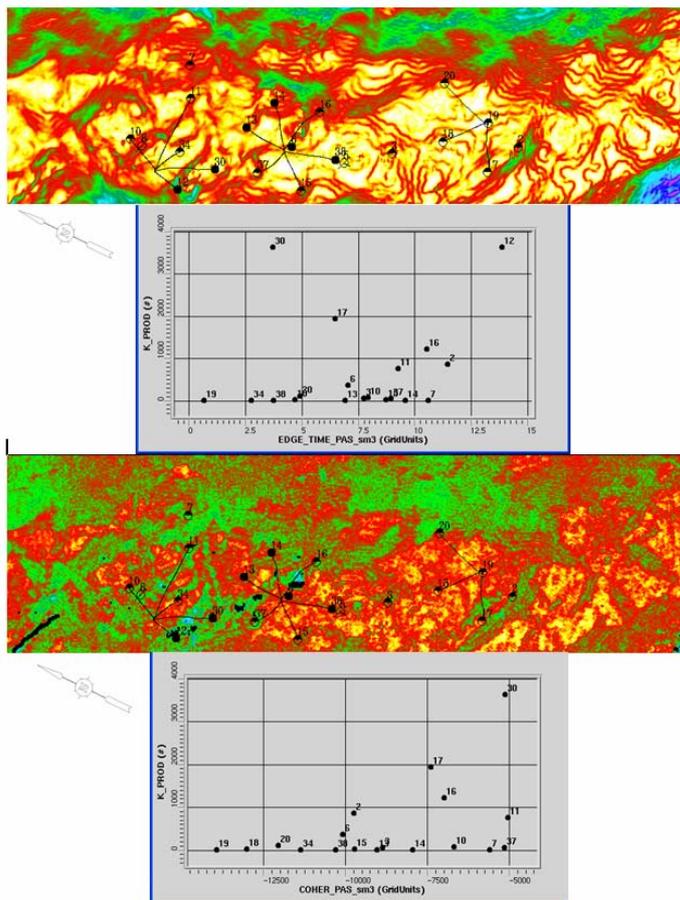


Рисунок 8. А) карта градиентов наклона (EDGE) поверхности отражающего горизонта в кровле резервуара; Б) кроссплот между коэффициентами продуктивности и значениями сейсмического атрибута EDGE; В) карта значений куба когерентности по поверхности отражающего горизонта; Г) кроссплот между коэффициентами продуктивности и значениями сейсмического атрибута «когерентность».

Именно эти скважины были подвергнуты пристальному вниманию (насколько позволяла полнота различных исследований в каждой из них). Наиболее информативный комплекс исследований (ХМАС, дебитометрия) был проведен в скважинах 30 и 16. И в обеих скважинах была отмечена общая закономерность (рис. 7): в стволе скважины присутствовал 3-5 метровый интервал с увеличенным диаметром (глубокая каверна) на фоне низких значений гамма-каротажа (чистый известняк). Вблизи этого интервала по результатам обработки электрометрии выделялись предположительно трещиноватые прослои. В этом интервале показания акустического каротажа были либо сильно искажены, либо отсутствовали (что закономерно, для данного прижимного вида каротажа). И именно с эти интервалом были связаны резкие скачки кривых профиля притока, фиксирующие максимальный объем (до 90%) притока нефти.

Таким образом, было выявлено, что причиной высокой продуктивности скважин является наличие интервала дробления плотных карбонатных пород в месте пересечения ствола скважины с искомой трещиноватой зоной. Именно такая макротрещиноватость фиксируется гидродинамическими исследованиями скважин, и именно она может быть ощутима для сейсмических волн.

Итак, шестерка скважин-лидеров была использована для дальнейшей калибровки сейсмических атрибутов, нацеленных на выявление зон трещиноватости в межскважинном пространстве.

В первую очередь, на подтверждаемость была проверена карта геометрической формы поверхности отражающего горизонта в кровле резервуара (рис. 8-А). Несмотря на то, что на карте отчетливо прорисовываются линейные зоны повышенных значений градиента наклона, отчетливой зависимости между значениями коэффициента продуктивности скважин и значениями градиента наклона поверхности не отмечается (рис. 8-Б). Низкопродуктивные скважины

совпадают в плане с повышенными значениями градиентов, которые могут быть связаны не с реальными перегибами, а с искажениями поверхности горизонта при обработке сейсмических данных (недомигрированность, большой шаг дискретизации и т.д.).

Не менее традиционным сейсмическим атрибутом, используемым для выделения тектонических нарушений и, как частных их случаев, трещиноватых зон, является куб когерентности. Алгоритмы расчета куба когерентности в различных современных программных средствах отличаются значительно, но в каждом из них происходит сравнение соседних сейсмических трасс. Степень схожести определяется параметром когерентности, соответственно, резко различные трассы характеризуются «некогерентностью». При интерпретации кубов когерентности исследователь всегда должен помнить, что некогерентными могут быть не только зоны тектонических нарушений, но и резкие литологические изменения, и неустраненные при обработке помехи разного рода, вплоть до техногенных. Поэтому ничего удивительного нет в том, что отчетливой зависимости между значениями коэффициента продуктивности скважин и значениями когерентности также не отмечается (рис. 8-В и 8-Г).

Ещё одним методом, привлекаемым к картированию зон трещиноватости, являются частотно-зависимые атрибуты, например спектральное разложение волнового поля. Особенностью этих атрибутов является зависимость частоты отраженной волны от размера объектов. Поля амплитуд на разных частотах отражают аномалии различных размеров, которые трудно анализировать совместно на едином кроссплоте.

Таким образом, все вышеописанные опосредованные интерпретационные приемы оказываются недостаточно эффективными на данном месторождении и могут быть использованы только на качественном уровне и только совместно, исходя из предположения, что общими для всех них аномалиями являются трещиноватые зоны, а аномалии, присущие только одному из них, являются, скорее всего, наведенными помехами.

Осознанная необходимость прямого прогноза субвертикальных зон трещиноватости заставила обратиться к теоретическим исследованиям волновых полей и практическим реализациям этих исследований. К сожалению, глубоко теоретически обоснованная способность поперечных волн отражать субвертикальные неоднородности, в настоящее время не сопровождается аппаратно-методологической базой. В противовес этому в индустрии начинает свое развитие и практическую реализацию технология миграции дуплексных волн (МДВ),

теоретические основы которой также глубоко разработаны.

### Теория миграции дуплексных волн

Дуплексными называются волны, которые двукратно отражаются: сначала от субгоризонтальной границы, а потом от субвертикальной (или в обратном порядке), и благодаря этому достигают поверхности наблюдений (рис. 9-А).

Еще совсем недавно считалось, что задача формирования сейсмических изображений субвертикальных границ не имеет решения, поскольку волны, отраженные от таких границ, не достигают поверхности наблюдения при наземной сейсморазведке.

Свойства дуплексных волн были исследованы в работах [1, 2 и др.], в которых показано, что их энергия вполне достаточна для использования в геологических целях.

Если рассмотреть синтетическую сейсмограмму от модели среды, в которую введена тонкая субвертикальная граница (рис. 9-Б), то

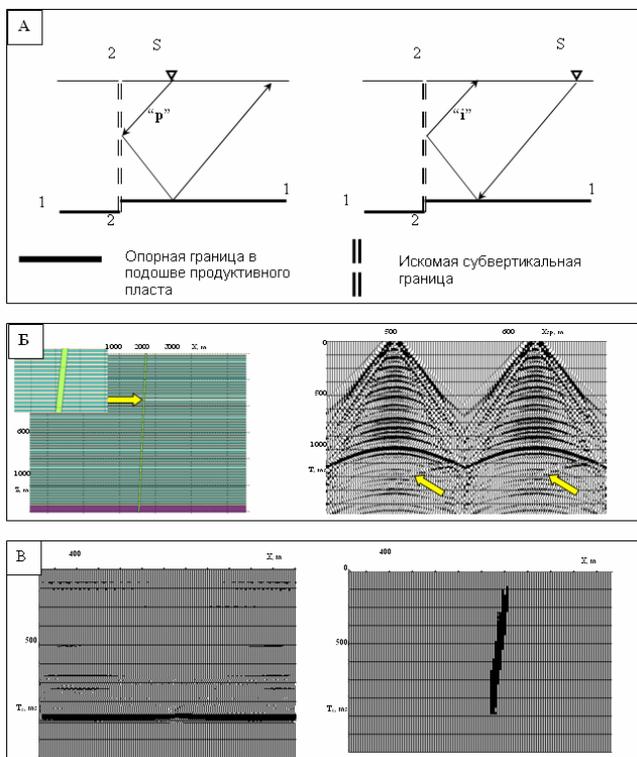


Рисунок 9. А) Ход лучей дуплексных волн. Б) Модель геологической среды (слева) и синтетические сейсмограммы данной среды (справа) – дуплексные волны показаны желтыми стрелками. В) Результат обычной глубинной миграции (слева) и изображение нарушения, полученного с помощью МДВ (справа).

дуплексная волна оставляет на ней слабое отражение, отмеченное стрелкой.

Первое сейсмическое изображение вертикальной границы с использованием дуплексных волн получил McMechan [3]. Для этого он использовал миграцию на основе двухстороннего волнового уравнения, реализованную в технике обратного продолжения поля по времени – reverse time migration (RTM) [4]. Особенностью этой миграции является то, что при формировании изображения вертикальной границы с использованием скорости близкой к истинной, однократно отраженные волны становятся существенными помехами. По этой причине из синтетической сейсмограммы, которая использовалась для получения изображения вертикальной границы, McMechan вычел однократно отраженную волну, т.е. отделил однократно отраженные волны от дуплексных и дифрагированных, образующихся на угловых элементах.

Для сравнения различия в подходах к проблеме на рисунке 9-В слева показан результат стандартной миграции модельной среды, в результате которой подчеркнуты горизонтальные отражения, а справа – результат миграции дуплексных волн, очищенный от горизонтальных отражений и подчеркивающий субвертикальную границу.

Миграция дуплексных волн основывается на преобразовании Кирхгофа [5], в котором функция Грина изменена в соответствии с кинематикой дуплексных волн. МДВ может быть также реализована на основе любых других видов миграционных преобразований – конечно-разностных, спектральных и т. д. Для реализации МДВ Кирхгофа используется та же объемная скоростная модель среды, что и для обычной миграционной процедуры, и дополнительно задается опорная субгоризонтальная граница.

По аналогии с другими пре-стек миграционными процедурами, МДВ может быть реализована в варианте обработки обменных волн. Однако в отличие от стандартных алгоритмов миграции здесь имеется дополнительная возможность формирования сейсмических изображений по проходящим через неоднородности обменным PS-волнам. Поскольку указанный обмен предполагается после первого отражения, то алгоритм МДВ, использующий проходящие PS-волны, становится независимым от углов наклона отражающих границ. При помощи такой МДВ возможно построение сейсмических изображений в диапазоне углов от 0 до 90° [5]. Использование при МДВ как отраженных обменных, так и проходящих обменных волн особенно важно с той точки зрения, что, как показано в работе Левянта и др. [7], для продольных волн зоны трещиноватости в широком диапазоне изменения их свойств практически оказываются прозрачными, а основные объекты МДВ – субвертикальные разрывные нарушения, в значительной степени характеризуются трещиноватостью.

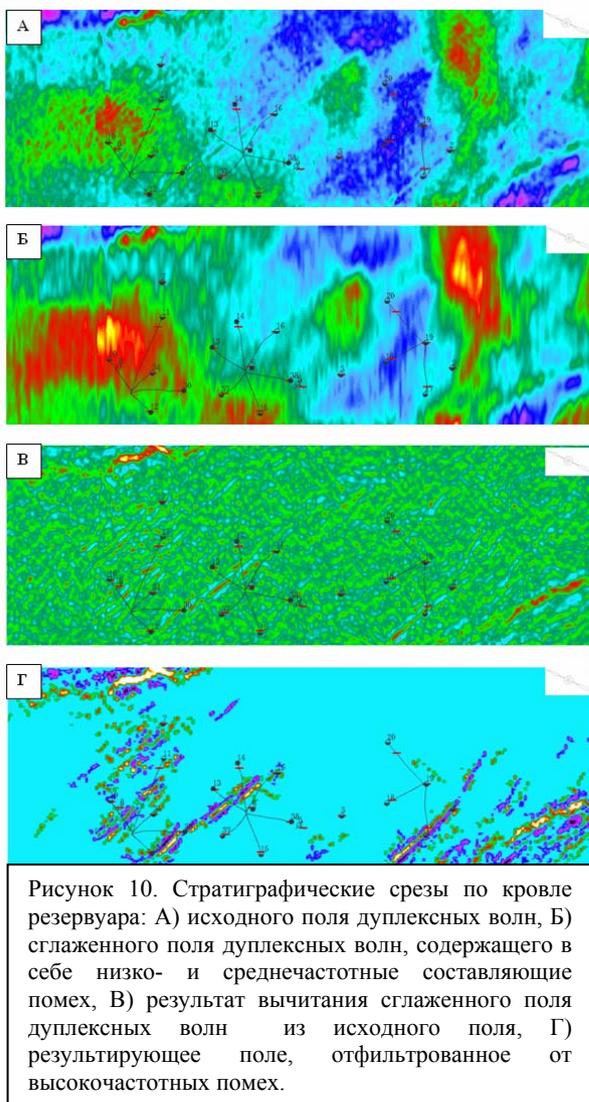
Разрешающая способность обычных миграционных процедур по латерали в несколько раз ниже разрешающей способности по вертикали [8]. Поворот оператора МДВ на 90° по отношению к обычным операторам способствует повышению разрешающей способности МДВ по латерали. Это означает, что в результате применения МДВ происходит конденсированная локализация узких субвертикальных границ по площади, что является несомненным преимуществом. В то же время разрешающая способность МДВ по вертикали может быть сравнена с разрешающей способностью по латерали при стандартных преобразованиях сейсморазведочных данных, т.е. по вертикали субвертикальные границы протягиваются многократно дальше вверх и вниз, чем в реальной среде. Это является серьезным ограничением метода при решении задач тонкой детализации особенностей резервуара.

Подробно история, теория, методология и примеры использования миграции дуплексных волн описаны в [9, 10].

### **Рассмотрение результатов**

Дуплексные волны являются довольно слабыми на фоне волн, отраженных от субгоризонтальных границ, сопоставимыми с помехами. При МДВ серьезной проблемой являются шумы преобразования, связанные с однократно отраженными волнами, в частности, от опорной границы, и следы расстановки (рис. 10-А). Эффективным средством подавления артефактов может оказаться процедура вычитания из исходных сейсмических записей поля, сглаженного на малой базе. Сглаженное поле содержит в себе амплитуду опорной границы в качестве низкочастотной составляющей и следы поверхностной расстановки источников-приемников в качестве среднечастотной составляющей (рис. 10-Б). Разностное поле содержит в себе искомые линейные аномалии и высокочастотный изометричный шум, который по амплитудам сопоставим с полезными отражениями (рис. 10-В).

Процедура экстрагирования линейных аномалий является сугубо субъективным интерпретационным процессом, опирающимся, как на всю известную априорную геологическую информацию, так и на скважины, выбранные для калибровки. Математический аппарат, привлеченный на этом этапе, нацелен на автоматическое выделение из трёхмерного объема связанных пространственных элементов (вокселей). Параметрами связности в данном случае выступают: диапазон амплитуд; соприкосновение отдельных кубических вокселей гранями, ребрами и углами; и минимальный размер группы связанных вокселей. В зависимости от ранга выделяемых аномалий, варьируются размер группы и нижняя граница абсолютного значения амплитуд (верхняя задается максимальной).



Поскольку на изучаемом объекте, в качестве эталона для калибровки были выбраны высокопродуктивные скважины, результирующий куб содержит в себе аномалии, которые были вскрыты этими скважинами, и аналогичные им по размерам и интенсивности (рис. 10-Г). Более тонкая настройка на среднепродуктивные скважины позволит выделить линейные аномалии меньшего ранга.

Статистический анализ результирующего куба экстрагированных дуплексных волн показал высокий коэффициент корреляции (0.94) между абсолютными значениями амплитуд и коэффициентом продуктивности скважин (рис. 11-А). Подобная зависимость может быть интерпретирована следующим образом: высокопроницаемые трещиноватые зоны представляют собой субвертикальные слои дробленной породы, меланжа, соответственно обладают пониженной плотностью и скоростью по сравнению с вмещающей ненарушенной породой. Разница жесткостей на границе трещиноватой зоны влияет на величину коэффициента отражения и магнитуду амплитуды: чем интенсивней раздроблены породы, тем ярче отражение, тем выше проницаемость и, следовательно, тем выше продуктивность скважин, вскрывших такую зону. Отрицательное отражение формируется на ближней к приёмнику границе зоны, положительное – на дальней. Таким образом, пара экстремальных отражений может соответствовать проницаемой трещиноватой зоне тектонического происхождения.

Куб экстрагированных дуплексных волн был подвергнут сопоставлению с результатами гидропрослушивания. На первом участке (рис. 11-Б), возбуждающая скважина №6, реагирующие - 14 и 38. Исходя из распределения сейсмических линейных аномалий, пласт между скважинами 6 и 38 сохраняет ненарушенную матричную структуру (рисунок слева). Скорость изменения давления (коэффициент пьезопроводности) между этими скважинами будет характеризовать свойства ненарушенного порового коллектора. В тоже время между скважинами 6 и 14 прослеживается проницаемая зона, разделяющая участки порового коллектора, вскрытого исследуемыми скважинами. При простирации трещиноватой зоны нормально к направлению прослушивания, она будет служить барьером для флюида, стремящегося перемещаться по пути наименьшего сопротивления. Действительно, коэффициент пьезопроводности, замеренный в скв. 38 в пять раз выше, чем в скв. 14, несмотря на то, что эта скважина расположена на 100 метров дальше (таблица слева).

На втором участке изменение давления в реагирующей скв. 17 было зафиксировано через 1 час после начала добычи в возбуждающей скв. 2 (рис. 11-В, слева). Проводимость пласта между

этим скважинами почти в 20 раз выше, чем в матричном коллекторе (рисунок 11-В, таблица справа). Таким образом, это гидропрослушивание также подтверждает пространственное положение высокопроницаемой зоны, как и предыдущее.

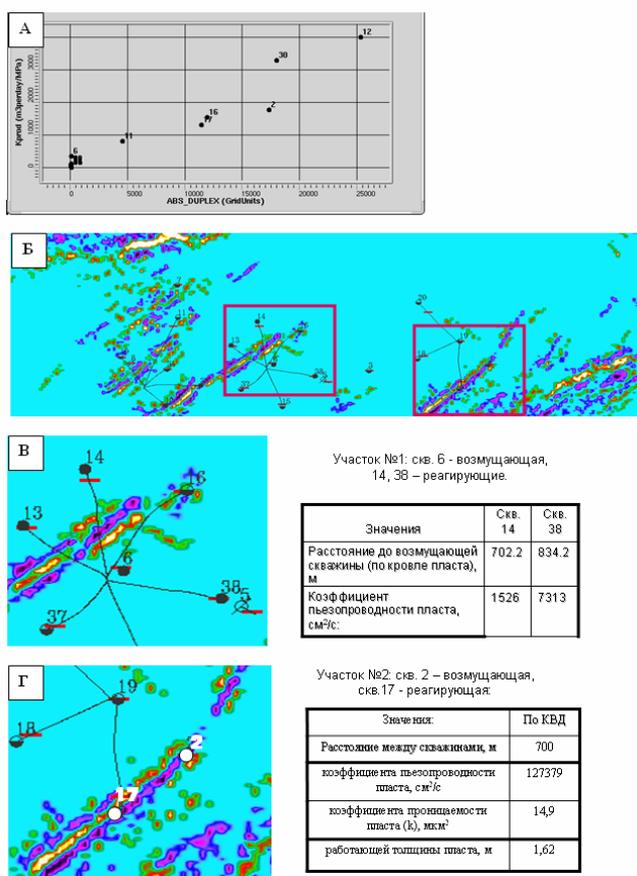


Рисунок 11. Анализ результатов: А) кроссплот между абсолютными значениями амплитуд дуплексных волн и коэффициентами продуктивности скважин; Б) участки гидропрослушиваний; В) результаты гидропрослушивания на первом участке; Г) результаты гидропрослушивания на втором участке.

Миграция дуплексных волн не только описывает точное пространственное положение трещиноватых зон, но и позволяет получить детальное изображение их геометрии. На рисунке 10-Г отчетливо видно, что некоторые аномалии состоят из цуга отражений. Такие зоны являются сходящим корней двух встречных сбросов, основанием грабена, проявленного в вышележащих терригенных отложениях. Иногда в таком пакете отражений одно из экстремальных отражений слабое, интерференционное. Вероятно, в данном случае граница зоны связана с постепенным затуханием трещиноватости. Помимо многофазных аномалий, в результирующем поле наблюдаются однофазные линейные аномалии, которые могут быть связаны либо со слабопроницаемыми тонкими зонами, либо с непроницаемыми барьерами. В пользу последнего предположения можно привести пример скв. 34, расположенной на острие аналогичной однофазной зоны. Как говорилось выше, эта скважина - самая низкодебитная на месторождении. В результирующем поле наблюдаются как однофазные аномалии руководящего северо-западного направления, так и сеть слабых аномалий ортогонального направления. Такие северо-восточно направленные слабые однофазные аномалии в некоторых случаях разделяют

яркие многофазные пакеты на отдельные фрагменты, кулисно смещенные относительно друг друга. На периферии участка исследований отмечаются крупные яркие многофазные аномалии, которые связаны с тектоническими нарушениями с малоамплитудным (2-8 мс) смещением.

### Выводы:

- Миграция дуплексных волн является прямым методом выделения зон трещиноватости тектонического типа.
- Зоны открытой трещиноватости проявляются на горизонтальных и стратиграфических срезах куба как двухфазное отражение, где отрицательное отражение порождается ближайшей к приемнику границей зоны дробления, а положительное отражение порождается дальней от приемника границей.
- Зоны дробления могут быть разбиты непроницаемыми поперечными безамплитудными нарушениями, ограничивающими фрагменты зон дробления по простиранию, и смещающими их кулисно относительно друг друга.
- Интенсивность и размер аномалий позволяют ранжировать линейные аномалии на малоамплитудные тектонические нарушения, проницаемые трещиноватые зоны и, иногда, непроницаемые субвертикальные границы.
- Выделенные по полю дуплексных волн зоны дробления подтверждаются гидродинамическими исследованиями скважин и могут быть рекомендованы для последующего эксплуатационного бурения.

- Поскольку дуплексные волны являются слабым вторым отражением падающих продольных волн, кратно возрастают требования к качеству обработки исходных сейсмограмм, обязательным условием становится предварительная глубинная миграция сейсмограмм, неизбежен этап постпроцессинговой обработки (устранения влияния опорной границы).
- Особой тщательности и геологической осведомленности требует этап экстрагирования линейных аномалий из поля остаточных помех. Беглый анализ или недостаток информации о работе скважин оставит за пределами внимания средние и мелкие трещиноватые элементы.
- Ограничением метода является его низкая разрешенность по глубине. Прогноз протяженности трещиноватой зоны вниз до уровня подстилающей воды или вверх в покрывку остается за пределами возможностей метода.

#### Список литературы:

1. Костюкевич А.С., Мармалевский Н.Я., Горняк З.В., Роганов Ю.В., Мерший В.В. Конечно-разностное моделирование дуплексных волн, отраженных от субвертикальных границ. – Геофизический журнал, 2001, **23**, 3. – 110-114.
2. Луценко Б.Н., 1987, Интерпретация сейсмических волн в сложных средах: М., Недра.
3. McMechan G. A., 1983. Migration by extrapolation of time-depended boundary values: Geophys. Prosp., **31**. – 412-420.
4. Baysal E., Kosloff D.D., Sherwood J.W.C., 1983. Reverse time migration: Geophysics, **48**. – 1514-1524.
5. Marmalyevskyy N., Gornyak Z., Kostyukevych A., Mershchiy V., Roganov Y., 2006. Method, system and apparatus for interpreting seismic data using duplex waves, Patent US 7,110,323 B2.
6. Мармалевський Н.Я., Роганов Ю.В., Горняк З.В. та ін. Міграція дуплексних хвиль – новий засіб формування сейсмічних зображень субвертикальних границь // Зб. наук. праць. УкрДГРІ. – 2007. – №2. – 173-190.
7. Leviant V.B., Petrov I.B., Chelnokov F.B., Antonova I.Y., 2007. Nature of the scattered seismic response from zones of random clusters of cavities and fractures in a massive rock: Geophys. Prosp., **55**. – 507-524.
8. Galbraith M., 2000. 3D seismic survey design: a solution: First Break, **18**, 5, 171-176.
9. З.В.Горняк, А.С.Костюкевич, Б.Линк, Н.Я.Мармалевский, В.В.Мерший, Ю.В.Роганов, И.Ю.Хромова Изучение вертикальных неоднородностей при помощи миграции дуплексных волн. - Технологии сейсморазведки, 2008, №2.
10. И.Ю.Хромова, Н.Я.Мармалевский, Горняк, Ю.В. Роганов, А. С. Костюкевич, Изучение субвертикальных зон трещиноватости по сейсмическим данным. Материалы III международной конференции EAGE, SEG, EAГО Санкт-Петербург-2008.