

Н. Я. Мармалевский, канд. техн. наук, ведущий геофизик,
А. С. Костюкевич, канд. физ.-мат. наук, главный геофизик,
Ю. В. Роганов, канд. физ.-мат. наук, ведущий математик (Tetrale Group),
И. Ю. Хромова, канд. геол.-минерал. наук, заведующий отделом (ЛУКОЙЛ)

ВЛИЯНИЕ ПРОНИЦАЕМОСТИ НА СВОЙСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ ТРЕЩИНОВАТЫХ ЗОН, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ПОМОЩИ МИГРАЦИИ ДУПЛЕКСНЫХ ВОЛН

На модельных и полевых материалах исследуется возможность по изображениям вертикальных границ, полученных в результате миграции дуплексных волн, оценить проницаемость трещиноватых коридоров. В то время, как плотность трещин оценивается путем изучения сейсмической анизотропии, получить сведения о проницаемости зоны трещиноватости значительно более сложно. В статье, используя известную связь проницаемости с поглощением сейсмических волн внутри субвертикальной трещиноватой зоны, показаны свойства субвертикальных сейсмических изображений, связанные с повышенным уровнем поглощения внутри трещиноватой зоны. Целенаправленный поиск таких свойств сейсмических изображений позволит классифицировать трещиноватые зоны по проницаемости.

Ключевые слова: миграция, поглощение, проницаемость, дуплексные волны.

Введение

Многочисленные примеры эксплуатации месторождений углеводородов показывают, что в рамках одной и той же залежи скважины значительно отличаются по коэффициентам продуктивности. Особенно это характерно для карбонатных коллекторов и объясняется наличием высокопроницаемых трещиноватых коридоров. В свою очередь, как показано в работе [1], проницаемость корреляционно связана с поглощением сейсмических волн, а это может стать решающим фактором при ее прогнозировании. В работе [7] отмечается, что добротность поглощения сейсмических волн во флюидонасыщенных коллекторах может падать до значений $Q=5$. При разбурировании трещиноватых коридоров, с которыми связаны высокие дебиты и

коэффициенты продуктивности, весьма важно иметь оценку величины пористости (плотности трещин) и проницаемости внутри коридора. Подобная информация позволяет и заранее подготовиться к возможным осложнениям, и избежать аварий в процессе бурения [6]. Значительно более эффективно пробурить скважину на некотором расстоянии от проницаемой зоны, а потом достичь ее при помощи гидроразрыва. Такая методика резко сокращает вероятность аварии и является экономически выгодной. С другой стороны, высокопроницаемые коридоры очень часто приводят к быстрому обводнению скважин, а зона в непосредственной близости от такого коридора, мощность которого составляет 5–8 м, может долгое время давать стабильный безводный приплыв.

Видим ли мы проявления высокой проницаемости трещиноватых коридоров на сейсмическом материале? Речь идет о сейсмических изображениях субвертикальных границ, получаемых в результате миграции дуплексных волн (МДВ) [8]. В работах [2, 5] показана связь амплитуд кубов МДВ с коэффициентами продуктивности скважин, что, вероятнее всего, объясняется также корреляционной связью проницаемости коллектора с амплитудами МДВ. Наблюдается также определенная корреляция AVO атрибутов, определенных по дуплексным волнам с производительностью скважин, вскрывших трещиноватые коридоры [3]. Известны примеры тесных корреляционных связей аномальных участков кубов амплитуд МДВ с эффективностью применения гидроразрыва [4].

В данной статье мы на основе полноволнового вязкоупругого моделирования, показываем влияние поглощения сейсмических волн, которое, как отмечалось, коррелируется с проницаемостью, на свойства изображений субвертикальных границ.

Метод оценки поглощения

Миграция дуплексных волн предназначена для формирования сейсмических изображений субвертикальных границ [8]. Эта миграция относится к классу глубинных миграций на основе интеграла Кирхгофа, в которой функция Грина рассчитывается в соответствии с кинематикой распространения дуплексной волны. Для расчета указанной функции, кроме обычной для глубинных миграций глубинно-скоростной модели (изотропной или анизотропной), задается еще базовая граница, соответствующая подошве целевого интервала, которая формирует одно из отражений дуплексной волны.

На протяжении ряда последних лет эта миграция использовалась для изучения положения стенок соляных штоков и зон трещиноватости карбонатных резервуаров [4, 5 и др.]. Важной особенностью указанной выше миграции является то, что, в отличие от стандартных вариантов мигра-

ций, она имеет возможность формировать целевой субвертикальный объект с двух сторон относительно его линии простира-ния, для чего применяют ассиметричные, в частности левые или правые апертуры преобразования. Это дает возможность оценить азимут падения субвертикальной границы, так как изображение, сформированное со стороны прямого угла между целевой границей и базовой поверхностью, оказывается более интенсивным, чем со стороны тупого угла. В случае если целевая граница близка к вертикальной, а опорная поверхность к горизонтальной, неидентичность изображения вертикальных объектов, полученных с левой и правой апертурой, может свидетельствовать о поглощающих свойствах вертикального коридора. При незначительной ширине вертикального коридора (в несколько раз меньше длины волны) влияние поглощения сейсмических волн может проявиться в форме сигнала, формирующего изображение субвертикальной границы.

Модельные эксперименты и их применение к реальным данным

Рассмотрим модель вертикального пласта шириной 100 м (рис. 1), что больше модельной длины волны. На рис. 2 показаны сейсмические изображения, полученные при помощи миграции дуплексных волн при условии трех различных значений добротности поглощения: $Q=100$ (рис. 2а), $Q=20$ (рис. 2б) и $Q=5$ (рис. 2в).

Первые два случая соответствуют низким уровням поглощения внутри целевого объекта, а третий случай высокому уровню поглощения, с которым может быть связана высокопроницаемая трещиноватая порода. При моделировании трещиноватости использовались пять релаксационных законов, обеспечивающих частотную независимость параметра Q во всем частотном диапазоне сейсмической записи. Применение большего чем пять числа релаксационных законов увеличивает время моделирования, но существенного изменения в стабильности параметра Q не вносит.

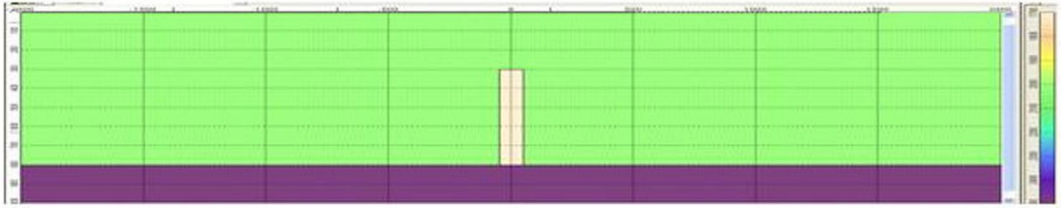


Рис. 1. Модель вертикального пласта мощностью 100 м

Первые два изображения (рис. 2а и рис. 2б) позволяют при использовании правосторонней апертуры преобразования сформировать обе стенки субвертикального объекта. При правосторонней апертуре источники колебаний расположены слева от целевого объекта. Положение ближней к источникам колебания стенки вертикального пласта (показана красной стрелкой на рис. 2а) полностью соответствует модели (подложка изображена черными линиями). В то же время дальняя стенка вертикального пласта (показана синей стрелкой на рис. 2а) смещена более чем 20 м относительно правильного модельного положения. Это отражает тот факт, что скорость миграции не учитывает, как это обычно бывает на практике, изменение скорости в тонком пласте, и скорость миграции внутри вертикального слоя оказывается выше истинной. В этом случае, как и при обычных миграционных преобразованиях, граница смещается от источника колебаний. Можно отметить несколько расфокусированный ее харак-

тер, связанный с нарушением скоростного закона миграции. Правильное положение вертикальной границы можно получить по совокупности миграций с левой апертурой (правая стенка) и правой апертурой (левая стенка). Величина смещения правой стенки на рис. 2а относительно действительного положения объекта позволяет, в случае наличия информации о ширине объекта (изображения с левой и правой апертурами) и референтной скорости миграции, оценить дефицит скорости внутри целевого объекта. Это можно сделать, например, путем моделирования, перебирая скорости внутри объекта с последующей МДВ. Эксперимент показывает, что для данной модели при отличии экспериментальной скорости от первоначальной, которую мы считаем неизвестной, на 30 %, определить неизвестную скорость внутри пласта можно, используя линейную зависимость скорости от смещения. В таком случае достаточно одного варианта расчета синтетических сейсмограмм.

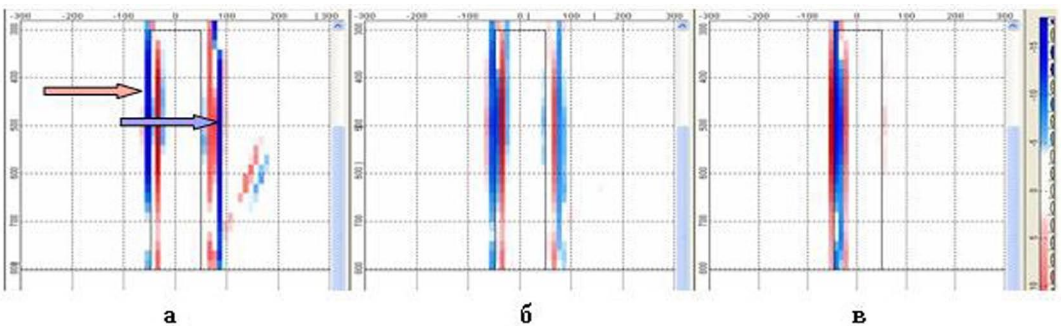


Рис. 2. Сейсмические изображения, полученные по модели, показанной на рис. 1, при помощи миграции дуплексных волн с правосторонней апертурой: Q=100 (а); Q=20 (б) и Q=5 (в)

На рис. 2в показан вариант изображения вертикальной границы при добротности поглощения внутри вертикального пласта $Q=5$. При использовании правосторонней апертуры в этом случае можно сформировать только левую стенку пласта, что объясняется значительным уровнем подавления сейсмической энергии внутри пласта. Как видно из приведенного примера, в случае модели, показанной на рис. 1, диагностика высокого уровня поглощения внутри вертикального слоя выглядит вполне однозначной.

На практике нередко можно наблюдать аномальные участки кубов МДВ, интерпретация которых допускает наличие зоны значительного поглощения сейсмической энергии, на основании того, что левосторонняя апертура формирует только правую стенку субвертикального пласта, а правосторонняя – левую. На рис. 3 показан пример стратиграфических срезов кубов МДВ, полученных на одном из месторождений в пределах Прикаспийской впадины (Казахстан). Слева показано изображение, полученное с левосторонней апертурой, а справа с правосторонней. Судя по этим изображениям, ширина

вероятной зоны высокой проницаемости составляет 80 м. Скважина К-002, расположенная практически в пределах указанной зоны, характеризуется повышенной трещиноватостью в керне и самым высоким дебитом нефти на месторождении.

На практике часто встречаются высокопроницаемые коридоры, мощность которых не превышает 5–8 м [6]. В этом случае ситуация в значительной степени изменяется по отношению к рассмотренной выше. На рис. 4 показаны сейсмические изображения, полученные при помощи миграции дуплексных волн для модели, отличающейся от показанной на рис. 1 тем, что ширина вертикального пласта составляет 8 м. В данном случае использовалась симметричная апертура при условии трех различных значений добротности поглощения: $Q=100$ (рис. 4а), $Q=20$ (рис. 4б) и $Q=5$ (рис. 4в).

Как видно на рис. 4, сейсмическое изображение, полученное при низком значении Q (рис. 4в), характеризуется сменой знака сейсмического сигнала по отношению с результатами моделирования, полученными с высокими значениями добротности. Это можно объяснить

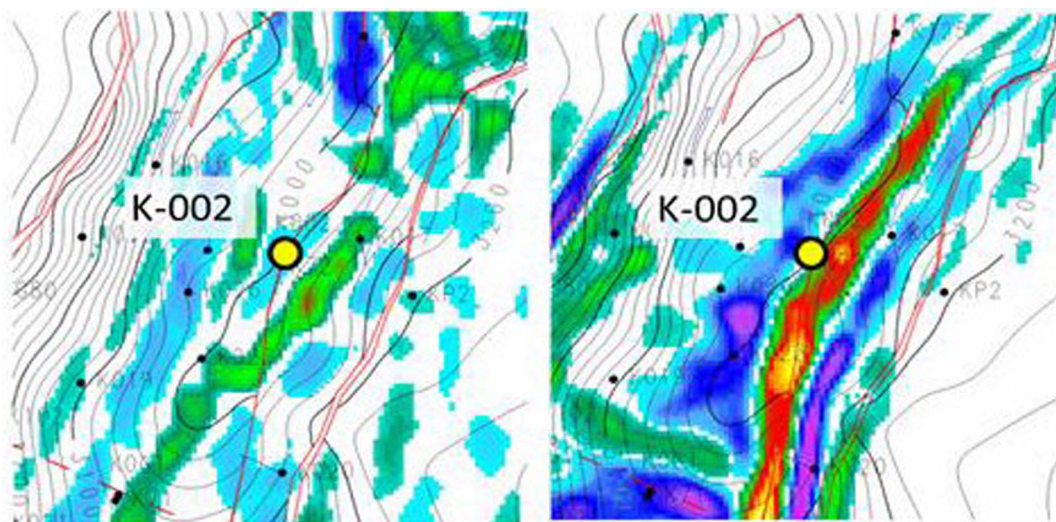


Рис. 3. Стратиграфический срез кубов МДВ, полученных на одном из месторождений в пределах Прикаспийской впадины

Слева – с левосторонней апертурой, справа – с правосторонней апертурой

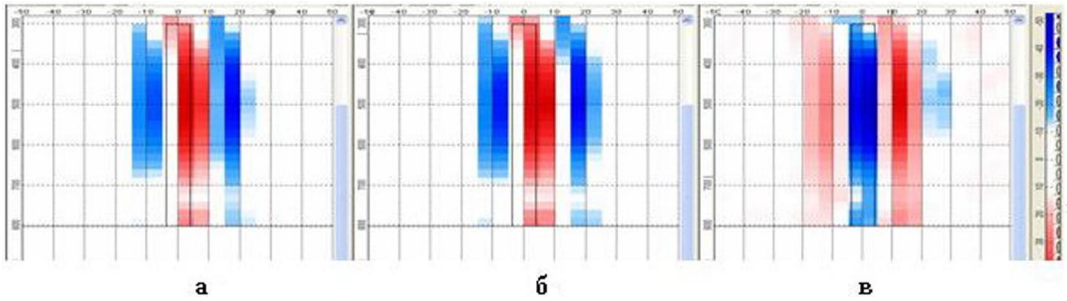


Рис. 4. Сейсмические изображения, полученные по модели, с шириной вертикального пласта 8 м при помощи миграции дуплексных волн с симметричной апертурой: Q=100 (а); Q=20 (б) и Q=5 (в)

зависимостью фазового спектра сигнала от величины поглощения, так как коэффициент отражения в этом случае становится комплексным.

На практике часто можно наблюдать смену фазы сигнала вдоль линеаментов, получаемых в результате миграции дуплексных волн и интерпретируемых как изображения высокопроницаемых коридоров. На рис. 5 показан стратиграфический срез куба миграции дуплексных волн, полученный на участке 1 на одном месторождении в пределах Тимано-Печерского

нефтегазового региона. На рисунке четко видна смена знака сейсмического сигнала в пределах линеамента, представляющего собой высокопроницаемый коридор. Об этом свидетельствуют результаты гидропрослушивания [2], при котором нагнетательной является скважина 23, а прослушивающими скважины 20 и 22. Величина коэффициента пьезопроводности в скважине 22, который отвечает за проницаемость матрицы, почти в пять раз выше такого в скважине 20, расположенной за рассматриваемым линеаментом. Это

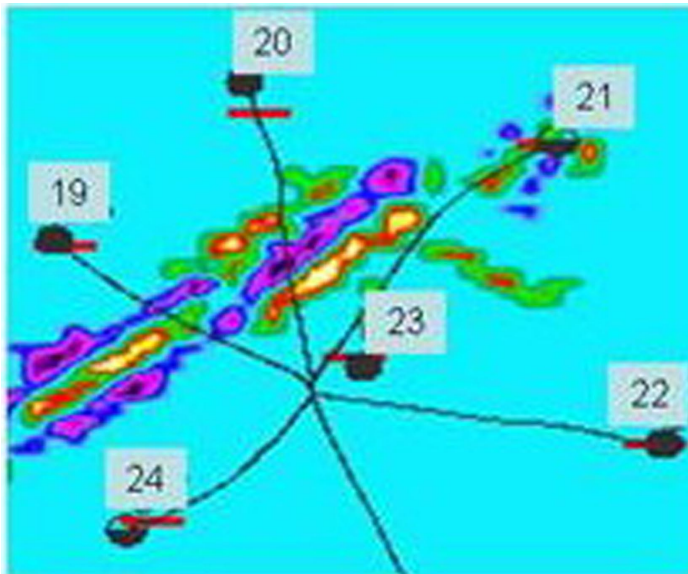


Рис. 5. Стратиграфический срез куба миграции дуплексных волн, полученный на участке 1 месторождений Тимано-Печерского нефтегазового региона

является однозначным индикатором его высокой проницаемости.

В пределах этого же месторождения выделяется еще один высокопроницаемый коридор, показанный на рис. 6. При гидропрослушивании между скважинами 2 и 17 коэффициент пьезопроводности более чем в пятнадцать раз превысил таковой для ненарушенной карбонатной матрицы. Столь высокая проницаемость стала одной из причин быстрого обводнения скважин 2 и 17.

Учитывая тот факт, что знак сигнала сейсмического изображения между скважинами 2 и 17 совпадает с таковым в правой части участка 1 (рис. 5), можно сделать предположение, что эта часть трещиноватого коридора также характеризуется весьма высокой проницаемостью. Последняя имеет положительную корреляционную связь с поглощением сейсмических волн, что отражается в знаке сигнала сейсмического изображения подобно модельному примеру, показанному на рис. 3. В связи со сказанным необходимо отметить, что скважины, пробуренные в пределах левой части линеамента участка 1 (рис. 5), продолжительное время работают не обводняясь (скважины расположены за пределами рисунка).

Заключение

На модельных примерах, полученных для вертикальных пластов, моделирующих трещиноватые зоны с различным уровнем Q-фактора, который по имеющимся данным положительно коррелируется с проницаемостью коллектора, оценено влияние этих факторов на сейсмические изображения, полученные в результате миграции дуплексных волн. Показано, что рассмотренные свойства сейсмических изображений позволяют объяснить поведение реальных сейсмических изображений и связь их с продуктивностью и обводненностью трещиноватых коридоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Е. А. Модели сред разведочной сейсмологии. – Тверь: изд-во ГЕРС, 2006. – 479 с.
2. Хромова И. Ю. Миграция дуплексных волн – метод картирования трещиноватых зон тектонического генезиса//Геология нефти и газа. – 2008. – № 3. – С. 37–47.
3. Dubrova G., Khromova I., Kostyukovich A., Luo D., Liang W., Li B. Duplex wave migration based AVO for determination properties of vertical boundaries. 73th EAGE Conference & Exhibition, Expanded Abstracts. – 2011.
4. Iskaziyeu K. O., Karimov S. G., Yasafova N. I., Kudakaev R. V., Khabibullin E. G., Ra-

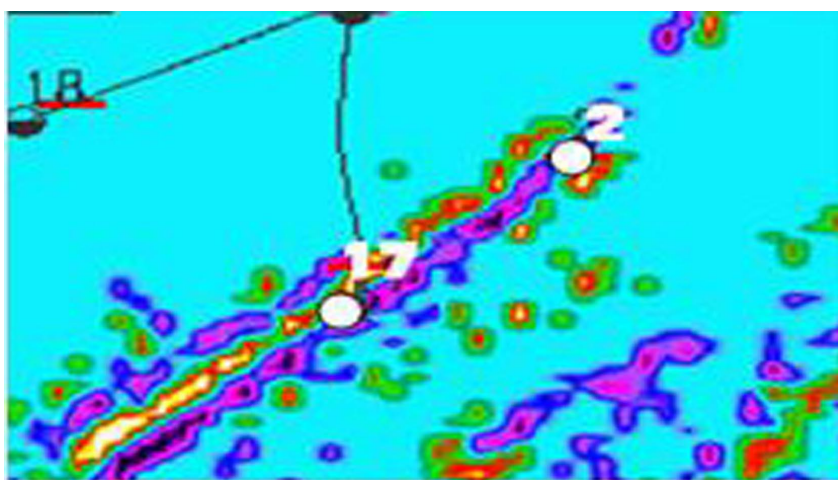


Рис. 6. Стратиграфический срез куба миграции дуплексных волн, полученный на участке 2 того же месторождения Тимано-Печерского нефтегазового региона

stegaeva E. V., Denisov Y. I., Marmalevskiy N. Use of Duplex Wave Migration for Examination of Irregularities in Subsalt Carbonates in the Pre-Caspian Depression. 76th EAGE Conference & Exhibition, Expanded Abstracts. – 2014.

5. Khromova I., Link B., Marmalevskiy N. Comparison of seismic-based methods for fracture permeability prediction, First break. – 2011. – № 29. – С. 11–18.

6. Khromova I., Link B., Marmalevskiy N. Fracture prediction, actual 2010 drilling results and full wave forward modeling – an integrated technologies approach. 73th EAGE Conference & Exhibition, Expanded Abstracts. – 2011.

7. Korneev V. A. Slow waves in fractures filled with viscous fluid, Geophysics, 73, no. 1. – 2008. – P. N1–N7.

8. Marmalyevskiy N., Gorniyak Z., Kostyukevych A., Mershchiy V., Roganov Y. Method, system and apparatus for interpreting seismic data using duplex waves. – Patent US 7,110,323 B2. – 2006.

REFERENCES

1. Kozlov E. A. Models of environment in prospecting seismology. – Tver: Izd-vo GERS, 2006. – 479 p. (In Russian).

2. Khromova I. Y. Duplex wave migration – the method for mapping of fractured zones of tectonic genesis//Geologija nefiti i gaza. – 2008. – № 3. – P. 37–47. (In Russian).

3. Dubrova G., Khromova I., Kostyukevych A., Luo D., Liang W., Li B. Duplex wave migration based AVO for determination properties of vertical boundaries. 73th EAGE Conference & Exhibition, Expanded Abstracts. – 2011.

4. Iskaziye K. O., Karimov S. G., Yasafova N. I., Kudakaev R. V., Khabibullin E. G., Rastegaeva E. V., Denisov Y. I., Marmalevskiy N. Use of Duplex Wave Migration for Examination of Irregularities in Subsalt Carbonates in the Pre-Caspian Depression. 76th EAGE Conference & Exhibition, Expanded Abstracts. – 2014.

5. Khromova I., Link B., Marmalevskiy N. Comparison of seismic-based methods for fracture permeability prediction, First break. – 2011. – № 29. – С. 11–18.

6. Khromova I., Link B., Marmalevskiy N. Fracture prediction, actual 2010 drilling results and full wave forward modeling – an integrated technologies approach. 73th EAGE Conference & Exhibition, Expanded Abstracts. – 2011.

7. Korneev V. A. Slow waves in fractures filled with viscous fluid, Geophysics, 73, no. 1. – 2008. – P. N1–N7.

8. Marmalyevskiy N., Gorniyak Z., Kostyukevych A., Mershchiy V., Roganov Y. Method, system and apparatus for interpreting seismic data using duplex waves. – Patent US 7,110,323 B2. – 2006.

Рукопис отримано 2.04.2015.

Н. Я. Мармалевський,

А. С. Костюкевич,

Ю. В. Роганов (Tetrale Group),

І. Ю. Хромова, (ЛУКОЙЛ)

ВПЛИВ ПРОНИКНОСТІ НА ВЛАСТИВОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ ТРІЩИНУВАТИХ ЗОН, ЩО ОДЕРЖАНІ ЗА ДОПОМОГОЮ МІГРАЦІЇ ДУПЛЕКСНИХ ХВИЛЬ

На модельних і польових матеріалах досліджено можливість за зображеннями вертикальних границь, отриманих за допомогою міграції дуплексних хвиль, оцінити проникність тріщинуватих коридорів. У той час, коли щільність тріщин оцінюється способом вивчення сейсмічної анізотропії, отримати інформацію щодо проникності зони тріщинуватості значно складніше. У статті, використовуючи відомий зв'язок між проникністю колекторів і непружним поглинанням сейсмічних хвиль у середині субвертикальної тріщинуватої зони, показані властивості субвертикальних сейсмічних зображень, пов'язані з високим рівнем поглинання. Цілеспрямований пошук таких властивостей сейсмічних зображень, дасть можливість класифікувати тріщинуваті зони за рівнем проникності.

Ключові слова: міграція, поглинання, проникність, дуплексні хвилі.

N. Y. Marmalevskiy,
A. S. Kostyukevych,
Yu. V. Roganov (*Tetrale Group*),
I. Y. Khromova, (*LUKOIL*)

INFLUENCE OF PERMEABILITY ON PROPERTIES OF THE IMAGES OF FRACTURED ZONES OBTAINED BY DUPLEX WAVES MIGRATION

On modelling and field materials the opportunity under the images of vertical boundary received as a result of duplex waves migration is investigated to estimate permeability of fractured corridors. We have used a Kirchhoff method for duplex waves migration that is based on the Green's function using the kinematics of duplex waves. The duplex waves migration algorithm is designed to image the duplex waves energy that will arrive at a time greater than that of the primary reflections from a base boundary that is one of the sub-horizontal boundaries. This approach requires the base boundary to be specified. A beam tube construction eliminates the migration noise that would result from including the base boundary primary reflections in the migration summation. With this approach both, sub-vertical tectonic faults and fractured zones (high permeability corridors) can be imaged.

While density of fractures is estimated by study of seismic anisotropy, to receive the items of information on permeability of a fractured zone is considerably more difficultly. In the paper is used known connection of permeability with absorption of seismic waves inside of subvertical fracture zone. The properties of the subvertical seismic images, received by duplex waves migration, connected to a increased level of absorption inside fractured zone are shown.

In particular we have shown, that in case of high absorption of seismic waves inside fractured corridor the phase of a signal on the image is opposite to a case of a low level of absorption and accordingly of lower permeability. The purposeful search of such properties of the seismic images, will allow to classify fractured zone on permeability.

Keywords: *migration, absorption, permeability, duplex waves.*