

Оценка чувствительности 3D/4D AVO-анализа и 3D/4D инверсии на примере объекта Слейпнир

■ Лекомцев А.В., Подбережный М.Ю.

Аннотация: в статье раскрываются методика анализа чувствительности 3D/4D AVO-анализа и инверсии сейсмических данных на одном из морских месторождений у северо-восточного побережья Норвегии. Основой послужили последовательные 3D съемки, выполненные в режиме 4D в период с 1994 по 2010 год за время его промышленной эксплуатации и закачке CO_2 , выделенного из природного газа в выше лежащие водоносные пласты. Отмечается, что результаты 4D мониторинга, чувствительны к насыщению CO_2 на уровне разности амплитуд. Авторы считают, что можно получить оценку чувствительности путем выполнения описанных ниже процедур, которые позволяют оценить достоверность 3D AVO-анализа и как следствие 4D инверсии, что в дальнейшем даст возможность определить пределы изменений емкостных или ресурсных характеристик пластов, рассчитанных на основе данных 4D сейсмической инверсии.

Ключевые слова: AVO анализ, 4D сейсмомониторинг, 3D сейсморазведка.

Введение

Улавливание и хранение CO_2 стало важнейшей технологией для снижения выбросов парниковых газов и борьбы с изменением климата. Одной из важнейших задач в проектах по захоронению CO_2 является оценка фильтрационно-емкостных свойств и мониторинг подземных хранилищ с использованием 3D/4D сейсморазведки [1]. К проектам где выполняется 4D сейсмомониторинг относится и объект Слейпнир, который является газовым месторождением, открытым в 1974 году в Норвежском секторе Северного моря в 100 км от г. Ставангер (Рис. 1А). Добыча газа осуществляется из древних пород формации Ту залегающей на глубинах 2250-2600 метров ниже уровня моря. Водонасыщенная формация Утсира в которую с 1997 по 2015 года происходила закачка CO_2 , выделенного из природного газа пластов Ту, приурочена к терригенным отложениям миоцена - плиоцена Североморского нефтегазоносного бассейна. По своему геологическому строению формация многопластовая, с наличием зон литологических замещений и значитель-

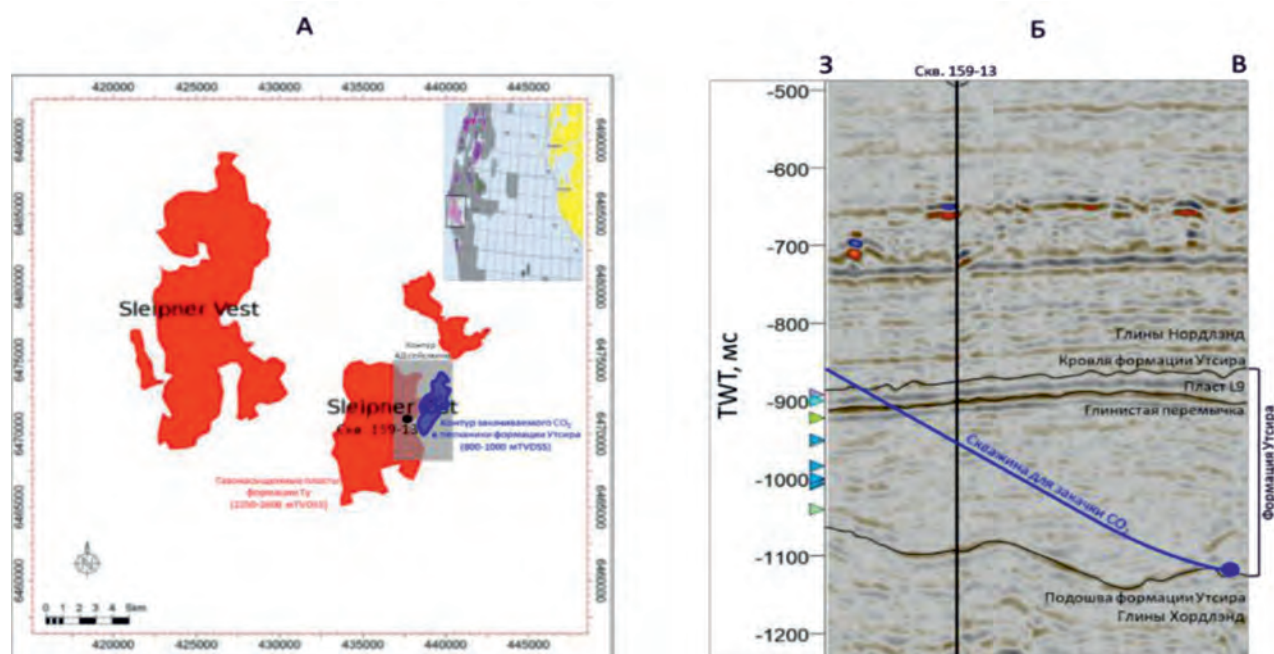
ной литофациальной изменчивостью как по площади, так и по разрезу. Закачка проводилась через единственную скважину с постоянной скоростью 0.85 млн. тонн CO_2 в год, общий объем закачки составил 15.5 млн тонн.

Объект исследования над точкой закачки CO_2 в формацию Утсира полностью покрыт сейсмической съемкой 3D МОГТ объемом в 300 км² в 1994 г. Эти данные получены до начала разработки и являются базовыми для последующих мониторинговых съемок 4D, которые выполнялись в 1994, 1999, 2001, 2006, 2008, 2010 г. При выполнении полевых работ применялись различные системы наблюдений, параметры которых показаны далее в таблице 1.

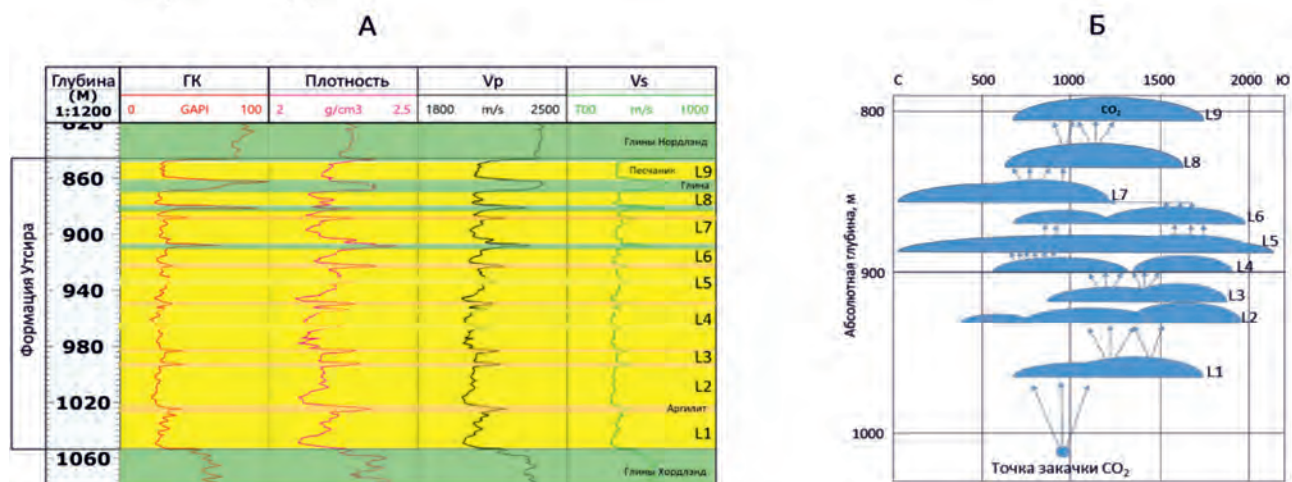
Изначально водонасыщение слои песчаников и аргиллитов формации Утсира выделяемые по ГИС скважины 159-13 (Рис. 2А) плохо выделяются на первоначальных временных разрезах МОГТ (Рис. 1Б), однако последующих съемках в связи с накоплением в них CO_2 и изменению упругих характеристик на временных сейсмических разрезах выделяется многоярусный плюм (Рис. 2Б)

Съемка	1	2	3	4	5	6	7
Дата съемки, день/мес./год	6/8/94 - 10/9/94	8/10/99 - 10/10/99	27/9/01 - 1/10/01	13/6/04 - 13/8/04	2/6/06 - 20/6/06	4/5/08 - 15/6/08	15/10/10 - 17/10/10
Направление отстрела, град.	0.853	0.853	0.850	90.00	0.850	0.850	0.850
Объем источников, л	3400	3542	3390	4280	3660	3660	4135
Количество кос	5	4	6	10	8	9	12
Длина записи, мс	5500	4500	4500	6000	6000	6000	4608
Размер бина, м*м	6.25*25	6.25*25	6.25*25	6.25*18.75	6.25*25	6.25*25	6.25*18.75
Шаг дискретизации, мс	2	2	2	2	2	2	2

▲ Табл. 1. Параметры 3D сейсмических съемок.



▲ Рис. 1. Контуры залежей проекта Слейпнир (А) и сейсмический разрез через скважину 159-13 (Б).



▲ Рис. 2. ГИС скважины 159-13 (А) и схематичный рисунок накопления CO_2 в пластах формации Утсира на конец закачки (Б).

накапливаемый в песчаных пластах L9-L1 формации Утсира [2].

4D сейсмомониторинг позволяет оценить, как целостность покрышек, так и остаточную емкость пород коллекторов [3]. Пласты Утсира объекта Слейпнир, являются «газовым месторождением наоборот» так как в них выполняется закачка газа, а не его добыча, что позволяет, довольно точно, понять, как меняется флюидонасыщение пласта и прогнозировать его с высокой долей достоверности.

Методы исследований и результаты

В случае выполнения процедуры синхронной инверсии или AVO-анализа, необходимо оценить пределы их разрешающей способности и неопределенности, которые они могут в себе содержать, не важно идет ли речь о данных 3D или 4D сейсморазведки.

Основным целевым объектом, с которым будет работать AVO-анализ [4] или синхронная инверсия [5], в случае объекта Слейпнир, или любого другого объекта, будет пласт песчаника с двух сторон ограниченный пластами глины или аргиллитов, обладающий определенной эффективной мощностью, пористостью и общей мощностью. Любая процедура инверсии или AVO-анализа исследует насыщенность пласта и его литологические характеристики.

Перед выполнением процедуры любой инверсии, всегда целесообразно оценить параметры чувствительности AVO-анализа и процедуры синхронной инверсии, которая использует его в своей основе.

На примере верхнего пласта-песчаника L9 и ограничивающих его глинистых пластов (Рис. 3) рассмотрим два основополагающих фактора, влияющих на

Глубина (м)	Плотность	Vp	Vs
1:240	2 g/cm ³ 2.5	1800 m/s 2500	1000 m/s 1000
846	2.27	2366	898
848			
850			
852			
854	2.20	2088	802
856			
858			
860			
862			
864	2.33	2370	890

▲ Рис. 3. Характеристики пласта-коллектора L9 (до закачки CO₂) и ограничивающих его глинистых пластов.

изменения упругих характеристик водоносного пласта-коллектора при закачке в него CO₂.

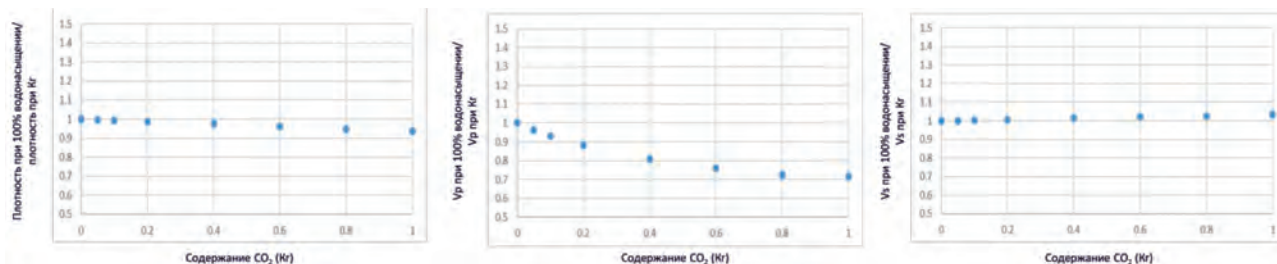
Фактор 1: изменение упругих модулей пористой породы при замещении воды на CO₂.

Фактор 2: изменение упругих и емкостных характеристик породы при увеличении порового давления в процессе закачки диоксида углерода.

Для оценки фактора 1 воспользуемся уравнениями Гассмана. Рис. 4 иллюстрирует результаты моделирования при флюидозамещении. Вертикальная ось представляет собой отношение упругих характеристик при 100% водонасыщении к соответствующим характеристикам при последовательном увеличении содержания CO₂.

Моделирование показало, что характеристикой наиболее чувствительной к содержанию CO₂ является скорость продольной волны Vp. Максимальное уменьшение Vp при полном замещении воды на диоксид углерода составляет 30%.

Для оценки фактора 2 воспользуемся формулой Эберхарата-Филипса [6], описывающей связь Vp (в км/с) с коэффициентом пористости Kп, глинистости Kгл



▲ Рис. 4. Вариация упругих характеристик пласта L9 при замещении воды на CO_2 .

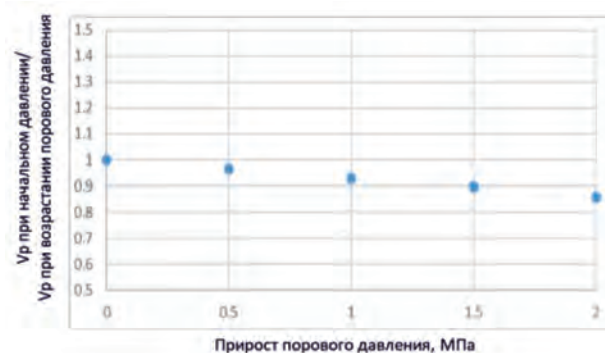
и эффективным давлением P_e (разницей между литостатическим и поровым давлениями) [в 100 МПа]:

$$V_p = 5.77 - 6.94K_p - 1.73 \sqrt{K_{gl}} + 0.446(P_e - e^{-16.7P_e})$$

Песчаники формации Утсира характеризуются высокой пористостью $K_p=30-35\%$ и низкой глинистостью $K_{gl}=5-10\%$. По результатам анализа давлений закачки на конец 2015 г. поровое давление возросло на 2 МПа относительно начального, что с учетом измеренной на керне сжимаемости порового пространство могло привести к увеличению пористости на 10%. Результаты расчетов (Рис. 5) показывают, что максимальное уменьшение скорости при возрастании порового давления на 2 МПа составляет 15%.

Результаты пороупругого моделирования демонстрируют превалирование фактора 1 над фактором 2 и сонаправленное действие обоих факторов направленных на уменьшение скоростей продольных волн при закачке диоксида углерода

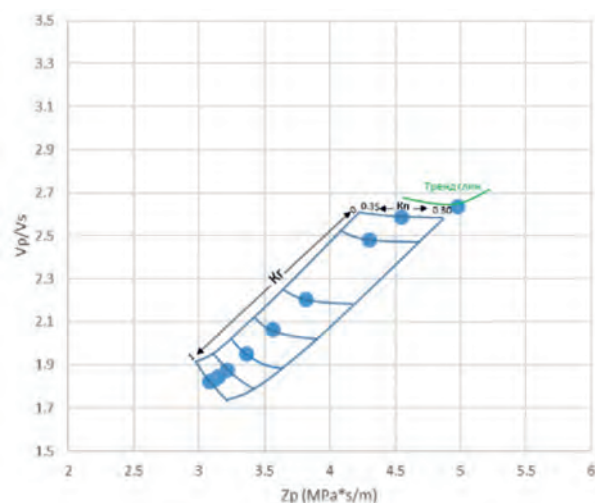
▼ Рис. 5. Вариация скорости продольной волны при увеличении порового давления в результате закачки в пласт CO_2 .



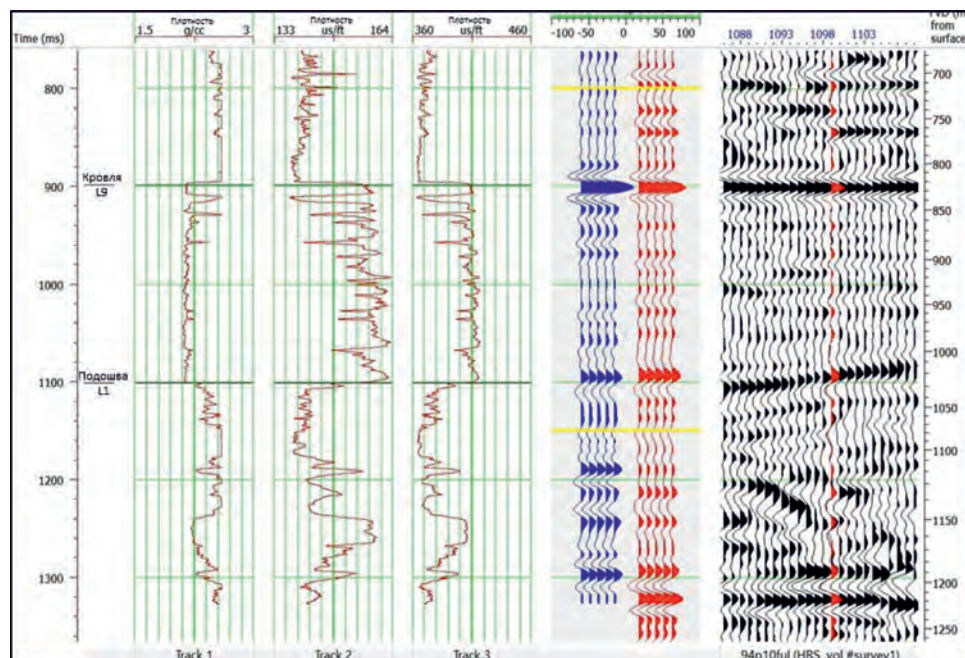
в изначально водонасыщенный пласт. Увеличение параметров пористости, глинистости, газонасыщенности, порового давления приводит к уменьшению в разной степени скоростей продольных волн.

На Рис. 6 представлена итоговая палетка для оценки изменений упругих характеристик пластов формации Утсира в зависимости от изменения коэффициента пористости и коэффициента газонасыщенности (K_g). Шкала изменений K_g нелинейна, при газосодержании ниже 60% отмечается слабая дифференциация данных в осях V_p/V_s - Z_p . Для синхронной инверсии это, означает, что при закачке CO_2 в исследуемый пласт, мы престанем информацию о степени насыщения после роста газового насыщения в пласте, выше 60%, однако остается чувствительность к изменению пористости.

▼ Рис. 6. Зависимость отношения скоростей P- и S-волн (V_p/V_s) от продольного импеданса Z_p для пластов L9-L1.



► Рис. 7.
Сейсмострати-
графическая
привязка для
скважины 159-13
в интервале
исследования.



Следующим шагом оценим чувствительность данных сейсморазведки к изменениям не только типа флюида в пласте коллекторе и его пористости, но и к изменениям эффективной мощности.

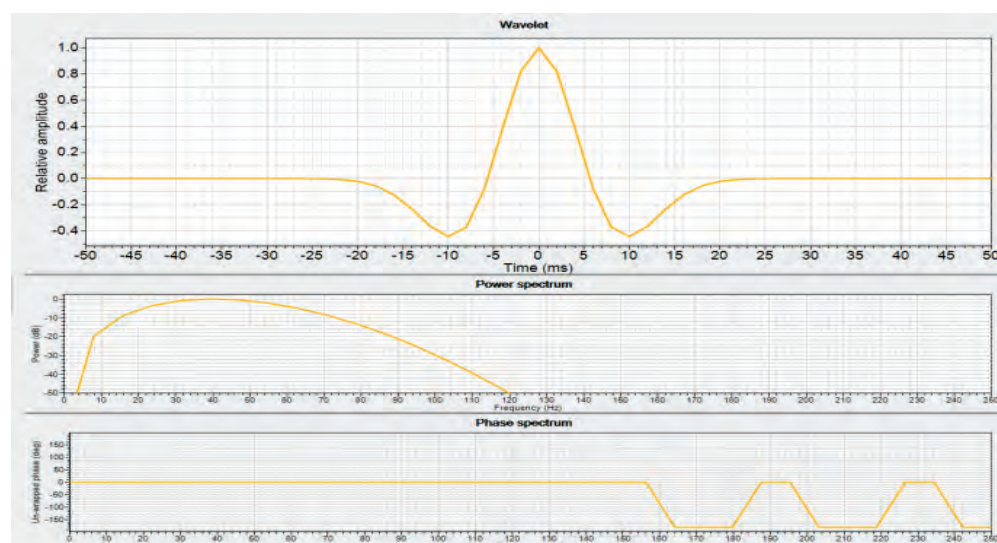
На рис. 7 представлена сейсмостратиграфическая привязка для скважины 159-13 в интервале формации Утсира.

В качестве модельного импульса используется импульс Рикера с широким диапазоном частот 5-120 Гц и максимумом на частоте 40 Гц (Рис. 8) соответствующий импульсам, извлеченным из данных сейсмомониторинга.

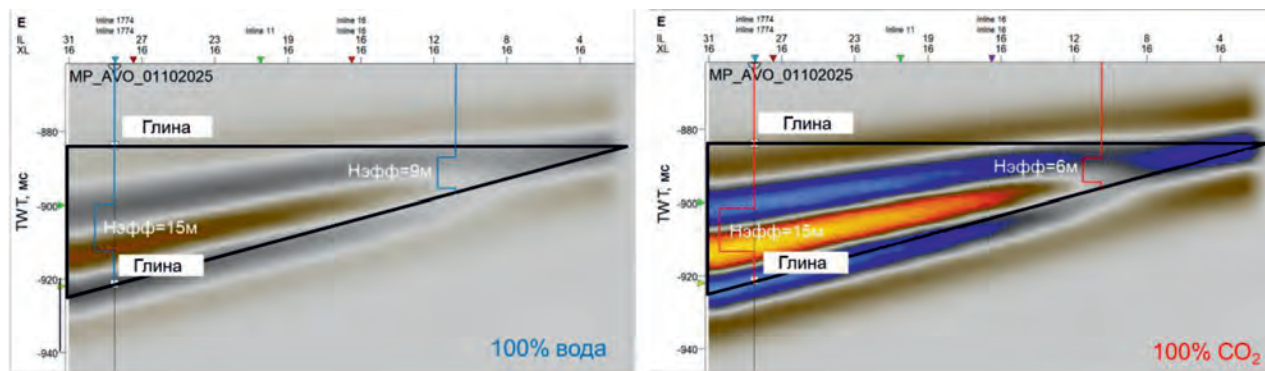
Для данного импульса выполним

анализ «модели клина» для определения чувствительности и разрешающей способностей данных сейсморазведки к параметру краевых зон, контактов вода- CO_2 .

За основу модели возьмём 3-х пластовую модель глина-песчаник L9-глина, изменение эффективной мощности будем моделировать путем замещения характеристик коллектора характеристиками подстилающих глин. Помимо изменения эффективной мощности произведём полное замещения воды на CO_2 . Результаты моделирования (Рис. 9) показывают, что при насыщении водой

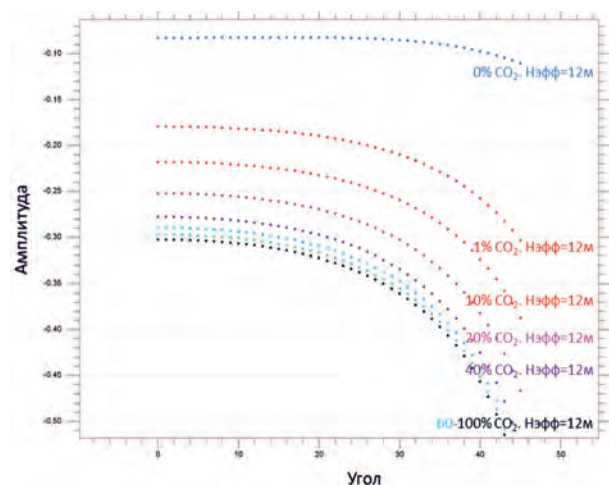


► Рис. 8.
Параметры
модельного
импульса.



▲ Рис. 9. «Модель клина».

возможно выделить пласт минимальной мощностью 9 м, а при закачке в данный пласт CO_2 возрастает контрастность и выделяемая минимальная эффективная толщина пласта уменьшается до 6 м.



▲ Рис. 10. Моделирование AVO откликов для насыщаемого газом коллектора.

Рассчитаем коэффициенты отражения, соответствующие середине эффективной мощности пласта L9 используя аппроксимацию Шу для уравнений Аки и Ричардса [7]. При этом будем варьиро-

вать эффективную мощность пласта (3, 6, 9, 12, 15 м) и степень насыщения CO_2 (0, 1, 10, 20, 40, 60, 80, 100%).

На Рис. 10 показаны результаты моделирования при различном содержании диоксида углерода в изначально полностью водонасыщенном пласте мощностью 12 м.

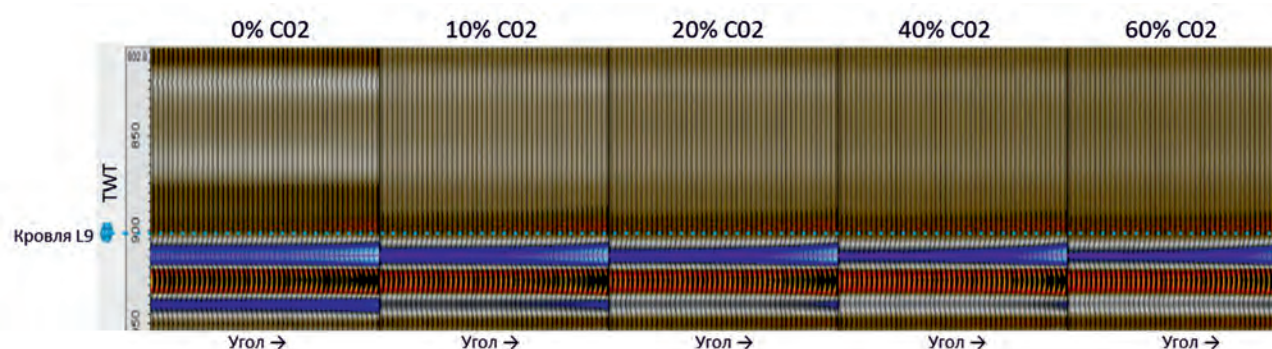
Отмечается существенное различие в AVO отклике для содержания CO_2 от 0% и до 40%. При насыщении газом, выше 40%, различия в градиенте AVO отклика, практически исчезают.

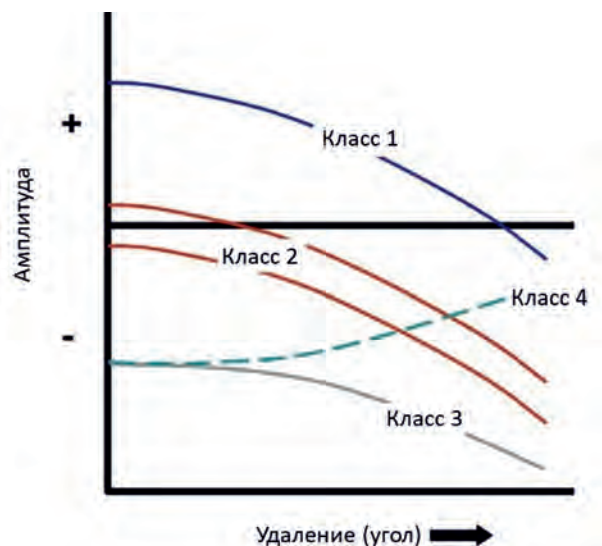
Моделирование AVO отклика на сейсмограммах (Рис. 11), так же показывает, незначительное различие между угловыми диапазонами между 40 и 60 процентами газового насыщения.

Следует так же отметить, что все полученные сейсмограммы относятся к III классу AVO эффектов (Рис. 12).

Класс III проявляется отрицательными амплитудными аномалиями на сейсмических разрезах, так как имеет большую

▼ Рис. 11. Моделирование AVO откликов для коллектора, насыщаемого CO_2 .

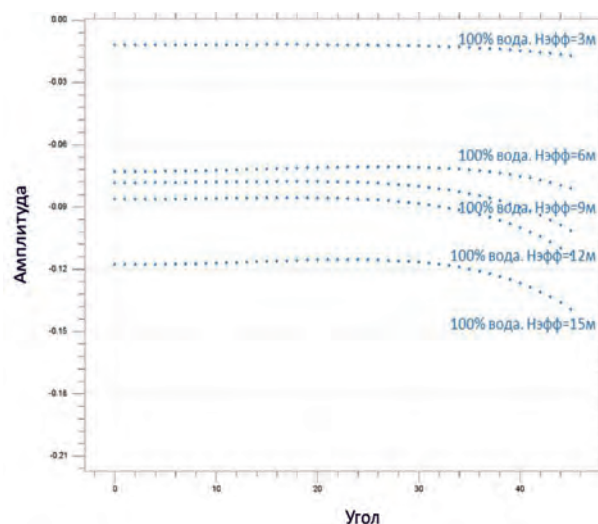




▲ Рис. 12. Классификация AVO откликов.

отрицательную отражательную способность при любых удалениях. Отражения приемлемы для успешного выполнения AVO-анализа, поскольку данный тип коллектора уверенно фиксируется на сейсмических разрезах виде «ярких пятен», а высокое соотношение сигнал-помеха способствует высокой достоверности AVO-анализа в процессе интерпретации данных. Однако для синхронной инверсии, выполняемой в режиме 4D, при росте содержания CO_2 в пласте выше 50% дополнительную информацию о литологии и емкостных характеристиках пласта получить практически невозможно.

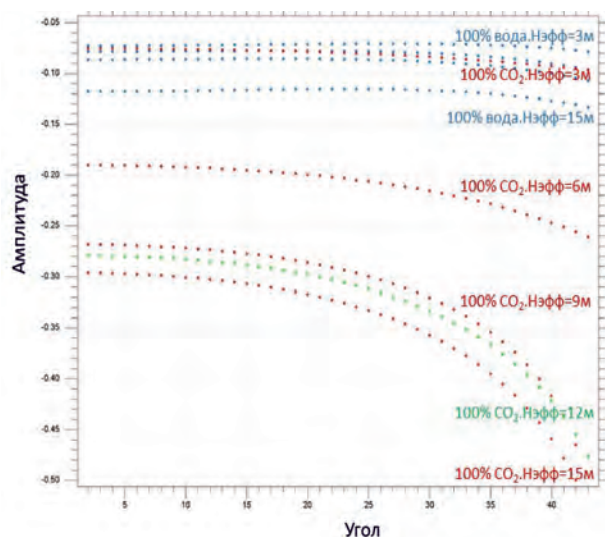
По результатам «модели клина» и оценки влияния газонасыщения на AVO характеристики, была выполнена оценка влияния эффективной толщины пласта на AVO характеристики. При выполнении моделирования эффективной мощности было отмечено, что значимые изменения присутствуют как в амплитуде сигнала, так и в диапазоне изменения сигнала, в зависимости от эффективной мощности. Наибольший градиент кривой амплитуда-угол достигается при наибольшей эффективной мощности. Так же отмечено, что существенные изменения градиента начинаются после 30° углового диапазона (Рис. 13).



▲ Рис. 13. Моделирование AVO откликов для изменения эффективной мощности в пласте L9 насыщенном водой. Диапазон изменения эффективной мощности – 3, 6, 9, 12, 15 м.

После того как было выполнено AVO моделирование эффективной мощности, так же было выполнено моделирование насыщения газом этих эффективных мощностей. На Рис. 14 показано сравнение мощностей пласта L9, насыщенных водой и их AVO характеристики. Отмечается, что верхняя красная кривая соответствующая эффективной мощности – 3 м и газовому насыщению 100% лежит в одном диапазоне амплитуд вместе с кривыми соответствующими 100% насыщению водой и эффективными мощностями 9-15 м. Остальные кривые красного и зеленого цвета соответствующие 100% насыщению пласта CO_2 и эффективной мощности 6, 9, 12, 15 м, по своей амплитуде и градиенту существенным образом отличаются от кривых соответствующих насыщению водой (Рис. 14).

Анализ полученных кривых, показывает существенное отличие насыщенных кривых от кривых полученных путем изменения эффективной мощности, за исключением насыщенной кривой, полученной при эффективной мощности



▲ Рис. 14. Моделирование AVO откликов для изменения эффективной мощности в пласте L9 насыщенном водой. Диапазон изменения эффективной мощности – 3, 6, 9, 12, 15 м.

– 3 м, то есть существенно ниже сейсмического разрешения.

Полученные кривые позволяют оценить потенциальную способность AVO-анализа и синхронной инверсии, выполняемой в 3D или 4D режиме учитывать эффективную мощность и флюидонасыщение.

Основным выводом, который можно сделать из полученных моделей, является факт, что при газовом насыщении слабоконтрастного, в акустическом отношении, терригенного пласта, при росте его насыщения выше 50% возможность оценки насыщенности газом пропадает.

AVO-анализ является мощным инструментом для геофизиков, однако использование упрощенных моделей геологической среды подчеркивает необходимость более комплексного подхода к интерпретации сейсмических данных, как и применение полноволновой инверсии в процессе обработки данных сейсморазведки.

Выводы

- Выполнено пороупругое моделирование для пластов различной эффективной мощности различного насыщения CO_2 .

- Выполнен анализ AVO характеристик для оценки чувствительности к различным вариантам эффективной мощности и насыщения газом.

- Отмечено что минимальная мощность пласта, насыщенного CO_2 выделяемая по данным сейсморазведки на месторождении Слейпнир составляет 6 м.

- Выявлено что при росте насыщения газом выше 50% AVO характеристики становятся не чувствительны к дальнейшему росту насыщения.

- Полученный на объекте Слейпнир опыт будет применен к объектам на территории РФ где в данный момент применяется 4D сейсмомониторинг с выполнением не только акустической, но и синхронной инверсии и последующим количественным анализом, а также интеграцией в гидродинамическую модель и оценкой чувствительности выполненных процедур.

Список источников

1. Ампилов Ю.П., Горбачев С.В. Сейсморазведка 4D в России: опыт, проблемы, перспективы// Геология и геофизика, 2025, №7, с. 908-9021.
2. Лекомцев А.В., Подбережный М.Ю. 4D синхронная инверсия как метод количественного анализа данных 4D сейсморазведки// Приборы и системы разведочной геофизики, 2025, №3, с. 98-106.
3. Дашков Р.Ю., Гафаров Т.Н., Облеков Р.Г., Хабаров А.В., Тимофеева О.В., 4D-Сейсморазведка как инструмент эффек-

тивного мониторинга разработки морских месторождений// Газовая Промышленность, 2022, №7, с. 835-840.

4. Воскресенский Ю.Н., Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей углеводородов// Изд. Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001.

5. Ампилов Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В. и др. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 1// Технологии сейсморазведки, 2009, № 4. с. 3–16.

6. D. Eberhart-Phillips, D-H. Han, and M. D. Zoback. Empirical relationships among seismic velocity, effective pressure, porosity, and clay content in sandstone// Geophysics, 1989, V.54, p.82-89

7. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы, Т.1, 1983, –520 с.

Подробнее об авторах



Лекомцев
Андрей Валерьевич



Подбережный
Максим Юрьевич