

УДК 550.812.14

Построение достоверной геологической модели среды путем оптимизации ее детальности

Д.Н. Крылов

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, с.п. Развилковское, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1
E-mail: D_Krylov@vniigaz.gazprom.ru

Ключевые слова:

геологическая модель, оптимизация, детальность, уровень помех, достоверность параметров.

Тезисы. Детальность и достоверность – тесно связанные характеристики геологической модели. Критерием достоверности геологической модели можно считать точность, или ошибку, наполняющих ее параметров, полученных при фиксированной детальности модели (применительно к пластовым моделям это распределение мощностей пластов, к картам – распределение размеров выделяемых площадных аномалий).

Для успешного решения конкретных интерпретационных задач (определения направлений геологоразведочных работ и выделения перспективных объектов, подсчета запасов углеводородов, проектирования разработки месторождений и т.д.) необходимо определить оптимальное соотношение детальности модели и ее достоверности. Детальность модели в первую очередь определяется особенностями строения изучаемого геологического разреза; плотностью геолого-геофизических наблюдений на единицу площади (бурение, гравимагниторазведка, сейсморазведка и т.д.) и дизайном съемки (например, размер бина при сейсморазведке 3D); спектральным составом или разрешением имеющихся геолого-геофизических данных (например, высокочастотные данные геофизических исследований скважин, среднечастотные данные сейсморазведки и низкочастотные данные гравимагниторазведки); уровнем помех, искажающих имеющиеся геолого-геофизические данные. Интерпретатор имеет реальную возможность подавлять помехи, приводя в конечном итоге их характеристики к модели случайного шума, и несколько улучшить при этом спектральный состав данных, а также регулировать детальность модели.

В статье на основе тестовых материалов обосновывается необходимость регулирования/оптимизации детальности модели с целью получения достоверных характеристик среды. Сделан вывод о существовании универсальной зависимости достоверности прогнозируемых параметров от степени аппроксимации реальной среды, т.е. детальности модели, уровня помех и плотности наблюдений.

Критерием достоверности геологической модели будем считать точность, или ошибку, наполняющих ее параметров, полученных при фиксированной детальности модели (для пластовых моделей это распределение мощностей пластов, для карт – распределение размеров выделяемых площадных аномалий).

Детальность и достоверность – тесно связанные характеристики геологической модели. Для успешного решения конкретных интерпретационных задач (определения направлений геологоразведочных работ и выделения перспективных объектов, подсчета запасов углеводородов и проектирования разработки месторождений) прежде всего необходимо определить оптимальное соотношение детальности модели и ее достоверности [1–5].

Детальность модели в первую очередь определяется:

- особенностями строения изучаемого геологического разреза;
- плотностью геолого-геофизических наблюдений на единицу площади (бурение, грави- и магниторазведка, сейсморазведка и т.д.) и дизайном съемки (например, размер бина при сейсморазведке 3D);
- спектральным составом или разрешением имеющихся геолого-геофизических данных (например, высокочастотные данные геофизических исследований скважин (ГИС), среднечастотные данные сейсморазведки и низкочастотные данные грави- и магниторазведки);
- уровнем помех, «искажающих» имеющиеся геолого-геофизические данные.

Интерпретатор имеет реальную возможность подавлять помехи, приводя в конечном итоге их характеристики к модели случайного шума, и несколько улучшить

при этом спектральный состав данных, а также регулировать детальность модели. Все остальное от него не зависит [1–4].

Далее на основе тестовых материалов рассмотрим и обоснуем необходимость регулирования и оптимизации детальности модели с целью получения достоверной геологической модели среды. Согласно опыту автора, используемые на практике детальные модели, например результаты многочисленных инверсий, могут быть очень «красивы», однако при этом как минимум бесполезны [4, 6].

Повышение достоверности информации, полученной в ходе ГИС, путем оптимизации ее детальности

Рассмотрим набор из четырех различных кривых ГИС, каждую из которых будем считать истинной (полностью достоверной) характеристикой геологической среды. Для каждой из четырех кривых сгенерированы пять реализаций случайного шума с нулевым математическим

ожиданием. Энергия каждой реализации шума (среднее значение суммы квадратов амплитуд) калибровалась по отношению к энергии кривой ГИС таким образом, чтобы соотношение помеха/сигнал (N/S) принимало семь различных значений от 0,1 до 0,6. Откалиброванный шум суммировался с исходной кривой ГИС с целью получения аналога «реальной» кривой, искаженной помехами. Затем детальность «реальной» кривой ГИС регулировалась путем ее осреднения в скользящем окне постоянного размера и статистической фильтрации по алгоритму «умного» осреднения в «живом» окне переменного размера [7–9]. Эффективность осреднения (повышение достоверности параметров) оценивалась путем сравнения коэффициентов корреляции исходной (истинной) кривой ГИС с аналогом «реальной» кривой, искаженной помехой, до и после ее осреднения (табл. 1).

На рис. 1 показан результат «умного» осреднения одной из четырех кривых ГИС.

Таблица 1

Зависимость достоверности модели от ее детальности и уровня случайных помех

N/S	Коэффициент корреляции после «умного» осреднения	Диапазон размеров окна «умного» осреднения, отсчетов	Коэффициент корреляции после сглаживания	Размер окна сглаживания, отсчетов	Коэффициент корреляции исходной кривой с аналогом «реальной» кривой
0,10	0,82	5...7	0,77	6	0,91
0,20	0,80		0,76		0,75
0,25	0,79		0,75		0,68
0,30	0,77		0,74		0,61
0,40	0,76		0,72		0,50
0,50	0,73		0,70		0,44
0,60	0,71		0,67		0,37

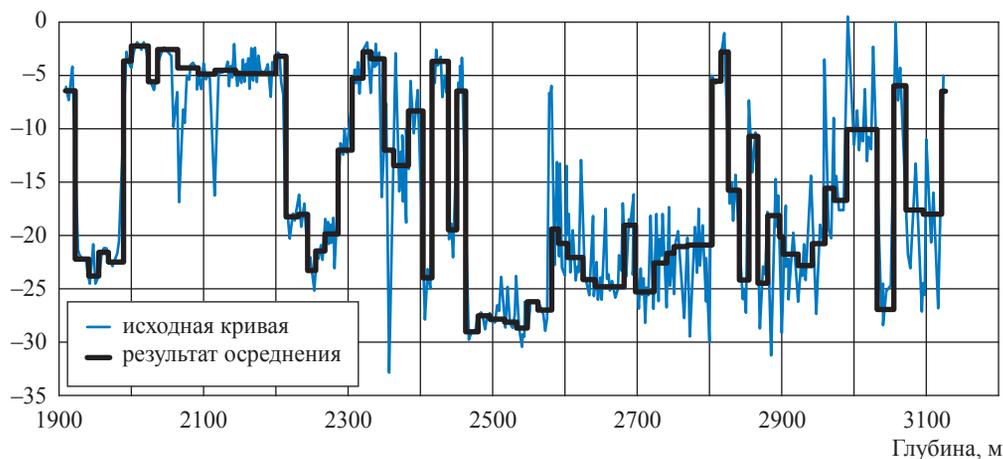


Рис. 1. Результат «умного» осреднения кривой потенциала собственной поляризации в интервале 1900...3200 м: выполнены 5 итераций; размеры окон составили 20, 25, 35 и 50 отсчетов

После нескольких итераций «умного» осреднения исходная кривая ГИС трансформировалась в «пластовую» модель с видимой потерей детальности [8]. Заметим, что размер «пластов» определяется диапазоном размера окон.

С целью минимизации количества тестов диапазон размеров окна (5...7) и число итераций (2) «умного» осреднения задавались постоянными. Классическое сглаживание выполнялось в окне из 6 отсчетов. В табл. 1 приведены осредненные результаты 20 тестов (пять реализаций случайного шума для четырех кривых ГИС) для каждого из 7 фиксированных соотношений N/S . Достоверность данных до и после осреднения (см. коэффициенты корреляции во 2-м, 4-м и 6-м столбцах табл. 1) постепенно уменьшается по мере возрастания уровня шума. Однако осреднение в большинстве случаев позволяет сохранять коэффициенты корреляции после осреднения и после сглаживания (см. столбцы 2 и 4 в табл. 1) на высоком уровне за счет снижения детальности кривых ГИС. Заметим, что снижение детальности кривых ГИС при $N/S = 0,1$ дает обратный результат, поскольку искажающее влияние осреднения превосходит эффект от добавления случайного шума. При $N/S = 0,1$ после «умного» осреднения в окне из трех отсчетов корреляционный коэффициент во 2-м столбце табл. 1 увеличился до 0,93, т.е. при более «щадящем» осреднении уже получен положительный эффект. При $N/S = 0,6$ после «умного» осреднения в окне из пяти, семи и девяти отсчетов тот же корреляционный коэффициент вырос уже до 0,725. Таким образом, подтверждается наличие зависимости между достоверностью параметров модели, ее детальностью и уровнем случайного шума.

Достоверность амплитудной стохастической сейсмической инверсии на основе уточнения параметров пластовой модели среды

Продemonстрируем эффект оптимизации детальности пластовой модели на примере проведения стохастической сейсмической инверсии. Интерпретатором на основе реальных данных построена тонкослоистая пластовая скоростная модель (нулевой вариант v_0), которая представляет (имитирует) в данном случае истинный, т.е. полностью достоверный, геологический разрез. На ее основе тем же интерпретатором сформированы четыре варианта ($v_1...v_4$) укрупненных (усредненных) моделей различной детальности (рис. 2). Попытка уточнить каждую из этих четырех моделей путем последовательного автоматического подбора скоростей в пластах по критерию увеличения подобия эталонной сейсмической трассы, соответствующей нулевому варианту модели, и уточняемой, соответствующей одной из усредненных моделей, приводила к изменению параметров последней, которое, собственно, и является ошибкой аппроксимации, возникшей вследствие укрупнения пластов «нулевой» модели. В табл. 2 показан закономерный рост ошибки аппроксимации с уменьшением детальности укрупненной модели [4, 6, 10].

Однако как только в эталонную сейсмическую трассу были добавлены различные реализации случайной помехи того же частотного состава (во всех случаях $N/S = 5$), тенденция искажения параметров изменилась, а «нулевой» вариант уже оказался неоптимальным. В данном случае оптимальным вариантом является вариант v_1 , характеризуемый наименьшей ошибкой 3,14 %. При последующем уменьшении отношения N/S оптимальными вариантами детализации (укрупнения) модели последовательно стали v_2 и v_3 с меньшей детальностью аппроксимации.

Таблица 2

Ошибки оптимизации исходных скоростных моделей различной детальности в отсутствие сейсмической помехи и при условии ее ввода ($N/S \approx 5$): осредненные результаты пяти тестов

Скоростная модель	Среднеквадратическая ошибка (СКО) аппроксимации скоростных параметров модели	
	при отсутствии сейсмической помехи	при условии ввода помехи ($N/S = 5$)
v_0	0,0	5,03
v_1	0,37	3,14
v_2	1,43	4,56
v_3	2,15	4,57
v_4	5,62	5,74

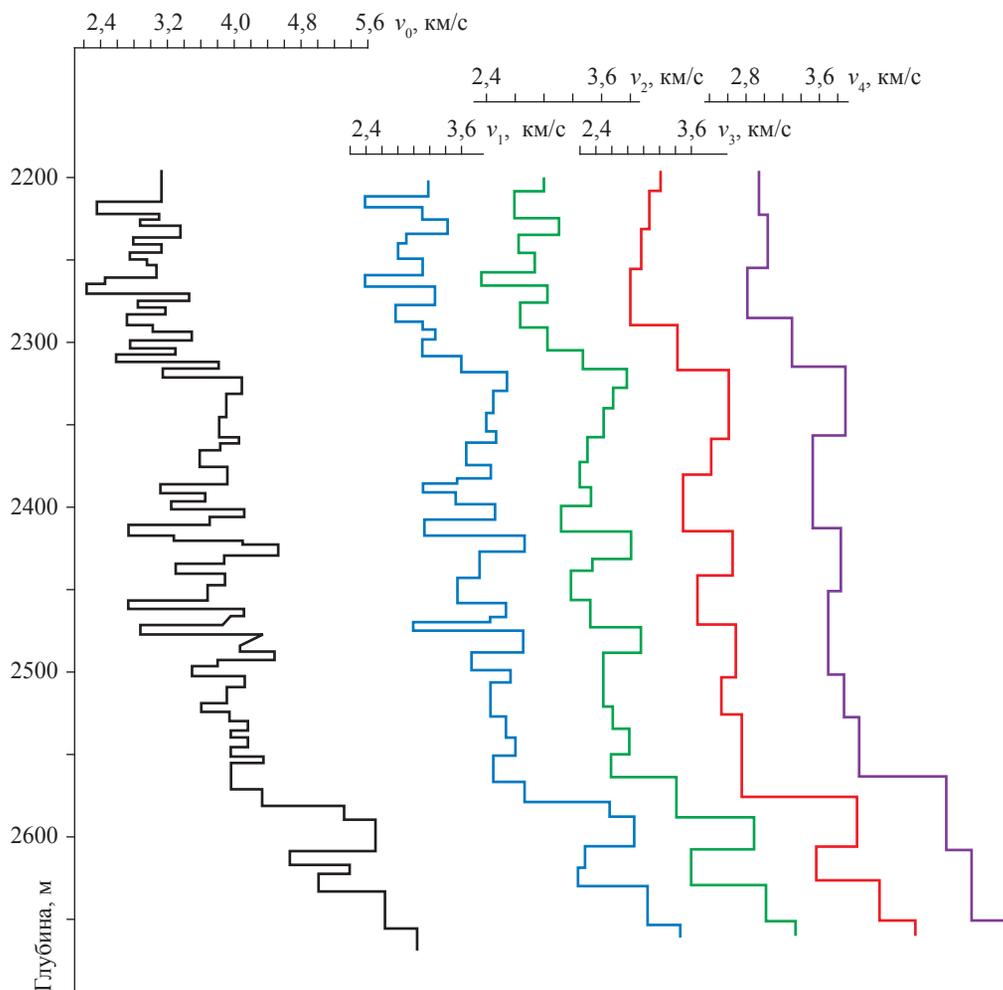


Рис. 2. Варианты строения исходных скоростных моделей различной детальности

Интерполяция данных геофизических исследований

Оптимизация детальности модели нужна и при интерполяции данных для исключения грубых ошибок, которые могут возникать при формальном проведении этой процедуры. Рассмотрим некоторые результаты тестирования алгоритмов интерполяции [11].

2D-матрицы параметров, полученные на основе сейсмических слайсов реального интерпретационного проекта МОГТ¹-3D, искусственно прореживались (обнулялись актуальные значения). Затем обнуленные значения восстанавливались с использованием различных алгоритмов интерполяции, оценивалась ошибка интерполяции. Исходные матрицы (295×264) значений сейсмических амплитуд и частот приведены на рис. 3. Набор данных 1 представлен сейсмическими амплитудами после «умного»

осреднения, позволившего оконтурить области близких значений. Произошло укрупнение площадных аномалий, области близких значений расширились и выделяются более контрастно. Набор данных 2 представлен сейсмическими частотами, которые не подвергались обработке. Высокочастотный разброс значений поля очевиден.

Смоделирована ситуация, типичная для профильных наблюдений. Для этого обнулили 80, 90 и 95 % актуальной информации путем прореживания каждых четырех из пяти, девяти из 10 и 19 из 20 столбцов матриц. Достоверность результатов интерполяции высокочастотного набора данных 2, характеризуемого разбросанными значениями, оказалась неприемлемой во всех случаях. Наблюдается резкий рост (от 70 до 110 %) СКО интерполяции с применением нескольких алгоритмов (рис. 4). Хотя интерполяция на основе способа «умного» осреднения показала лучший

¹ МОГТ – метод общей глубинной точки.

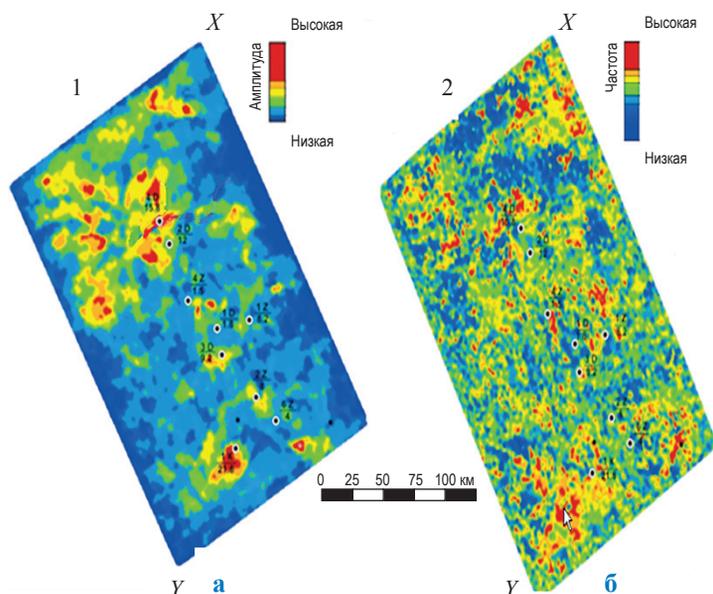


Рис. 3. Исходные матрицы (295×264) значений сейсмических амплитуд после «умного» осреднения (а, набор данных 1) и не подвергавшихся обработке частот (б, набор данных 2) [11]

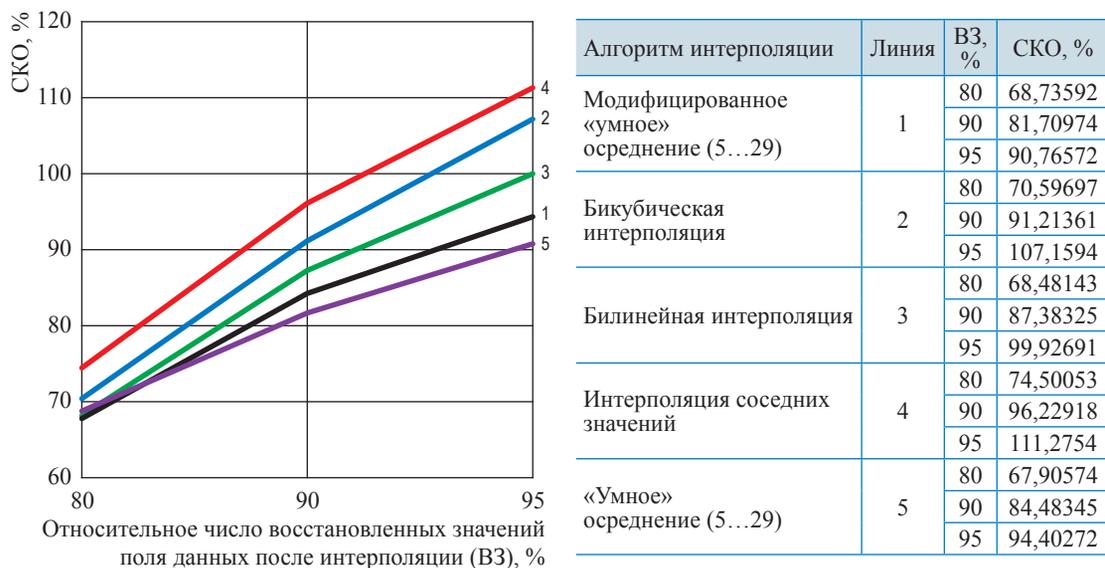


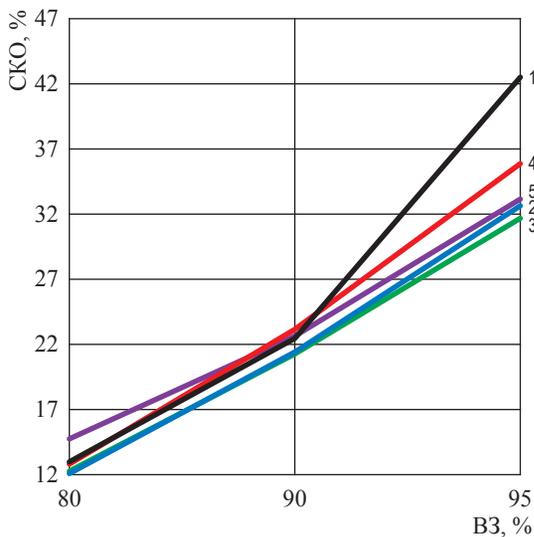
Рис. 4. Результат интерпретации «высокочастотного» набора данных 2 (см. рис. 3б), характеризуемого разбросанными значениями [11]

результат, однако его ошибка все же слишком значительна – 68...91 %.

В то же время, достоверность результатов интерполяции «среднечастотного» укрупненного набора данных 1 с оконтуренными областями близких значений оказалась вполне приемлемой. Отмечается умеренный рост СКО интерполяции с применением нескольких алгоритмов от 12 до 43 % (рис. 5). При этом линейная интерполяция дала лучший результат. Таким образом, предварительная обработка

данных с целью оптимизации их детальности (укрупнения аномалий) обеспечила корректное решение задачи интерполяции.

Поскольку методика интерполяции данных и особенности различных инверсий представляют собой самостоятельные сложные темы, здесь мы не будем затрагивать все связанные с ними проблемы. В данном случае было важно показать лишь принципиальную роль оптимизации детальности поля данных, не вдаваясь в подробности.



Алгоритм интерполяции	Линия	ВЗ, %	СКО, %
Модифицированное «умное» осреднение (5...29)	1	80	14,6715
		90	22,551
		95	33,1817
Бикубическая интерполяция	2	80	12,0629
		90	21,4706
		95	32,661
Билинейная интерполяция	3	80	12,2479
		90	21,2475
		95	31,7313
Интерполяция соседних значений	4	80	12,7065
		90	23,1734
		95	35,918
«Умное» осреднение (5...29)	5	80	12,9188
		90	22,4842
		95	42,5884

Рис. 5. Результат интерпретации «среднечастотного» набора данных 1 (см. рис. 3а), характеризуемого разбросанными значениями [11]

«Информационный резонанс» как результат оптимизации детальности

По всей видимости, можно сделать вывод о наличии универсальной зависимости достоверности прогнозируемых параметров от степени аппроксимации свойств реальной среды (рис. 6). Само существование подобной закономерности не раз подтверждалось на практике, но важно понимать, что она имеет именно универсальный характер [4–6, 10]. Выявлению названной зависимости серьезно препятствовало недостаточное развитие технологий корректной

аппроксимации данных [4, 5, 8, 12]. Зачастую на этапе изменения детальности модели вносились критические ошибки из-за неудачного выбора алгоритма осреднения или объединения пластов модели. Таким образом, приступая к решению конкретной интерпретационной задачи, необходимо подбирать не только наиболее подходящие тип инверсии данных, сейсмический атрибут, алгоритм интерполяции и т.д., но и продумать методику выбора детальности модели среды. Это особенно наглядно демонстрирует пример интерпретации поля

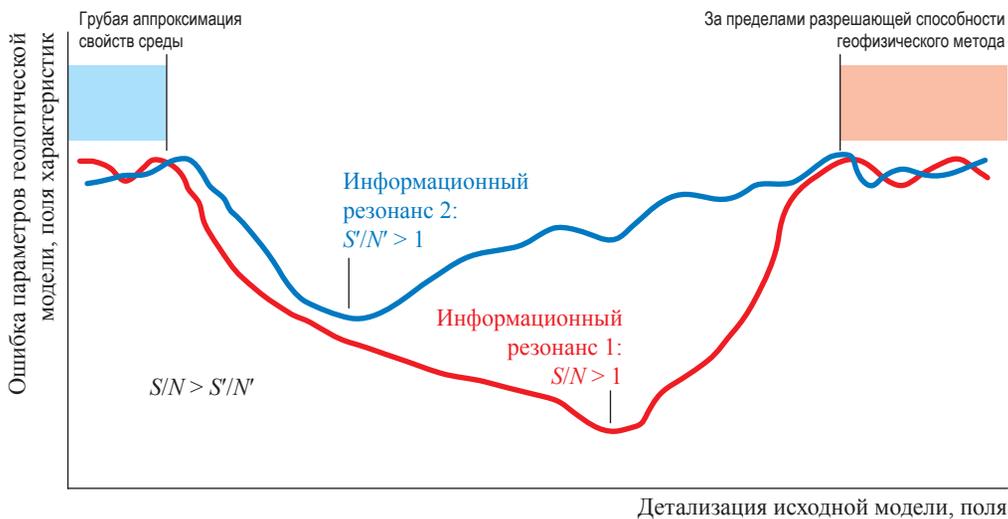


Рис. 6. Принципиальная схема процесса достижения наиболее достоверного результата (минимизации ошибки прогнозируемых параметров модели или характеристик среды) путем оптимизации детальности исходных данных в условиях присутствия помех и ограниченного разрешения геофизических данных [5]

сейсмических атрибутов [5]. Попытки рассчитать и проанализировать множество самых различных атрибутов оказались малоэффективными, в то время как «умное» осреднение поля значений простейших атрибутов – сейсмических амплитуд и частот – позволило успешно решить поставленную задачу прогноза эффективной мощности коллектора.

Методика аппроксимации различных видов данных не может быть универсальной. В первую очередь она определяется поставленной интерпретационной задачей и типом используемой инверсии. На практике выбор методики в значительной степени зависит от опыта и субъективных ощущений интерпретатора. Однако в ряде случаев могут быть использованы единые подходы, основанные на близких вычислительных схемах, что значительно упрощает процесс поиска оптимального варианта аппроксимации. Примером может служить технология «умного» осреднения.

Лишний раз отметим, что присутствие погрешностей в интерпретируемых данных должно быть ограничено. Наиболее часто оно оценивается показателем S/N . Если уровень «помехи» превышает «полезный сигнал» ($S/N < 1$), то интерпретация становится бессмысленной [4]. В практике сейсмической интерпретации в качестве начального условия обычно принимается $S/N > 5$.

Рассмотрим более подробно основные этапы процесса поиска оптимальной детальности исходных данных, при которой происходит минимизация ошибки модели или, если можно так выразиться, достигается «информационный резонанс» (см. рис. 6). Если детальность исходных данных находится за пределами разрешающей способности геофизического метода или способа интерпретации (см. правую часть схемы на рис. 6), мы попадаем в область заведомо неоднозначных решений, т.е. корректная интерпретация в данном случае невозможна. Для каждого геофизического метода или способа интерпретации существуют своя граница области заведомо неоднозначных решений и своя область информационного резонанса, что в ряде случаев дает интерпретатору дополнительные возможности для решения поставленных задач.

В случае невысокого уровня помех и высокой плотности исходных данных, снижая детализацию исходных данных, мы достаточно быстро попадаем в область информационного

резонанса (см. резонанс № 1 на рис. 6), наиболее благоприятную для проведения интерпретации. Дальнейшее понижение детализации исходного поля данных или пластовой модели приводит к росту ошибки аппроксимации свойств геологической среды, и эффективность интерпретации падает. Наконец достигается такой уровень искажений реального геологического разреза, когда интерпретация становится абсолютно некорректной. Заметим еще раз, что способ аппроксимации свойств реальной среды и опыт интерпретатора также влияют на положение границ области заведомо грубой аппроксимации и области информационного резонанса.

В случае высокого уровня помех или низкой плотности исходных данных нам придется уже более существенно снижать детализацию исходных данных, чтобы попасть в область информационного резонанса (см. резонанс № 2 на рис. 6), при этом достоверность интерпретации неизбежно падает.

Поскольку корреляция так называемых «случайных» помех с сигнальной (полезной) частью данных не может быть охарактеризована отношением S/N , условно принимается, что она бесконечно близка к нулю. Тому есть достаточные веские основания. Тем не менее корреляция помехи с сигнальной частью в процессе оптимизации детальности исходных данных может меняться, пусть в незначительных пределах, однако в достаточных, чтобы оказывать влияние на степень искажения сигнальных значений. По этой причине нельзя ожидать равномерного и гладкого характера изменения кривой ошибки прогнозируемого параметра в зависимости от степени аппроксимации исходных данных. «На пути» к информационному резонансу, представляющему собой глобальный минимум функции, могут возникать локальные экстремумы. Этот момент следует учитывать при выборе окончательного варианта детализации данных и делать тестовый перебор аппроксимаций в достаточно широком диапазоне реализаций.

В качестве примера приведем интерпретацию сейсмических атрибутов с целью построения карты эффективных мощностей песчаного газонасыщенного пласта юрского возраста на одном из месторождений в Таджикистане [5]. При последовательном уменьшении детальности данных коэффициенты корреляции сейсмических амплитуд

со значениями эффективной мощности, установленными в скважинах, составили 0,43; 0,60; 0,57; 0,70 и 0,94. Очевидно, что коэффициент 0,57 (локальный экстремум) выбивается из общего тренда. Увеличение коэффициента корреляции с 0,43 до 0,94 вследствие оптимизации детальности данных позволило успешно решить поставленную задачу.

На практике также возможны случаи, когда приходится сознательно выходить из области информационного резонанса. Чаще всего это происходит, если поставленная интерпретационная задача требует получения детальных результатов. В такой ситуации

интерпретатору приходится жертвовать достоверностью результата в целях сохранения высокой детальности.

На многих месторождениях Западной Сибири мощность целевых пластов-коллекторов составляет всего несколько метров. Это приходится учитывать при формировании исходных уточняемых пластовых моделей. Таким образом, специфика геологического моделирования в этом регионе заключается в том, что оно зачастую проводится за пределами разрешающей способности сейсмического метода. В этих условиях методика оптимизации детальности имеет решающее значение.

Список литературы

1. Авербух А.Г. Математическое моделирование волновых полей как основа комплексной интерпретации сейсмической, промыслово-геофизической и геологической информации / А.Г. Авербух и др. – М.: ВНИИОЭНГ, 1985. – 79 с.
2. Ампилов Ю.П. От сейсмической интерпретации к моделированию и оценке месторождений нефти и газа / Ю.П. Ампилов. – М.: Спектр, 2008. – 383 с.
3. Гогоненков Г.Н. Изучение детального строения осадочных толщ сейсморазведкой / Г.Н. Гогоненков. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
4. Крылов Д.Н. Детальный прогноз геологического разреза в сейсморазведке / Д.Н. Крылов. – М.: Недра, 2007. – 195 с.
5. Крылов Д.Н. К вопросу о достижении наиболее достоверного результата инверсии в условиях присутствия помех и ограниченной разрешенности геофизических данных / Д.Н. Крылов, М.С. Кучеря, Л.А. Наумова // Геология нефти и газа. – 2012. – № 2. – С. 69–78.
6. Krilov D. Subtle lithoacoustic inversion of seismic data / D. Krilov // First break. – EAGE, 1998. – Т. 16. – № 8. – С. 277–286.
7. Крылов Д.Н. Использование технологии оптимизационного осреднения при решении задач интерпретации числовых характеристик геологической среды / Д.Н. Крылов // Технологии сейсморазведки. – 2016. – № 4. – С. 13–20.
8. Крылов Д.Н. Технология выбора детальности параметрической модели в зависимости от поставленной интерпретационной задачи / Д.Н. Крылов, Л.А. Наумова // Геофизика. – 2014. – № 2. – С. 15–19.
9. Krilov D. Magic of smart averaging / D. Krilov // First break. – EAGE, 2009. – Т. 27. – № 9. – С. 55–64.
10. Kondratiev I. Dependence between resolving power and accuracy of seismic waveform inversion / I. Kondratiev, Yu. Kiselev, D. Krilov // 55th annual EAEG meeting: expanded abstracts. – Stavanger, 1993.
11. Krilov D. Smart averaging interpolation algorithm comparative test / D. Krilov, Ya. Vaniarho, D. Basaev // Geophysical Prospecting. – 2016. – Т. 64. – № 3. – С. 642–656.
12. Копилевич Е.А. Комплексное спектрально-скоростное прогнозирование типов геологического разреза и фильтрационно-емкостных свойств коллекторов / Е.А. Копилевич, И.А. Мушин, Е.А. Давыдова и др. – Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2010. – 248 с. – (Библиотека нефтяного инжиниринга).

Designing a valid geological model of a medium by tailoring its detail degree

D.N. Krylov

Gazprom VNIIGAZ LLC, Bld. 1, Estate 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation
E-mail: D_Krylov@vniigaz.gazprom.ru

Abstract. Degree of detail and validity are the closely related characteristics of geological models. Either accuracy, or an error of parameters included into a geological model can be used as criteria of validity for a geological model in case they were measured at fixed detail degree of this model (distribution of layer thicknesses in respect to models of layers, and distribution of sizes of the identified areal anomalies in respect to maps).

To fulfil particular interpretation tasks successfully (namely: determination of leads for geological prospecting and identification of promising objects, calculation of hydrocarbon reserves, reservoir engineering, etc.) one should find optimal ratio between detail degree and validity of a model. First of all, detail particularity of a model is determined by specific structural features of a studied geological section, density of logging per unit area, design of survey (e.g., size of a bin during 3D seismic measurements), spectrum and resolution of survey data (e.g., high-frequency geophysical well logging, mid-frequency seismic and low-frequency gravity and magnetic surveys), and level of interference violating geological-geophysical data.

Using test materials author substantiates necessity to regulate/optimize detail degree of models in order to get valid characteristics of media. He concludes that there is a universal dependency between validity of predicted parameters and a level of approximation of a real medium, i.e. between the detail degree of a model, a level of noises and the density of observations.

Keywords: geological model, optimization, degree of detail, level of interference, validity of parameters.

References

1. AVERBUKH, A.G., et al. *Mathematical modelling of wave fields as a foundation of complex interpretation of seismic, field geophysical and geological information* [Matematicheskoye modelirovaniye volnovykh poley kak osnova kompleksnoy interpretatsii seymicheskoy, promyslovo-geofizicheskoy i geologicheskoy informatsii]. Moscow: VNIOENG, 1985. (Russ.).
2. AMPILOV, Yu.P. *From seismic interpretation to simulation and assessment of oil and gas fields* [Ot seymicheskoy interpretatsii k modelirovaniyu i otsenke mestorozhdeniy nefi i gaza]. Moscow: Spektr, 2008. (Russ.).
3. GOGONENKOV, G.N. *Studying detailed structure of sedimentary stratum using seismic measurements* [Izucheniye detalnogo stroeniya osadochnykh tolshch seysmorazvedkoy]. Moscow: Nedra, 1987. (Russ.).
4. Krylov, D.N. *Detailed forecast of a geological section in seismic explorations* [Detalnyy prognoz geologicheskogo razreza v seysmorazvedke]. Moscow: Nedra, 2007. (Russ.).
5. KRYLOV, D.N., M.S. KUCHERYA, L.A. NAUMOVA. On achievement of the most valid result of inversion in presence of noises and in conditions of limited resolution of geophysical data [K voprosu o dostizhenii naiboleye dostovernogo rezultata inversii v usloviyakh prisutsviya pomekh i ogranichennoy razreshennosti geofizicheskikh dannykh]. *Geologiya Nefi i Gaza*. 2012, no. 2, pp. 69–78. ISSN 0016-7894. (Russ.).
6. KRILOV, D. Subtle lithoacoustic inversion of seismic data. *First Break*. EAGE, 1998, vol. 16, no. 8, pp. 277–286. ISSN 0263-5046.
7. KRYLOV, D.N. Application of smart averaging to solve problems of interpreting numerical characteristics of geological medium [Ispolzovaniye tekhnologii optimizatsionnogo osredneniya pri reshenii zadach interpretatsii chislovykh kharakteristik geologicheskoy sredy]. *Tekhnologii Seysmorazvedki*. 2016, no. 4, pp. 13–20. ISSN 1813-4254. (Russ.).
8. KRYLOV, D.N., L.A. NAUMOVA. Technique for selecting degree of detail for a parametric model depending on a set interpretation task [Tekhnologiya vybora detalnosti parametricheskoy modeli v zavisimosti ot postavlennoy interpretatsionnoy zadachi]. *Geofizika*. 2014, no. 2, pp. 15–19. ISSN 1681-4568. (Russ.).
9. KRILOV, D. Magic of smart averaging. *First Break*. EAGE, 2009, vol. 27, no. 9, pp. 55–64. ISSN 0263-5046.
10. KONDRATIEV, I., Yu. KISELEV, D. KRILOV. Dependence between resolving power and accuracy of seismic waveform inversion. In: *55th annual EAGE meeting: expanded abstracts*. Stavanger, 1993.
11. KRILOV, D., Ya. VANJARHO, D. BASAEV. Smart averaging interpolation algorithm comparative test. *Geophysical Prospecting*. 2016, vol. 64, no. 3, pp. 642–656. ISSN 0016-8025.
12. KOPILEVICH, Ye.A., I.A. MUSHIN, Ye.A. DAVYDOVA, et al. *Complex express spectrographic prediction of geological section types and permeability-porosity properties of reservoirs* [Kompleksnoye spektralno-skorostnoye prognozirovaniye tipov geologicheskogo razreza i filtratsionno-yemkostnykh svoystv kollektorov]. Izhevsk: Izhevsk institute of computer researches, 2010. Series: Library of petroleum engineering. (Russ.).