

Секция №4, устный

УДК 550.832

ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА В НАКЛОННЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

Горбатенко А.А., Сухорукова К.В.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск

На результатах математического моделирования данных электромагнитного каротажа в наклонных и горизонтальных скважинах показаны возможные варианты эквивалентных моделей при решении обратной задачи. Проведен анализ экспериментальной эквивалентности для пласта с высоким сопротивлением во вмещающих породах. На примерах эквивалентных геоэлектрических моделей показаны возможные ошибки качественной и количественной интерпретации.

Ключевые слова: эквивалентность, эквивалентные модели, угол падения, высокочастотное электромагнитное каротажное зондирование, ВЭМКЗ, удельное электрическое сопротивление, наклонные скважины, численная интерпретация, невязка.

Численная интерпретация данных каротажа подразумевает в первую очередь процесс согласования экспериментальных (Е) и модельных (М) сигналов в рамках некоторого решающего правила [1]. Очевидно, что может существовать множество моделей, сигналы от которых соответствовали бы с необходимой точностью экспериментальным данным. Такие решения принято называть эквивалентными, а их множество – областью эквивалентности. Выделяют два типа эквивалентности. Модельно обусловленная эквивалентность (М-эквивалентность) связана с неоднозначностью выбора модели, удовлетворяющей экспериментальным данным. Аппаратурные и геологические помехи создают второй тип – экспериментально обусловленную (Е-) эквивалентность, то есть диапазон значений параметров модели, при которых М данные будут отличаться от Е в пределах погрешности измерений.

Интерпретация данных электромагнитного каротажа наклонных и горизонтальных скважин является более сложной задачей, чем интерпретация данных, записанных в вертикальных интервалах. Для метода высокочастотного электромагнитного каротажного зондирования (ВЭМКЗ; аппаратные модификации ВИКИЗ, ВИК-ПБ, модуль ВЭМКЗ в комплексе СКЛ) в модели необходимо учитывать не только такие параметры как УЭС и положение геологических границ, но и углы между скважиной и границами напластования, а также положение скважины в пространстве. В связи с этим увеличивается число эквивалентных решений обратной задачи.

Как известно, разность фаз тем выше, чем выше проводимость среды [2]. Если принять аппаратную абсолютную погрешность измерения разности фаз за постоянную величину, то диапазон восстанавливаемых значений УЭС высокоомных пород будет шире, чем диапазон значений УЭС более проводящих пород. Е-эквивалентность можно продемонстрировать с помощью примера, показанного на рис. 1. На рисунке изображены сигналы зонда ВЭМКЗ длиной 1,4 м при наклонном пересечении горизонтально расположенного высокоомного пласта мощностью 0,5 м, который находится во вмещающих породах с УЭС 4 Ом·м; зенитный угол скважины равен 85°. Сплошная кривая синего цвета соответствует УЭС среднего пласта 50 Ом·м, пунктирная – 48 Ом·м. Погрешность измерения, равная 0,3 градуса, показана вертикальными отрезками. Пунктирная кривая попадает в ворота погрешности на всем представленном интервале. Другими словами, пунктирная и сплошная кривые соответствуют друг другу в пределах погрешности измерения. Следовательно, модель с УЭС пласта 48 Ом·м эквивалентна модели с УЭС 50 Ом·м. Таким образом, в пласте мощностью 0,5 м ошибка определения значения УЭС, равного 50 Ом·м, по показаниям зонда длиной 1,4 м может составить 2 Ом·м. Заметим, что при интерпретации кривой зондирования на базе одномерной модели (вертикальное пересечение мощного однородного пласта без проникновения) в полосе погрешности измерения разности фаз, равной $\pm 0.3^\circ$, УЭС среды 50 Ом·м будет определяться с большей погрешностью – в диапазоне 45–56 Ом·м. Уменьшение погрешности определения УЭС высокоомного пропластка небольшой мощности при наклонном пересечении достигается за счет того, что подбирается изменение сигнала на профиле с большим количеством точек, с учетом интервалов подхода зонда к границам и удаления от них.

При интерпретации данных ВЭМКЗ в наклонных и горизонтальных скважинах применяются алгоритмы минимизации невязки между модельными и экспериментальными данными. В качестве функции невязки целесообразно использовать среднеквадратическое отклонение нормированного на погрешность измерения сигнала:

$$F^{nz} = \sqrt{\frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \left[\frac{\Delta\phi_i^{nz} - \overline{\Delta\phi_i^{nz}}}{\delta\Delta\phi_i^{nz}} \right]^2}$$

Здесь N_p – число отсчетов по глубине, $\Delta\phi_i^{nz}$ – измеренный сигнал, $\delta\Delta\phi_i^{nz}$ – погрешность его измерения, $\overline{\Delta\phi_i^{nz}}$ – сигнал, рассчитанный в слоистой однородной среде, nz – индекс зонда.

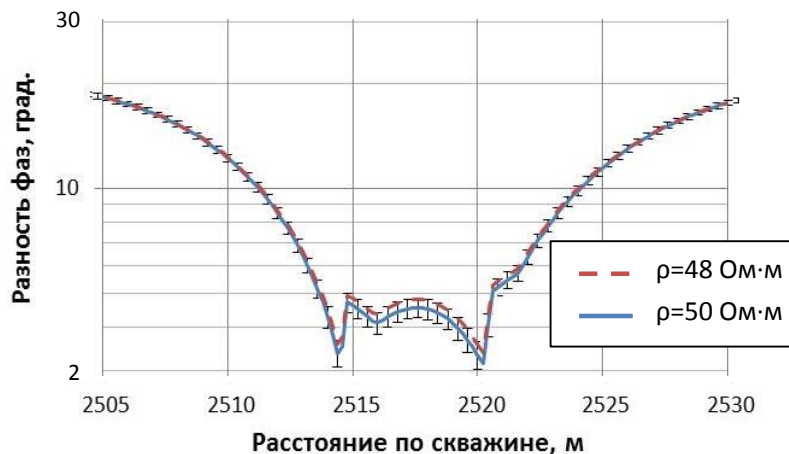


Рис. 1. Пример E-эквивалентности.

По поведению этой функции можно судить о качестве численной интерпретации. Проиллюстрируем это на примере, где в качестве экспериментальных данных взят расчет сигнала в трехслойной модели. УЭС верхнего полупространства составляет 15 Ом·м, нижнего – 4 Ом·м. Между ними находится пропласток мощностью 0,2 м с УЭС равным 50 Ом·м. Зенитный угол скважины 85°. На рис. 2 показаны диаграммы сигналов основной группы зондов ВЭМКЗ, рассчитанных в этой модели. При визуальном анализе диаграмм можно предложить два варианта модели: в первом случае выбрано верное число границ, во втором – двухслойная среда. При этом для трехслойной модели задача состоит в определении УЭС нижнего полупространства и положения высокоомного пропластка при известных значениях мощности и УЭС этого пропластка, а также при известном УЭС верхнего полупространства. Для двухслойной модели – в определении положения границы и УЭС нижнего полупространства при известном УЭС верхнего.

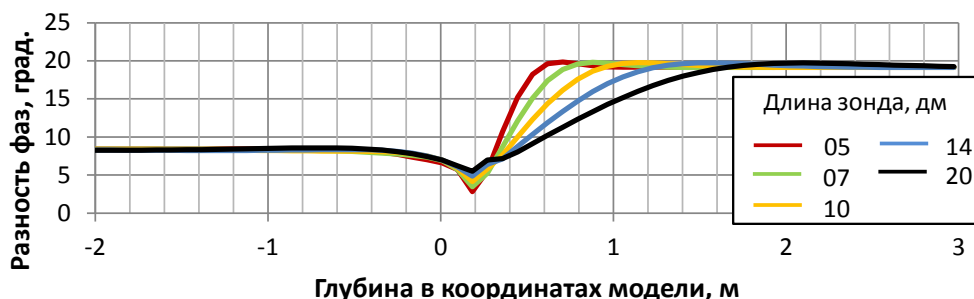


Рис. 2. Сигнал основной группы зондов ВЭМКЗ в трехслойной среде.

Невязки для первого случая изображены на рис. 3 сверху слева, а для второго – справа. В обоих случаях у функции невязки существует четкий минимум в пространстве параметров модели, но в трехслойной модели положение пропластка устанавливается с высокой точностью, а в двухслойной положение границы определяется на 0,3 м ниже, чем подошва верхнего полупространства в исходной модели. Параметры трехслойной модели удается определить точно, и минимальное значение невязки

в этом случае значительно меньше, чем для двухслойной (0,6 против 4,2), но эти модели можно считать эквивалентными, принимая во внимание, что в реальной ситуации сигналы будут осложнены помехами различной природы. Сравнение сигналов зонда длиной 1,4 м в этих моделях (в точках минимума невязки) приведено на рис. 3 снизу. На участке от -0.6 до 0.6 м наблюдается значительное расхождение сигналов (до 3°), многократно превышающее погрешность измерения. Здесь максимально влияние на сигнал пересекаемых границ, и по большому расхождению сигналов можно предположить наличие дополнительного пласта. Таким образом, при уточнении строения геоэлектрической модели необходимо анализировать данные ВЭМКЗ в наиболее информативных интервалах – в области границ пластов.

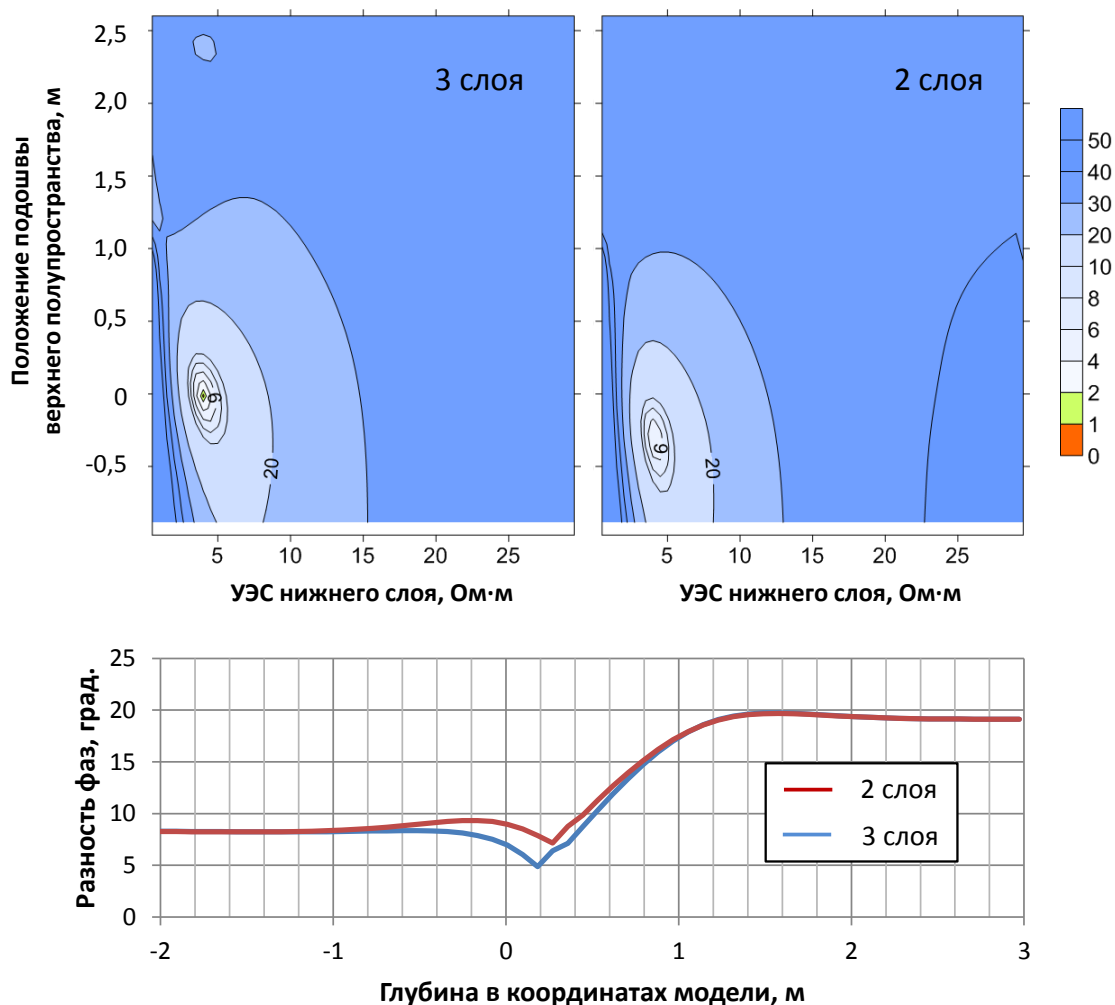


Рис. 3. Невязки зонда длиной 1,4 м для трехслойной среды при подборе двух- и трехслойной модели.

Одним из факторов, влияющих на форму диаграмм ВЭМКЗ в наклонной скважине, является угол между скважиной и границами пластов [3]. По изменению сигналов в области пересечения границы можно оценить значение угла между зондом и её плоскостью, однако это не дает возможности определить направление падения границы.

Покажем это на примере трехслойной модели, в которой скважина с зенитным углом 85° находится сначала в полупространстве с сопротивлением $\rho_1=6,5$ Ом·м, затем пересекает пласт мощностью 0,2 м с $\rho_2=300$ Ом·м, а затем попадает в полупространство с $\rho_3=7,5$ Ом·м. Угол между пластом и скважиной составляет 10° . По данным ВЭМКЗ в такой ситуации может быть предложено, по меньшей мере, две модели: в первой полупространство с УЭС 6,5 Ом·м находится сверху, а во второй – снизу (рис. 4). Сигналы от этих эквивалентных моделей представлены в нижней части рисунка, как видно, их различия намного меньше погрешности измерений.

В этих примерах плоскости пересекаемых границ перпендикулярны вертикальной плоскости, в которой расположена скважина. Однако сигнал будет одинаково изменяться во всех моделях с одинаковым минимальным углом между зондом и плоскостью границ, например, плоскость границы

может быть субвертикальной. Моменты генераторной и измерительных катушек направлены по оси зонда ВЭМКЗ, поэтому этот метод не обладает азимутальным разрешением – по сигналу невозможно определить, с какой стороны скважина приближается к наклонному объекту. Поэтому при интерпретации сигналов для построения моделей, которые бы реалистично описывали пространственное распределение электрофизических параметров, необходимо привлекать дополнительную геологическую и геофизическую информацию.

По результатам анализа практических диаграмм, терригенные коллекторы Западной Сибири чаще всего бывают осложнены глинистыми и карбонатными прослоями или линзами, а также залеченными карбонатным цементом трещинами или разломами. Границы прослоев обычно являются согласованными с основными границами коллектора, поэтому проводится уточнение значения одного угла между скважиной и всеми границами модели. В случае линз или локальных зон карбонатизации необходимо уточнять угол встречи с каждой границей. Залеченные разломы часто являются субвертикальными образованиями, и угол встречи с ними может на десятки градусов отличаться от угла встречи с основными границами, но при этом влияние такого объекта является локальным по сравнению с длинным интервалом сильнонаклонного или горизонтального ствола и этот объект может быть исключен из модели коллектора.

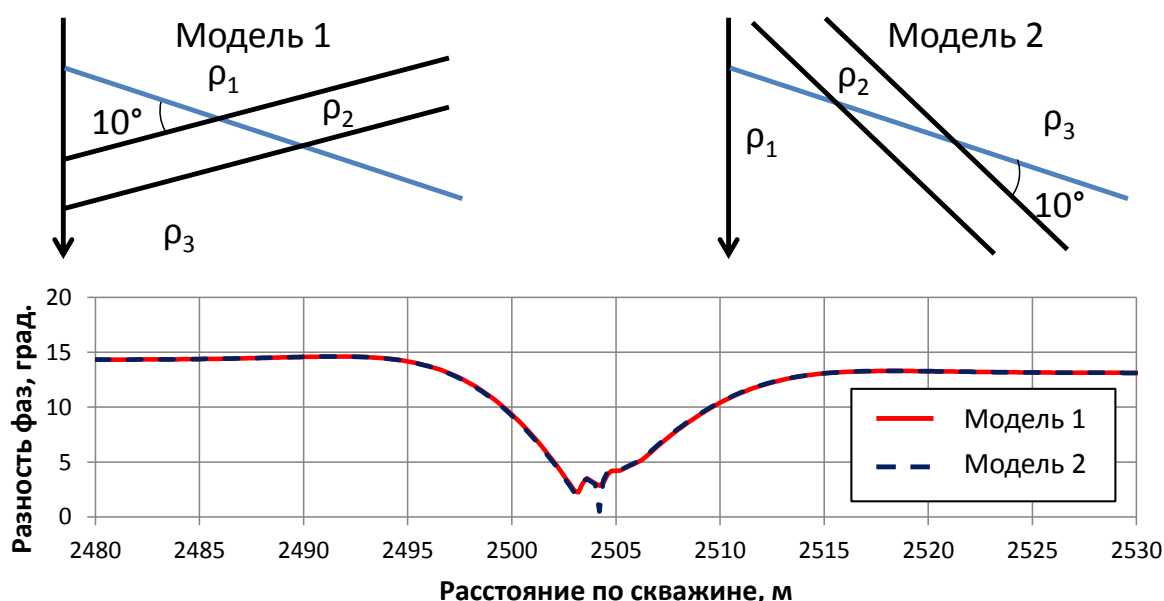


Рис. 4. Эквивалентные модели и их сигналы.

На основе численной интерпретации данных ВЭМКЗ в наклонных скважинах можно определить УЭС пластов и положение их границ, а также оценить угол между скважиной и границами. В отличие от вертикальных скважин, для наклонных характерна М-эквивалентность, обусловленная возможностью различной последовательности геологических объектов и их пространственной ориентацией. При выборе модели для интерпретации необходим детальный анализ сигналов ВЭМКЗ и данных инклинометрии, а также геологической информации. При уточнении строения геоэлектрической модели необходимо анализировать данные ВЭМКЗ в наиболее информативных интервалах – в области границ пластов.

1. Табаровский Л.А., Эпов М.И. Оценка разрешающей способности электромагнитных методов // Геология и геофизика, 2006, т. 47, № 5, с. 568-578.
2. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВЭМКЗ. Методическое руководство/ Ред. Эпов М.И., Антонов Ю.Н. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, Изд-во СО РАН, 2000, 121 с.
3. Горбатенко А.А., Сухорукова К.В. Данные ВЭМКЗ в наклонных и горизонтальных скважинах: особенности инверсии и интерпретации// Tyumen 2013 - New Geotechnology for the Old Oil Provinces, Секция "Геологические и геофизические технологии для сопровождения бурения и мониторинга разработки месторождений", Extended abstract, 4 с. <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=67199>