

## **ВОЗМОЖНОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АНИЗОТРОПНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ СРЕДЫ ПУТЕМ ИНВЕРСИИ ДАННЫХ БКЗ**

*Алексей Михайлович Петров*

Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, магистрант геолого-геофизического факультета, e-mail: alex\_1993\_08@mail.ru

*Карина Владимировна Сухорукова*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (383) 330-49-52, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

*Олег Валентинович Нечаев*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: oleg.v.nechaev@gmail.com

На синтетических и реальных данных рассмотрена эквивалентность сигналов БКЗ в изотропных и анизотропных осесимметричных моделях. Выделены модели, в рамках которых корректно восстанавливаются электрофизические параметры. Показаны возможные последствия ошибочного определения типа модели интерпретатором.

**Ключевые слова:** боковое каротажное зондирование, анизотропия удельного электрического сопротивления, численная инверсия, баженовская свита.

## **POSSIBILITIES AND LIMITATIONS OF THE BKZ AT DETERMINING THE PARAMETERS OF ANISOTROPIC AXISYMMETRIC MODELS OF MEDIUM**

*Aleksey M. Petrov*

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Master's Student at the Geology and Geophysics Department, e-mail: alex\_1993\_08@mail.ru

*Carina V. Sukhorukova*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Staff Scientist, e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru

*Oleg V. Nechaev*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Senior Staff Scientist, e-mail: oleg.v.nechaev@gmail.com

We have considered the equivalence of BKZ signals in different axisymmetric 2D models on synthetic and real data and determined several models which can be used to correctly recover the parameters of a medium. Also we have considered the effects of incorrect definition of a model type.

**Key words:** lateral logging sounding, electrical anisotropy, numerical inversion, Bazhenov formation.

Еще в середине прошлого века в работе [1] была аналитически показана эквивалентность сигналов бокового каротажного зондирования (БКЗ) в однородной трансверсально-изотропной среде и в среде с осесимметричным распределением удельного электрического сопротивления (УЭС) при расположении точки измерения на оси симметрии. Появление инструментов инверсии с подбором вертикальной компоненты УЭС обуславливает необходимость анализа эквивалентности сигналов БКЗ в разных 2D-моделях для того, чтобы выделить те типы моделей, в которых параметры среды восстанавливаются корректно, и показать возможные последствия ошибочного выбора модели интерпретатором. Здесь подразумевается, что тип модели определяется, например, наличием или отсутствием проницаемости (разное количество радиальных границ) или анизотропии в каждом отдельно взятом слое.

### **Моделирование и решение обратной задачи**

При численном моделировании сигналов зондов БКЗ используется программный пакет AlondraWL [2]. Распределение электрического потенциала  $\varphi$  в области моделирования описывается краевой задачей, для дискретизации которой используется метод конечных элементов. Решение результирующей системы линейных алгебраических уравнений осуществляется при помощи разложения Холецкого.

Обратная задача идентификации параметров модели околоскважинного пространства, по данным БКЗ, формулируется как задача минимизации функционала невязки, для решения которой используется модифицированный метод покоординатного спуска.

### **Модели песчаных коллекторов**

На рис. 1, а представлена простейшая модель 1 изотропного песчаного коллектора, перекрытого мощными толщами анизотропных глин.

При подборе по сигналам градиент-зондов БКЗ, рассчитанных в модели 1, трансверсально-изотропной модели 2 с пластом без зоны проникновения (ЗП) бурового раствора получают значения параметров, приведенные на рис. 1, б. Помимо того что пересекаемый пласт подбирается практически изотропным (причем  $\rho_v < \rho_h$ , что не характерно для низкоомных отложений), из результатов моделирования следует два основных вывода.

1. Сигналы градиент-зондов при пересечении границ анизотропного пласта и изотропного пласта с ЗП ведут себя принципиально различным образом, что приводит к невозможности подобрать их при неверном определении типа модели.

2. Подбор параметров проницаемого пласта как непроницаемого анизотропного ведет к большим ошибкам определения параметров вмещающих пластов. Так, в приведенном примере на интервалы вмещающих пластов приходилось 10 м, в то время как на интервал коллектора всего 2 м, при этом погрешность определения  $\rho_v$  вмещающих глин достигает 40 %.

Таким образом, ошибочное определение типа модели одного небольшого пласта в разрезе может привести к большим ошибкам определения параметров других пластов.

Полученные выводы справедливы и для модели 3 с макроанизотропным песчано-глинистым коллектором (рис. 1, в). Причем при подборе рассчитанных в ней сигналов на интервале анизотропного коллектора в рамках изотропной модели расхождение сигналов БКЗ в пределах пласта минимально, что может неверно трактоваться интерпретатором как ошибка определения типа модели для вмещающих пород.

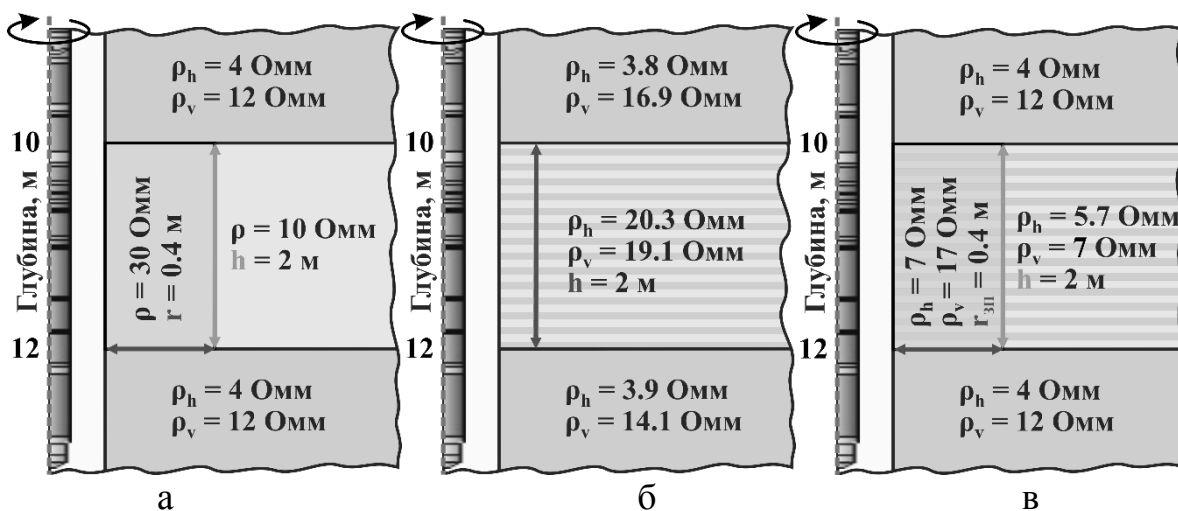


Рис. 1. Модель 1 изотропного песчаного коллектора (а); результат инверсии сигналов БКЗ, рассчитанных в модели 1, в параметры модели 2 с непроницаемым анизотропным пластом (б); модель 3 с проницаемым анизотропным пластом (в)

Большое количество определяемых параметров анизотропного коллектора может приводить к большим погрешностям их определения даже при правильном выборе типа модели. В первую очередь это касается параметров ЗП. Поскольку БКЗ является единственным методом стандартного каротажа, который в вертикальных скважинах чувствителен к вертикальной компоненте УЭС, необходимо привлекать априорную информацию о глубине зоны проникновения, определяя ее другими методами, например, по ВИКИЗ и БК.

В реальной среде радиальное распределение УЭС носит непрерывный характер. Из-за того, что разные методы имеют разные области чувствительности, аппроксимации профиля УЭС даже в рамках кусочно-постоянных моделей с одной границей по разным методам будут отличаться. Для того чтобы проанализировать, как зависят восстанавливаемые параметры от ошибочного определения глубины ЗП, рассмотрим результаты инверсии сигналов БКЗ, рассчитанных по модели 1, в с зафиксированными в стартовых моделях различными глубинами зон проникновения (таблица).

Восстановление параметров модели  
при неверной оценке глубины ЗП

Глубина ЗП, м	$\delta_{\max}, \%$	УЭС, Ом·м				Погрешность определения, %			
		ЗП		Пласт		ЗП		Пласт	
		$\rho_h$	$\rho_v$	$\rho_h$	$\rho_v$	$\rho_h$	$\rho_v$	$\rho_h$	$\rho_v$
0.1*	4.7	9.2	$2.2 \cdot 10^4$	5.5	7.7	32	$1.29 \cdot 10^5$	3.5	10.6
0.15*	3.8	8.2	34.5	5.5	7.7	17.7	103	3	9.4
0.2	2.9	7.7	24.7	5.6	7.5	10	45.3	2.5	7.7
0.25	2.2	7.5	20.4	5.6	7.5	7.1	20	2.1	6.6
0.4 (реальная)	-	7	17	5.7	7	-	-	-	-
0.6	2.9	6.8	15.2	5.8	6.5	3.4	10.6	1.8	6.6
0.7	3.8	6.7	14.8	5.9	6.5	4.3	12.9	3.5	7.1
0.8*	4.6	6.6	14.3	5.9	6.3	5.4	15.9	3.5	10

*Примечание:* звездочками выделены модели, для которых отклонение рассчитанных по ним сигналов от подбираемых выходит за погрешность измерения комплекса СКЛ-76 в пяти и более точках по глубине подряд хотя бы для одного зонда.  $\delta_{\max}$  – максимальное отклонение рассчитанных сигналов от подбираемых на всем интервале по глубине.

Из данных, представленных в таблице, видно, что при неправильном определении глубины ЗП компенсация расхождения сигналов происходит преимущественно за счет вертикальной компоненты ее УЭС.

С уменьшением глубины ЗП более чем в два раза от истинного значения чувствительность к ее УЭС быстро падает, что приводит к резкому увеличению погрешности определения не только  $\rho_v$ , но и  $\rho_h$  этой зоны. При дальнейшем уменьшении глубины ЗП получается нереалистичная модель с очень высокими значениями  $\rho_v$ . Исходные параметры неизменной части пласта определяются с погрешностью до 11 % для всех рассмотренных значений глубины ЗП. На точность определения параметров вмещающих пластов изменение глубины ЗП практически не влияет, так как отсутствуют качественные различия между моделями.

Описанные эффекты рассмотрены также и на реальных данных, измеренных в четырех скважинах на интервалах непродуктивной баженовской свиты. Неверное, определение типа модели подстилающих свиту коллекторов оказывает существенное влияние на определяемое вертикальное сопротивление не только низкоомных вмещающих пород, но и высокоомных отложений на расстоянии до 9 м вверх по разрезу. В совокупности с не очень высокой чувствительностью сигналов БКЗ к  $\rho_v$  это приводит к увеличению до трех раз коэффициента анизотропии  $\lambda$ , определяемого в отдельных пластах вблизи проницаемого интервала (рис. 2).

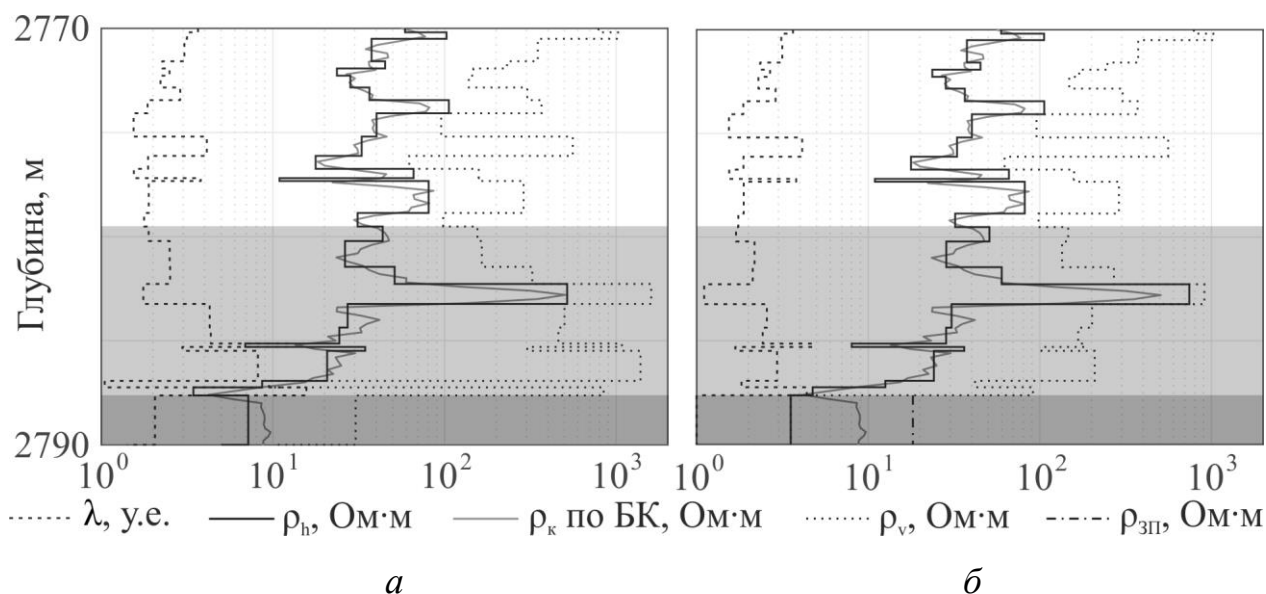


Рис. 2. Геоэлектрические модели нижней части баженовской свиты, полученные в предположении, что слой, выделенный темно-серым цветом: *а* – непроницаемый анизотропный; *б* – проницаемый изотропный (с ЗП). Светло-серым цветом выделен интервал пластов, для которых значения определяемых параметров зависят от выбора параметров нижнего пласта

Таким образом, для определения вертикального сопротивления необходим точный учет всех проницаемых слоев и корректное определение типа модели для каждого слоя.

### Заключение

Из полученных результатов следует, что, несмотря на эквивалентность сигналов БКЗ в однородной трансверсально-изотропной среде и среде с радиальным изменением УЭС, их поведение при пересечении границ пластов в изотропных и анизотропных моделях существенно разное. Благодаря этому восстановление параметров двумерной трансверсально-изотропной среды инверсией сигналов БКЗ возможно не только для непроницаемых пластов, но и в некоторых моделях с зонами проникновения. Для этого требуется использование высокоточной аппаратуры БКЗ и привлечение информации о глубине зоны проникновения по данным других методов.

Ошибочный выбор модели пластов может приводить к резкому увеличению погрешности определения параметров не только пласта, модель которого была определена неверно, но и других пластов на большом интервале по глубине. Определить модель пластов небольшой мощности только по данным БКЗ достаточно сложно, поэтому необходимо учитывать данные других геофизических методов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kunz K. S., Moran J. H. Some effects of formation anisotropy on resistivity measurements in boreholes // *Geophysics*. – 1958. – Vol. 23, N 4. – P. 770–794.
2. Сухорукова К. В., Нечаев О. В., Петров А. М. Численная инверсия сигналов бокового каротажного зондирования на основе двухмерной анизотропной модели // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.)*. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 259–263.

© А. М. Петров, К. В. Сухорукова, О. В. Нечаев, 2017