

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЫСОКООМНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ВЕРТИКАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

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

Получены геоэлектрические модели баженовской свиты численной инверсией сигналов бокового каротажного зондирования, измеренных в вертикальных скважинах. Расчет сигналов проводится методом конечных элементов, для инверсии используется метод покоординатного спуска.

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

DETERMINING THE RESISTIVITY ANISOTROPY OF HIGH-RESISTIVITY SEDIMENTS, BASED ON LATERAL LOG SOUNDING DATA FROM VERTICAL WELLS

Aleksey M. Petrov

Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova Str. 2, master's student at the Geology and Geophysics Department, e-mail: alex_1993_08@mail.ru

Karina V. Sukhorukova

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

Oleg V. Nechaev

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

We have acquired geoelectric models of the Bazhenov formation via numerical inversion of lateral log sounding data from vertical boreholes. Calculation of the signals is conducted through the Finite Element Method. For the inversion we employ the modified coordinate descent method.

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

Терригенные отложения Западной Сибири часто характеризуются выраженной макроанизотропией удельного электрического сопротивления (УЭС).

Данная работа развивает интерпретационную базу методов скважинной электротометрии, в частности, при исследовании отложений баженовской свиты градиент-зондами БКЗ, которые обладают чувствительностью к вертикальной компоненте УЭС.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

При численном моделировании сигналов зондов БКЗ для определения кажущегося сопротивления необходимо рассчитать разность потенциалов на двух измерительных электродах. Распределение электрического потенциала φ 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 метод покоординатного спуска, дополненного следующим шагом – минимизацией функции вдоль направления, соединяющего начальную и конечную точки одного цикла координатного спуска с целью избежать зигзагообразной траектории, присущей методу покоординатного спуска, и, следовательно, повысить скорость сходимости всего алгоритма.

Алгоритм минимизации позволяет фиксировать любые подбираемые параметры модели, задавать большое количество горизонтальных и цилиндрических границ между областями, которые могут быть как анизотропными, так и изотропными, что позволяет максимально быстро и эффективно решать задачу инверсии данных, измеренных в сложных геоэлектрических разрезах.

МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Успешное применение программной реализации алгоритма инверсии (программный пакет AlondraWL) к практическим данным БКЗ осуществляется с помощью методических приемов, развитых в сравнении с предложенными в работе [3].

1. Создание стартовой модели. В автоматизированной системе EMF Pro проводится разбивка целевого интервала на слои по комплексу методов ГИС. Также определяются интервалы с зоной проникновения (ЗП) и проводится одномерная инверсия сигналов БКЗ, измеренных на этих интервалах, на базе цилиндрически-слоистой изотропной модели с учетом данных резистивиметрии. Сопротивления слоев без ЗП, используемые в качестве стартовой геоэлектрической модели для пакета AlondraWL, определяются путем анализа кривой бокового каротажа. Так как кривые бокового каротажа не чувствительны к вертикальной составляющей УЭС, на данном этапе модель изотропна.

2. Инверсия. Инверсия производится последовательным запуском алгоритма AlondraWL с различными стартовыми параметрами. Сначала, чтобы уточнить положения границ, фиксируются все параметры, кроме глубин гра-

ниц. После в слоях с ЗП уточняются ее параметры. Далее параметры ЗП фиксируются и проводится подбор сопротивлений неизменных частей пластов. Пласты, не обладающие ЗП, подбираются в рамках анизотропной модели, песчаные пласты с ЗП – в рамках изотропной, в силу принципа эквивалентности и отсутствия априорных данных. На финальном этапе проводится удаление очень тонких (не влияющих на сигналы) пропластков, отменяется фиксация всех параметров и производится еще один цикл минимизации целевого функционала.

В случае получения хорошего совпадения диаграмм измеренных и рассчитанных сигналов процесс численной инверсии считается завершенным, в противном случае проводится повторная инверсия проблемных интервалов с учетом уже полученной информации о геоэлектрическом разрезе.

Набор и последовательность указанных действий, составляющих численную интерпретацию, являются приблизительными и определяются интерпретатором. В зависимости от сложности исследуемого геологического разреза некоторые пункты могут оказаться не востребуемыми.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СИГНАЛОВ БКЗ К АНИЗОТРОПИИ УЭС

Для контроля достоверности полученных геоэлектрических моделей создано программное обеспечение расчета производных кажущегося сопротивления. Алгоритм рассчитывает производные сигнала градиент-зонда, расположенного в точке расчета, к горизонтальному и вертикальному сопротивлениям всех пластов модели. Для анализа брались стартовые модели, в которых значения горизонтального и вертикального сопротивлений равны (рис. 1). Результаты расчета показывают, что в выбранных точках (подошва, середина и кровля свиты) производные сигналов достаточно большие, что обеспечивает возможность подбора значений УЭС в модели высокоомных отложений баженовской свиты с оценкой его анизотропии.

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БАЖЕНОВСКОЙ СВИТЫ

Отложения баженовской свиты представлены аргиллитами, кремнисто-глинистыми породами, силицитами и карбонатами, которые по своим физическим параметрам существенно отличаются не только от вмещающих пород, но и между собой. Трудности выделения коллекторов "обусловлены сложным сочетанием кварцевых, полевошпатовых, карбонатных и глинистых минералов, тонкой слоистостью и высокой битуминозностью пород, трещинно-поровым строением коллекторов" [1].

Среди наиболее значимых особенностей баженовской свиты стоит отметить аномально высокие величины удельного электрического сопротивления, достигающие 3000 Ом·м и более за счет сильной гидрофобизации пород, а также сложное тонкослоистое строение – толщины пропластков составляют 0.4-0.6 м и редко превышают 0.8-1.0 м [2].

По данным кавернометрии, в силу гидрофобности отложений на всем интервале свиты не меняется диаметр скважины, поэтому проникновение большого объема фильтрата в породу маловероятно. В силу приведенных особенно-

стей для численной интерпретации данных БКЗ, измеренных в вертикальных скважинах Федоровского, Русскинского и Восточно-Сургутского месторождений на интервалах баженовской свиты, была выбрана двумерная осесимметричная трансверсально изотропная модель среды без ЗП. Песчаные коллекторы, залегающие под баженовской свитой, интерпретировались в рамках изотропной модели с зоной проникновения. Все скважины бурились на глинистом растворе с сопротивлением 1-2 Ом·м.

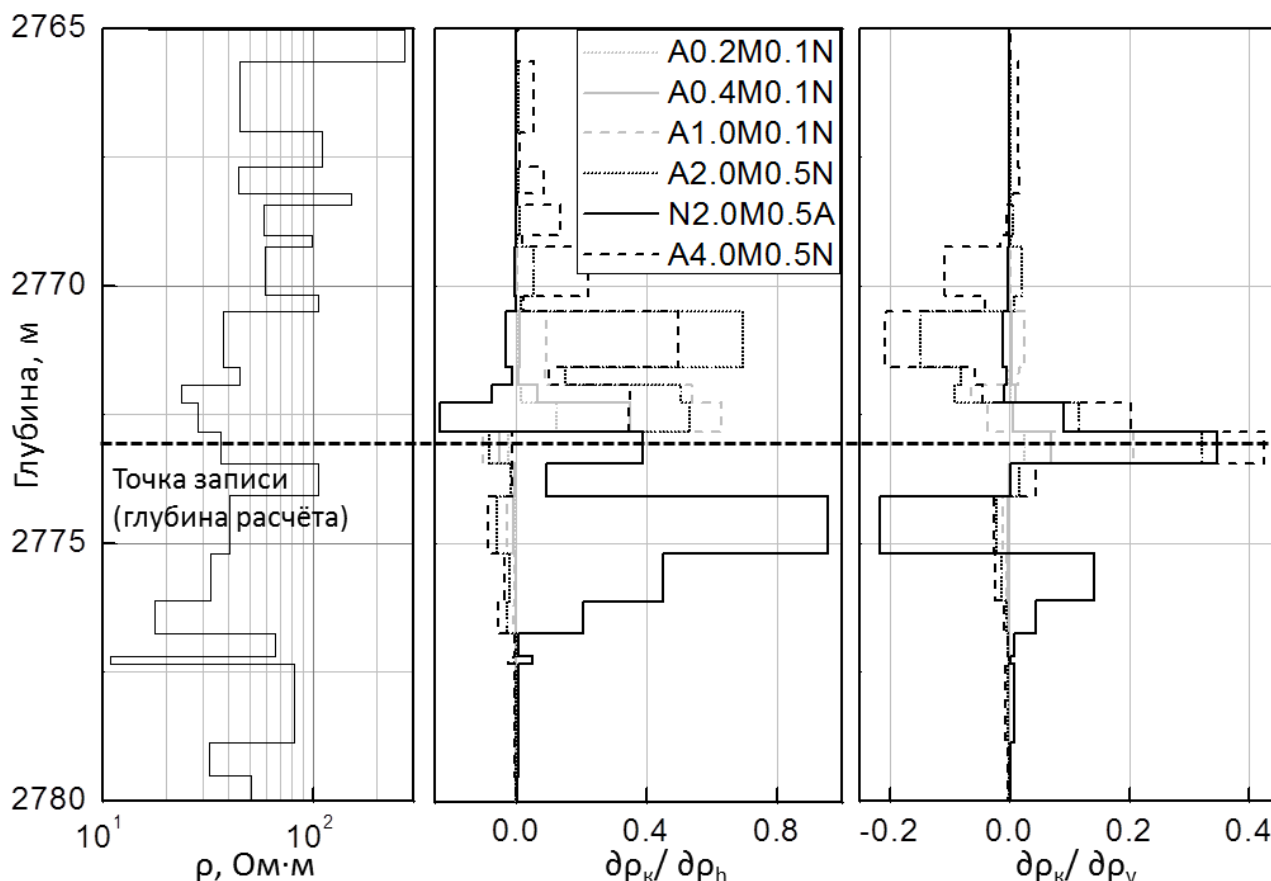


Рис. 1. Стартовая модель УЭС (слева) и чувствительность сигналов БКЗ к горизонтальной и вертикальной составляющим УЭС при расположении точки записи в середине баженовской свиты

В этих условиях в модели пересечения тонкого анизотропного пласта в изотропной среде максимальная чувствительность к вертикальной составляющей сопротивления смещается в сторону длинных зондов, что отражается на результатах инверсии. Полученные при инверсии модели пород свиты состоят из тонких контрастных по УЭС анизотропных пластов (рис. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развита методика численной интерпретации данных БКЗ в двумерных анизотропных геоэлектрических моделях. Модифицирован алгоритм численной инверсии сигналов БКЗ AlondraWL, разработан алгоритм расчета их производных для оценки чувствительности к горизонтальному и вертикальному УЭС.

Проведена инверсия данных, измеренных на интервале высокоомных баженовских отложений в более чем 20 скважинах. Построены 2D геоэлектрические модели баженовской свиты, отличающиеся высоким контрастом УЭС и небольшой толщиной пластов, а также сильной электрической анизотропией.

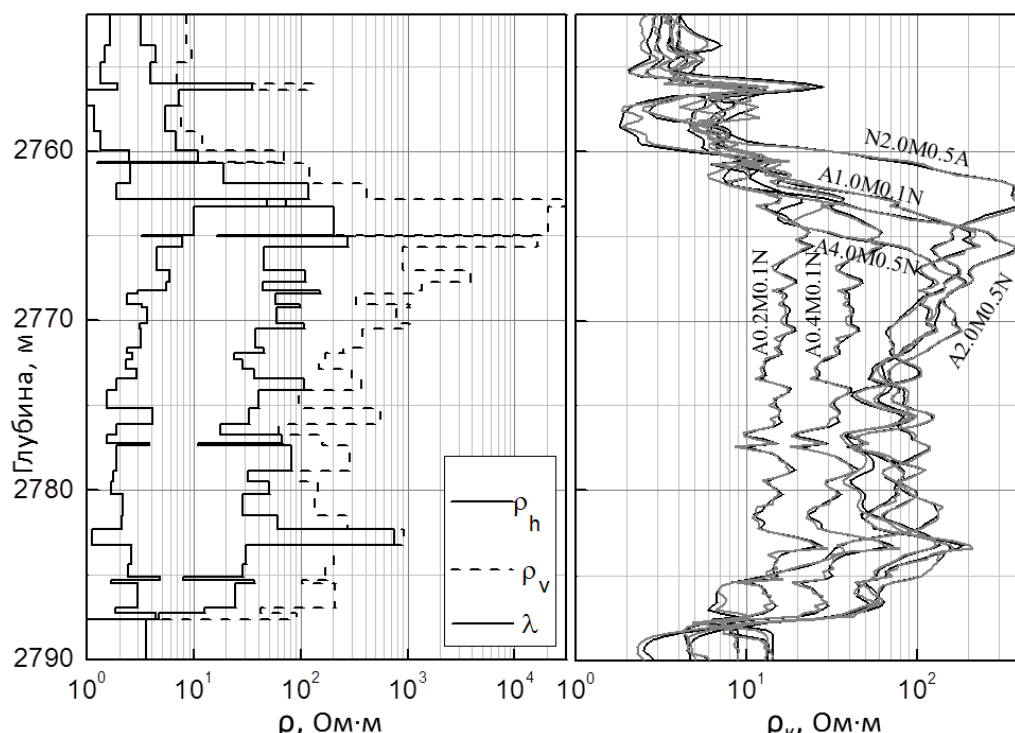


Рис. 2. Результат численной интерпретации. Слева подобранные значения горизонтального и вертикального сопротивлений и коэффициент анизотропии. Справа измеренные (серый цвет) и подобранные (черный цвет) сигналы БКЗ

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козяр В.Ф., Глебочева Н.К., Медведев Н.Я. Выделение проницаемых пород - коллекторов по параметрам волны Стоунли (результаты промышленных испытаний) // НТВ "Каротажник". - Тверь: ГЕРС, 1999. - Вып. 56. - С. 52-59.
2. Куляпин П.С., Соколова Т.Ф. Использование статистического моделирования при интерпретации данных ГИС в нефтематеринских породах баженовской свиты Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Технологии сейсморазведки. - 2013. - № 3. - С. 28-42.
3. Сухорукова К.В., Нечаев О.В., Петров А.М. Численная инверсия сигналов бокового каротажного зондирования на основе двумерной 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, 2016