

UR03

Numerical Interpretation of Borehole Electromagnetic and Galvanic Methods Data in the Bazhenov Formation Deposits

K.V. Sukhorukova* (Institute of Petroleum Geology & Geophysics SB RAS), V.N. Glinskikh (Institute of Petroleum Geology & Geophysics SB RAS), O.V. Nechaev (Institute of Petroleum Geology & Geophysics SB RAS), M.N. Nikitenko (Institute of Petroleum Geology & Geophysics SB RAS), M.A. Pavlova (Institute of Petroleum Geology & Geophysics SB RAS), I.V. Surodina (Institute of Petroleum Geology & Geophysics SB RAS) & M.I. Epov (Institute of Petroleum Geology & Geophysics SB RAS)

SUMMARY

This paper deals with the numerical interpretation of electrical and electromagnetic logging data in the Bazhenov formation. The Bazhenov deposits are characterized by a complex micro- and macrostructure, spatial heterogeneity, and a high contrast of electrophysical parameters. The interpretation is based upon the effective algorithms for numerical simulation of electrical and electromagnetic fields. The complex of electrical and electromagnetic logging sounding methods is used. An extended set of electrophysical parameters of the silicious and clayey bituminous Bazhenov deposits has been determined. Spatial distributions of electrical resistivity and macroanisotropy, as well as of dielectric permittivity and its frequency dispersion, have been evaluated.

Численная интерпретация данных комплекса методов скважинной электротометрии в высокоомных отложениях баженовской свиты

*К.В. Сухорукова**, *В.Н. Глинских*, *О.В. Нечаев*, *М.Н. Никитенко*, *М.А. Павлова*, *И.В. Суродина*,
М.И. Эпов (ИНГТ СО РАН)

Введение

В последние годы актуальной становится задача численной интерпретации данных электротометрии в геологических средах, описывающихся такими электрофизическими характеристиками как макроанизотропия электропроводности, диэлектрическая проницаемость и её частотная дисперсия. В наибольшей степени эти эффекты проявляются при изучении геологических объектов, характеризующихся сложной микро- и макроструктурой, пространственной неоднородностью и большим контрастом электрофизических параметров. Именно к таким объектам относится баженовская свита – основная нефтематеринская толща в Западной Сибири.

В условиях сложного строения баженовской свиты и возросшего количества электрофизических параметров, которые характеризуют её породы, понижается эффективность традиционных комплексов геофизических методов, предназначенных для исследования мощных однородных терригенных коллекторов. Высокое удельное электрическое сопротивление (УЭС) пород свиты приводит к возрастанию требований к достоверности электрических и электромагнитных измерений. Современная аппаратура обеспечивает высокую точность и одновременность измерения за одну спуско-подъемную операцию данных электромагнитного (высокочастотные электромагнитные каротажные зондирования ВЭМКЗ) и электрических (боковое каротажное зондирование БКЗ и боковой каротаж БК) методов (Эпов, 2010). Расширение набора измеряемых характеристик (разность фаз, относительные и абсолютные амплитуды) ВЭМКЗ повышает эффективность инверсии в сложных разрезах. Становится возможным оценивать как УЭС, так и относительную диэлектрическую проницаемость пород (ОДП). Использование всего набора характеристик устраняет неоднозначность интерпретации в областях с высоким электрическим контрастом.

Новые геофизические постановки приводят к развитию новых эффективных алгоритмов численного моделирования электрических и электромагнитных полей с учётом максимально возможного комплекса электрофизических характеристик. Возможность комплексирования данных методов электротометрии с разным принципом возбуждения полей обеспечивает повышение достоверности получаемых результатов.

Численная интерпретация данных гальванических зондирований

Тонкое переслаивание прослоев разного состава, характерное для осадочных отложений, является причиной сильной макроанизотропии УЭС. Для отложений Западной Сибири значение УЭС одинаково в горизонтальной плоскости и меньше, чем в вертикальном направлении. При вертикальном пересечении скважиной такой трансверсально-изотропной среды показания длинных зондов БКЗ соответствуют УЭС в горизонтальной плоскости ρ_h , а при уменьшении длины – стремятся к среднему геометрическому значений ρ_h и УЭС в вертикальном направлении ρ_v (Kunz and Moran, 1958). Геоэлектрическая модель баженовской свиты отличается от рассмотренных в этой статье моделей высокими значениями УЭС, а значит, высоким контрастом значений УЭС пласта и раствора в скважине.

Разработан алгоритм численного моделирования данных электрических зондирований в пространственно-неоднородных электропроводящих макроанизотропных средах. Численное решение прямой задачи основано на векторном методе конечных элементов и сводится к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с разреженной матрицей большой размерности, для решения которой используются эффективные решатели. Алгоритм позволяет проводить имитацию сигналов бокового каротажного зондирования в реалистичных моделях

тонкослоистых и трещиноватых геологических сред. Геоэлектрическая модель состоит из горизонтальных пластов, которые включают несколько цилиндрических зон, описывающих сложное строение околоскважинного пространства. Каждая зона, в том числе неизменная часть пласта, характеризуется своими наборами тензоров УЭС.

Исследуем зависимость сигналов зондов БКЗ от коэффициента анизотропии λ при таких соотношениях значений УЭС. Значения чувствительности η_{ρ_v} к вертикальному сопротивлению (рис. 1, слева) являются довольно низкими, что говорит о большой ошибке определения значения ρ_v , однако такой уровень достаточен для того, чтобы установить факт наличия анизотропии и провести оценку ρ_v . С увеличением значения ρ_h максимальные значения чувствительности сдвигаются с коротких зондов к длинным: при 500 Ом·м значения η_{ρ_v} максимальны для 4- и 8-метровых зондов. Приращения сигналов в анизотропной среде относительно сигналов в изотропной, напротив, существенно зависят от значений λ (рис. 1, внизу слева). Величина приращений невелика, что повышает требования к точности и достоверности измерений. В среднем для рассматриваемых параметров модели уровень чувствительности достаточен для вывода о наличии анизотропии УЭС и оценки значения ρ_v с погрешностью, примерно в 6–10 раз превышающей погрешность измерения.

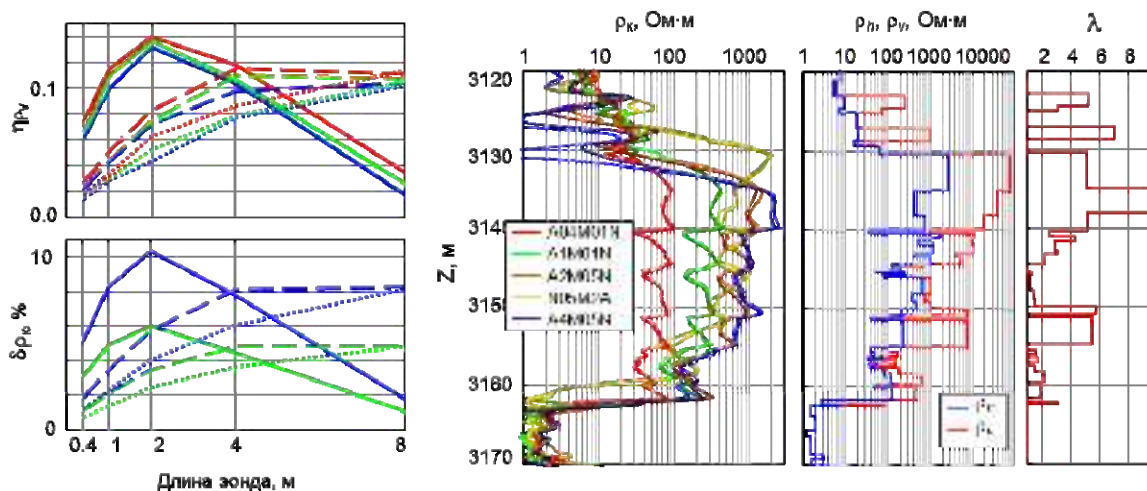


Рисунок 1 Чувствительность сигналов БКЗ к вертикальной составляющей УЭС (слева сверху; ρ_h , Ом·м: 100 – сплошная линия, 500 – пунктир, 1000 – точки; ρ_v / ρ_h : 1 – красный цвет, 1.5 – зелёный, 2 – синий) и приращение сигналов в анизотропной среде относительно изотропной (слева внизу). Справа: данные БКЗ и определенные значения ρ_h , ρ_v и λ .

Численная инверсия сигналов БКЗ выполнялась с использованием алгоритма расчёта данных БКЗ на основе двумерной анизотропной модели УЭС. При этом предполагалось, что в породах баженовской свиты зона проникновения отсутствует или небольшой толщины и характеризуется пониженным УЭС относительно УЭС пласта. В качестве стартовой модели была взята расстановка границ по данным комплекса методов, в том числе гамма-, нейтронного и бокового каротажа, и значения УЭС по данным БК. Инверсия считалась оконченной, если синтетический сигнал совпадал с измеренным в пределах погрешности измерения. Измеренные и подобранные сигналы БКЗ показаны в правой части рис. 1 (подобранные показаны более темным оттенком). Несмотря на гладкость кривых кажущегося сопротивления на интервале глубин $\times 03\text{--}\times 20$ м, значение ρ_h изменяется значительно – около 8000 Ом·м в верхней части интервала, а в середине выделяются прослои со значением 300–500 Ом·м. Высокие значения коэффициента электрической анизотропии в кровле и подошве свиты могут быть связаны как с чередованием тонких глинистых прослоев с изолирующими высокобитуминизированными или кремнистыми, так и с повышенной трещиноватостью пород. Отметим, что при 5-процентной относительной погрешности измерения значения ρ_v в наиболее высокоомных пластах определяются с погрешностью около 50 %.

Численная интерпретация данных электромагнитных зондирований

Методика определения расширенного набора электрофизических параметров основана на том, что повышенные значения диэлектрической проницаемости не изменяют сигналы, измеренные на постоянном токе, но значительно влияют на сигналы переменного тока высокой частоты (Эпов и Сухорукова, 2012). Первым этапом является построение резистивной модели среды по данным методов постоянного тока. На втором этапе для установленных значений УЭС подбирается такое эффективное значение ОДП, чтобы измеренные сигналы ВЭМКЗ совпали с расчётными в пределах погрешности измерения. Кроме того, значение ОДП зависит от частоты возбуждающего электромагнитного поля, поэтому для сигнала каждого зонда подбирается свое эффективное значение ОДП (Епов et al. 2014).

Численное решение двумерной прямой задачи электромагнитного каротажа в электропроводящих средах с учётом диэлектрической проницаемости основано на методе конечных разностей. Задача состоит в решении уравнения Гельмгольца, которое в результате аппроксимации сводится к СЛАУ с пятидиагональной матрицей. Последняя после предварительной симметризации решается методом сопряженных градиентов с предобуславливанием. Особенность структуры СЛАУ обуславливает возможность использовать параллельные вычисления для ресурсоемких матрично-векторных операций, в том числе на графических процессорах. Также для быстрой имитации синтетических сигналов и интерпретации практических данных широко используются линейаризованные решения прямых и обратных задач (Glinskikh et al. 2013).

Частотные характеристики УЭС и ОДП зависят от типа породы, степени её глинистости, минерализации пластовой воды, коэффициента нефтенасыщенности и характера смачиваемости. Рядом исследователей были проведены лабораторные исследования по определению ОДП и УЭС искусственных образцов горных пород различного состава и структуры. Для неглинистых образцов в изученном диапазоне частот, вне зависимости от удельной поверхности твердой фазы, дисперсия электрофизических свойств практически незаметна. Для глинистых образцов, вне зависимости от содержания глины, достоверно фиксируется частотная дисперсия как ОДП, так и УЭС (Талалов и Даев, 1996). Высокие значения ОДП обусловлены поляризуемостью глин. Возрастание диэлектрической проницаемости с уменьшением частоты зондов ВЭМКЗ, изменяющейся в диапазоне от 0.875 до 14 МГц, хорошо заметно на диаграммах пластовых значений ОДП в глинистом пласте.

Пример подбора частотно-зависимых эффективных значений диэлектрической проницаемости по данным БКЗ и измерениям разности фаз на интервале баженовской свиты приведен на рис. 2, слева. Подбор, так же как и определение резистивной модели, проводится в попластовом режиме. Разбиение на пласты осуществлено на основе комплекса методов (включая радиоактивные и бокового каротажа). Значения ОДП (ϵ), полученные для каждой частоты, отображены теми же цветами, что и значения кажущихся сопротивлений. Значения УЭС пластов взяты из полученной по данным гальванических зондирований резистивной модели. Справа для скважины с другого месторождения показаны трансформации измеренных прибором СКЛ характеристик электромагнитного поля (разность фаз и отношение амплитуд) в кажущиеся значения УЭС и ОДП для каждой частоты. На графиках наблюдается дифференциация отложений свиты по значениям как УЭС, так и ОДП, отражающая разное содержание глинисто-аргиллитистых частиц в разных прослоях.

Выводы

Новые геофизические задачи изучения сложных геологических объектов успешно решаются на базе применения современной аппаратуры, обеспечивающей измерения комплексом методов электрометрии с высокой точностью, и эффективных алгоритмов численного моделирования электрических и электромагнитных полей. Комплексирование данных методов электрометрии с разным принципом возбуждения полей позволяет исследовать расширенный набор

электрофизических параметров геологических сред и повышает надежность получаемых при численной инверсии результатов. Для кремнисто-глинистых битуминозных пород баженовской свиты достоверно установлено пространственное распределение УЭС и электрической макроанизотропии, связанной с трещиноватостью и тонкослоистостью отложений, а также диэлектрической проницаемости и ее частотной дисперсии, обусловленных глинистой компонентой.

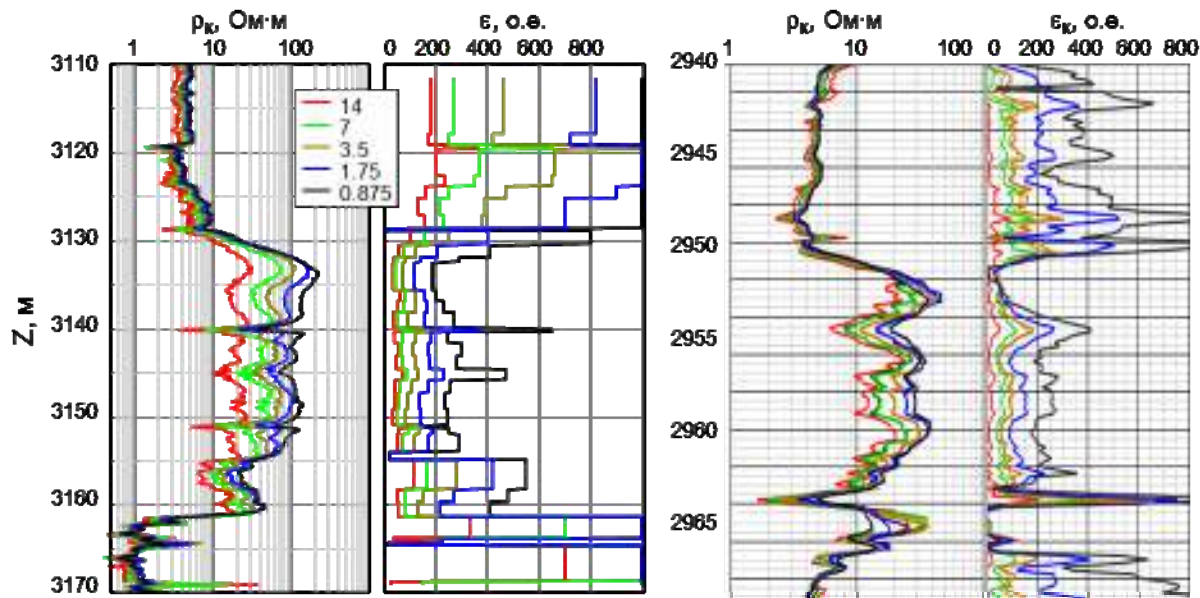


Рисунок 2 Диаграммы ВЭМКЗ на интервале баженовской свиты в скважинах разных месторождений: кажущееся сопротивление ρ_k и относительная диэлектрическая проницаемость ϵ . Слева – пример определения ϵ в попластовом режиме инверсии, справа – трансформации ϵ_k . Шифр кривых – рабочая частота зондов ВЭМКЗ, МГц.

Библиография

Талалов, А.Д., Даев, Д.С. [1996] О структурном механизме частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных горных пород. *Физика Земли*, **8**, 56-66.

Эпов, М.И., Сухорукова, К.В. [2012] Электрические и электромагнитные каротажные зондирования в реалистичных моделях нефтегазовых коллекторов: численное моделирование и интерпретация. *Геофизический журнал НАН Украины*, **34**(4), 5-15.

Kunz, K.S., Moran, J.H. [1958] Some effects of formation anisotropy on resistivity measurements in boreholes. *Geophysics*, **23**, 770-794.

Glinskikh, V.N., Nikitenko, M.N. and Epov, M.I. [2013] Processing high-frequency electromagnetic logs from conducting formations: linearized 2D forward and inverse solutions with regard to eddy currents. *Russian Geology and Geophysics*, **54**, 1519-1525.

Эпов, М.И., Каюров, К.Н., Ельцов, И.Н., Сухорукова, К.В., Петров, А.Н., Соболев, А.Ю., Власов, А.А. [2010] Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro. *Бурение и нефть*, **2**, 16-19.

Epov, M.I., Suhorukova, K.V., Glinskikh, V.N. and Nikitenko, M.N. [2014] High-frequency EM Log Data Interpretation in Realistic Reservoir Models. *EAGE 6th Saint Petersburg International Conference & Exhibition "Geosciences – Investing in the Future"*, Extended abstract, ThD06.