

Секция №4, устный

УДК 550.832

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА

Сухорукова К.В., Эпов М.И., Никитенко М.Н.

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск

Рассмотрены вопросы построения единой согласованной геоэлектрической модели глинистых отложений по данным электрического (БКЗ) и электромагнитного (ВЭМКЗ) каротажа. Согласованная модель характеризуется расширенным набором электрофизических параметров - традиционным удельным электрическим сопротивлением  $\rho$  и относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Введение такого набора физических свойств решает проблему расхождения значений  $\rho$ , определяемых по данным БКЗ и ВЭМКЗ по отдельности в рамках резистивной модели. В диапазоне частот ВЭМКЗ (0.875–14 МГц) в процессе численной инверсии сигналов, измеренных в разных глинистых отложениях, определены значения  $\epsilon$ . В некоторых пластах наблюдается частотная дисперсия этого параметра - значения  $\epsilon$  уменьшаются с ростом частоты от нескольких сотен на частоте 0.875 МГц до нескольких десятков на частоте 14 МГц. Тестирование методики определения значения  $\epsilon$  по данным ВЭМКЗ подтверждено результатами численной инверсии данных, измеренных аппаратурой этого метода в пресной воде и тестовой скважине. Сравнение с результатами лабораторного эксперимента по определению  $\epsilon$  образцов глинисто-песчаного состава показало одинаковость величин и тип зависимости от частоты. Приведены результаты оценки значения  $\epsilon$  в коллекторах с повышенной глинистостью и пиритизацией.

*Ключевые слова:* боковое каротажное зондирование, высокочастотное электромагнитное каротажное зондирование, песчано-глинистые отложения, реперный пласт, удельное электрическое сопротивление, относительная диэлектрическая проницаемость, численная интерпретация

За десятилетия численной интерпретации данных скважинной электрометрии во многих случаях замечено несовпадение оценок удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) пласта по сигналам электромагнитного зондирования и зондирования на постоянном токе. Сравнение значений  $\rho$ , полученных по данным разных методов электрометрии, прежде всего проводится для оценки кондиционности измерений – на интервалах мощных однородных глинистых отложений (реперных пластов). Сигналы зондов высокочастотного электромагнитного каротажа (ВЭМКЗ), работающих на частотах от 0.875 до 14 МГц, в таких пластах обычно соответствуют цилиндрически-слоистой модели с зоной проникновения с пониженным значением  $\rho$ , а сигналы бокового каротажного зондирования (БКЗ) – модели без зоны проникновения или с узкой прискважинной зоной с повышенным  $\rho$ .

Несоответствие оценок  $\rho$  наблюдается при сравнении результатов инверсии не только сигналов, измеренных на постоянном и переменном токе, но и сигналов электромагнитного каротажа, измеренных на разных частотах. Например, в [1–3] рассматривается проблема несовпадения значений УЭС, определяемых по сигналам индукционных зондов, работающих на разных частотах, в том числе 400 кГц и 2 МГц (LWD и MWD аппаратура) при измерении во время бурения.

Одной из возможных причин расхождения кажущихся сопротивлений по данным ВЭМКЗ на разных частотах являются особенности микроструктуры осадочных отложений. Как известно, в мегагерцовом диапазоне частот на величину измеряемой э.д.с. может сильно влиять диэлектрическая проницаемость. Расширение комплекса параметров геоэлектрической модели - введение диэлектрической проницаемости пород – позволяет отказаться от зоны проникновения при интерпретации данных ВЭМКЗ. А практически одновременное измерение методами постоянного и переменного тока, реализованное в аппаратуре СКЛ ([4] производится НПП ГА "Луч", г. Новосибирск), позволяет корректно поставить задачу построения единой согласованной геоэлектрической модели даже для пластов, осложненных проникновением бурового раствора.

Рассмотрим пример численной интерпретации сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в глинистом пласте (рис. 1, слева). Измерения одновременные, вертикальная скважина пробурена на пресном глинистом растворе. Сплошной линией представлены кривые зондирования БКЗ (вверху) и ВЭМКЗ (посередине). По горизонтальной оси отложены длины зондов (м), по вертикальной – значения кажущихся сопротивлений ( $\rho_k$ , Ом·м). В каждой точке вертикальным отрезком показаны погрешности измерения.

Синтетические сигналы ВЭМКЗ и БКЗ, рассчитанные в подобранной модели, показаны оранжевым пунктиром. По данным БКЗ (вверху) определяется резистивная модель - для скважины диаметром 0.216 м и  $\rho_c = 1.7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  сопротивление глин определяется равным 3.4 Ом·м. На среднем графике показаны измеренные сигналы ВЭМКЗ и сигналы, рассчитанные в подобранной резистивной модели. Наблюдается большое расхождение измеренных и рассчитанных значений на малых длинах (высоких частотах) зондов. Подбор по сигналам ВЭМКЗ модели пласта с параметрами ( $\rho$ ,  $\epsilon$ ) приводит к значению  $\epsilon = 133 \text{ ед.}$ , при этом измеренные и рассчитанные сигналы практически совпадают (внизу).

Исследование материалов ВЭМКЗ и БКЗ из десятков других скважин показало, что в той или иной степени этот эффект характерен и для других пластов преимущественно глинистого состава.

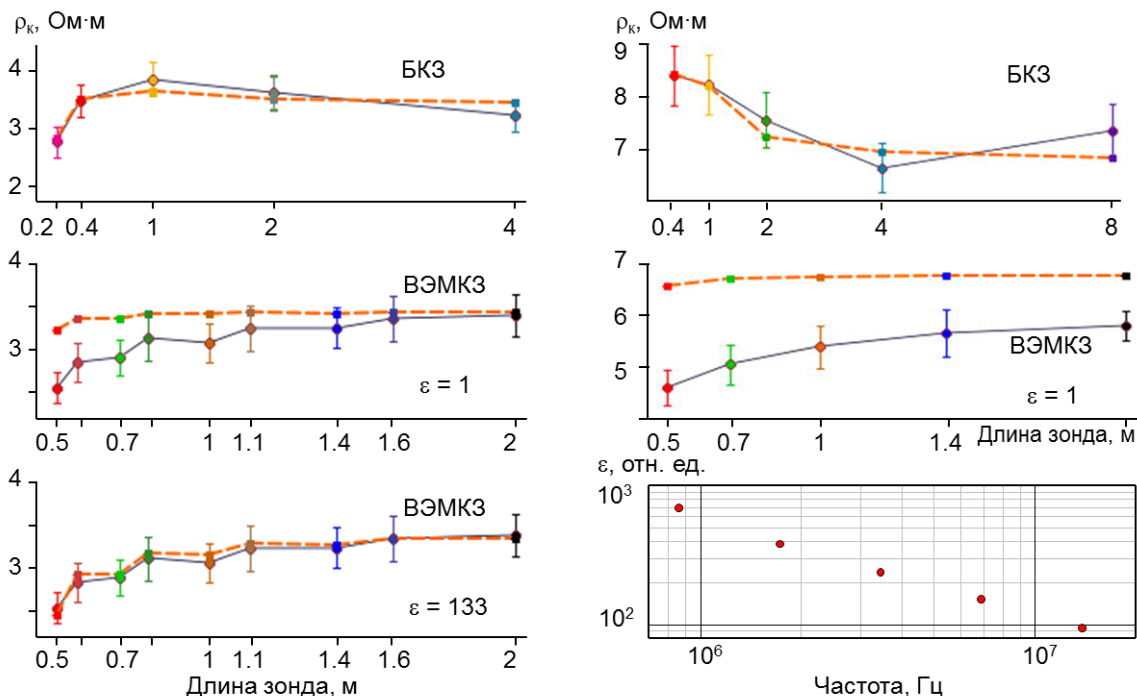


Рис. 3. Геоэлектрические модели глинистых пластов по данным БКЗ и ВЭМКЗ.

Наиболее яркий пример другого поведения представляют собой сигналы ВЭМКЗ, измеренные в типичной скважине Хорлорского месторождения. По диаграммам выделены пласты водонасыщенного песчаника и глин, их мощность превышает 10 м, что позволяет проводить численную интерпретацию на основе цилиндрически-слоистой модели. Глинистый пласт является реперным. Скважина диаметром 0.216 м заполнена раствором с  $\rho_c = 2.2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

На интервале водонасыщенного песчаного пласта сигналы БКЗ и ВЭМКЗ хорошо подбираются в рамках резистивной модели, которая состоит из двух зон проникновения фильтрата бурового раствора ( $\rho = 51$  и  $12 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , толщина 0.15 и 0.27 м, соответственно) и неизменной части пласта ( $\rho_{п} = 4.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Синтетические сигналы совпадают с измеренными в пределах погрешностей измерения.

Однако в глинистом пласте модель ( $\rho$ ,  $\epsilon$ ), описывающую сигналы ВЭМКЗ всех зондов, построить не удастся. Если построить резистивную модель по сигналам БКЗ, для неё синтетическая кривая ВЭМКЗ выходит далеко за пределы погрешностей измерения, при этом сигналы коротких зондов в большей степени не совпадают с измеренными, чем сигналы длинных зондов. В резистивной модели рядом со скважиной выделяется тонкая зона повышенного сопротивления ( $\rho = 16.6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , толщина 0.035 м), которая может быть обусловлена проникновением фильтрата бурового раствора в малопроницаемую среду, анизотропией УЭС или другими изменениями породы вблизи стенки скважины. Определение значений  $\epsilon$  привело к следующим результатам. Для глинистого пласта в модели УЭС, установленной по сигналам БКЗ, подбиралось эффективное значение  $\epsilon$ , при котором расчетный сигнал зонда на его рабочей частоте совпадет с измеренным. На рис.1 (справа внизу) представлен результат подбора значений  $\epsilon$  для каждого зонда ВЭМКЗ. Значения изменяются от 700 единиц, определенных для частоты 0.875 МГц, до 95 единиц для частоты 14 МГц.

Таким образом были обработаны данные измерений на нескольких мощных глинистых интервалах. Результат обработки представлен на рис. 2 слева в виде зависимостей  $\epsilon$  от частоты. Значение  $\rho$  отложений указано в легенде. Зеленым и красным цветом изображены зависимости, полученные на интервалах баженовских глин, синим и розовым – для глинистых пластов на глубине 1.8-2.2 км, темно-розовым и голубым – для аргиллитов юрских отложений. Тонкими линиями соответствующих цветов показаны граничные значения  $\epsilon$ , определенные для сигналов, уменьшенных или увеличенных на погрешность измерения. Эти значения характеризуют погрешность определения относительной диэлектрической проницаемости, обусловленную погрешностью измерения разности фаз. Значения  $\epsilon$ , полученные по сигналам ВЭМКЗ, хорошо согласуются с измеренными Талаловым А.Д. и Даевым Д.С. [5] на водонасыщенных образцах песка, суглинков с разной глинистостью и глины преимущественно монтмориллонитового состава.

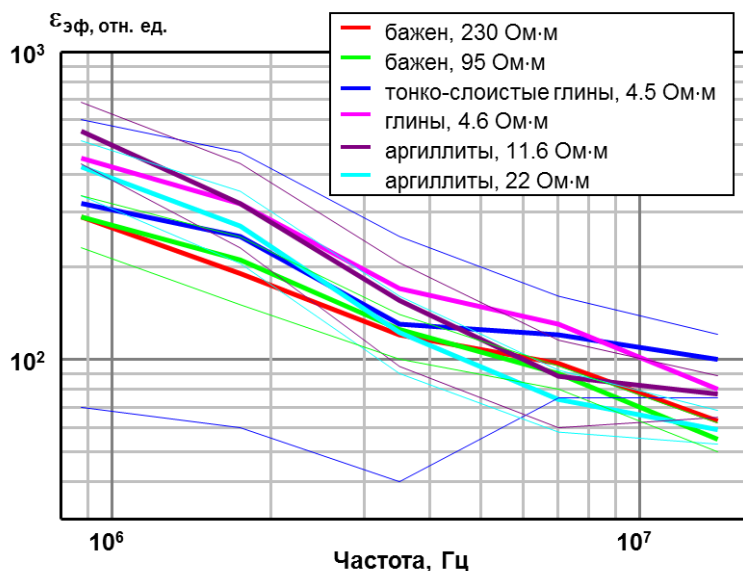


Рис. 2. Зависимость эффективного значения  $\epsilon$  от частоты.

Следовательно, при наличии измерений на постоянном и переменном токе, первым шагом при оценке эффективного значения относительной диэлектрической проницаемости является установление резистивной модели (радиального распределения УЭС) пласта по данным БКЗ, вторым шагом – для этой резистивной модели подбор значений  $\epsilon$  по данным ВЭМКЗ. В случае частотной зависимости диэлектрической проницаемости необходим подбор сигналов на каждой рабочей частоте зондов ВЭМКЗ, при этом должны быть близки оценки значения  $\epsilon$ , полученные при инверсии сигналов зондов разной длины, работающих на одной частоте.

Отметим, что значение  $\epsilon$  также можно оценить по паре характеристик электромагнитного поля [4, 6], измеряемых в новой модификации аппаратуры ВЭМКЗ – разности фаз и отношению амплитуд э.д.с. в приемных катушках каждого из 9 зондов. В этом случае по измеренным характеристикам находятся значения кажущихся УЭС ( $\rho_k$ ) и относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_k$ ) соответствующей однородной среды. Соответствие этих трансформаций значениям, определяемым в результате инверсии кривых зондирования, может являться дополнительным подтверждением достоверности полученных оценок.

На рис. 3 приведены диаграммы на интервале с мощными глинистыми пластами, коллектором (относительная глубина 25–44 м) и слоистой песчано-глинисто-карбонатной пачкой. В глинистых пластах (мощные глины, перекрывающие коллектор, и пропластки подстилающей пачки) на диаграммах  $\epsilon_k$  хорошо заметно возрастание средних значений с уменьшением частоты от 35–40 ед. при частоте 14 МГц (красная линия, зонд DF05) до  $\approx 120$  ед. при частоте 1.75 МГц (синяя линия, зонд DF14). В песчаном коллекторе (характеризуется сложной внутренней структурой, рассеянной пиритизацией и небольшой примесью глины)  $\epsilon_k \approx 15$  при частоте 14 МГц,  $\approx 30$ –40 – при частотах 7 и 3.5 МГц и 40–50 – при частоте 1.75 МГц. В тонкослоистой пачке песчаные и карбонатные пропластки также отмечаются пониженными значениями  $\epsilon_k$  по сравнению с глинистыми пропластками.

В результате инверсии сигналов ВЭМКЗ и БКЗ в выделенных пластах определены средние значения  $\rho$  и  $\epsilon$ . На глинистых интервалах подбирается значение  $\epsilon$  от 80 до 150 единиц, в тонкослоистой пачке с прослоями глин – 50–80 единиц. Эти значения соответствуют значениям трансформации  $\epsilon_k$ . В коллекторе (31–44 м) определены значения  $\epsilon$  незатронутой проникновением фильтрата части, с практической точностью совпадающие со значениями  $\epsilon_k$  средних зондов ВЭМКЗ:  $\approx 40$  единиц в верхней части и  $\approx 35$  единиц в нижней части.

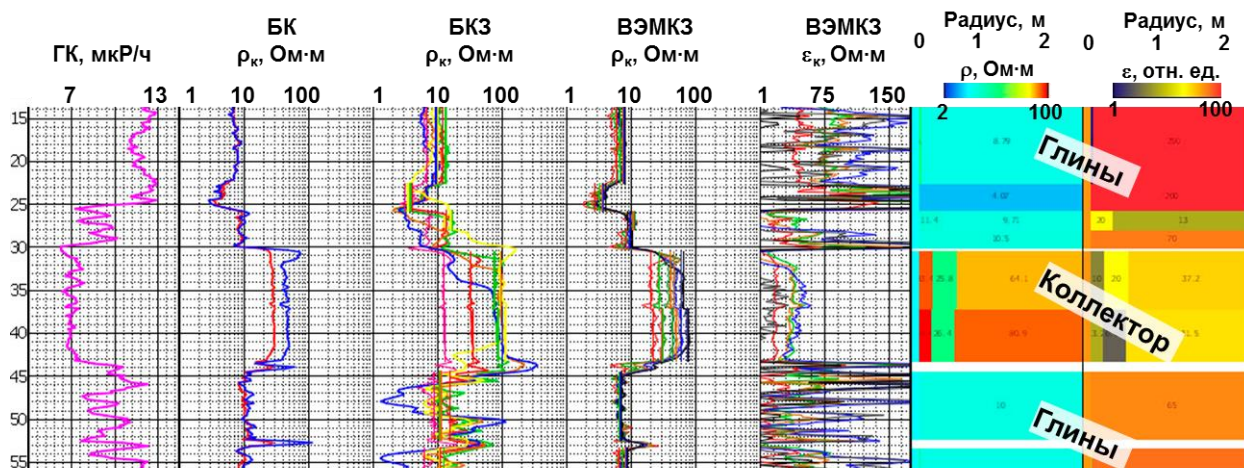


Рис. 3. Диаграммы ГК, БК, БКЗ, ВЭМКЗ (трансформации  $\rho_k$  и  $\epsilon_k$ , зонды основной группы) и определенные в результате инверсии значения  $\rho$  и  $\epsilon$  пластов геоэлектрической модели.

Поскольку при данном типе параметризации на счет влияния диэлектрической проницаемости относятся все отклонения измеренных сигналов ВЭМКЗ от рассчитанных в резистивной модели, в результате определяется некоторое эффективное значение  $\epsilon$ , в котором отражены все процессы поляризации в гетерогенной среде. Поэтому при таком подходе оценка  $\epsilon$  часто оказывается выше, чем значения составляющих породу компонентов по отдельности. Разные исследователи приводят оценки  $\epsilon$  в несколько сотен и тысяч единиц, полученные как при исследовании образцов (песчаник, суглинки, глины, [5], так и при интерпретации данных каротажа во время бурения (частоты 0.4 и 2 МГц, пиритизированные глинистые сланцы, [1]), а также отмечают частотную дисперсию  $\epsilon$ . Зависимость сигналов ВЭМКЗ от диэлектрической проницаемости среды была подтверждена экспериментально при измерениях в пресной воде Телецкого озера [7]. Значения  $\epsilon$ , полученные при инверсии данных аппаратуры СКЛ, измеренных в тестовой скважине НПП ГА "Луч", также практически совпадают со значениями трансформаций.

В работе использованы практические материалы, предоставленные трестом "Сургутнефтегеофизика" и ОАО "Когалымнефтегеофизика".

1. Anderson B.I., Barber T.D., Lüling M.G., Rasmus J., Sen P.N., Tabanou J.R., Haugland M. Observations Of Large Dielectric Effects On LWD Propagation-Resistivity Logs// 48th Annual Logging Symposium, June 3–6, 2007, Austin, Texas2007. Society of Petrophysicists & Well Log Analysts
2. Garrough A. A., Sharma M. M. Dielectric Dispersion of Partially Saturated Porous Media in the Frequency Range 10 Hz to 10 MHz II The Log Analyst. 1998. Vol. 39. No. 3. P. 48-53.
3. Hal Meyer W. Field Measurements of Resistivity Dispersion Using Two Frequency MWD Propagation Resistivity Tools// Petrophysics. Vol. 41, No. 6, 2000; P. 492-502.
4. Эпов М.И., Каюров К.Н., Ельцов И.Н., Петров А.Н., Сухорукова К.В., Соболев А.Ю., Власов А.А. Новый аппаратный комплекс геофизического каротажа СКЛ и программно-методические средства интерпретации EMF Pro// Бурение и нефть, № 2, 2010, с. 16–19.
5. Талалов А.Д., Даев Д.С. О структурном механизме частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных горных пород //Физика Земли, 1996, №8, с. 56-66.
6. Никитенко М.Н., Эпов М.И. Измерение относительной амплитуды магнитного поля зондами ВИКИЗ // Каротажник, 2008, № 9 (174), с. 21-35.
7. Сухорукова К.В., Никитенко М.Н., Петров А.Н. Численный анализ измерений ВИКИЗ и ВЭМКЗ на Телецком озере // Каротажник. - 2007. - № 5. - С. 30-38