

К. В. Сухорукова^{1}, А. А. Лапковская¹, С. А. Примаков¹, А. М. Петров¹*

Возможности многопластовой инверсии данных скважинной электрметрии при разных буровых растворах

Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
*e-mail: suhorukkv@gmail.com

Аннотация. Показаны возможности двумерной многопластовой численной инверсии данных скважинной электрметрии при буровых растворах разного состава: водно-глинистых и минерализованных полимерных. В зависимости от состава раствора и времени, прошедшего между бурением и каротажем, в коллекторах формируется зона проникновения, толщина которой может быть менее 0.2–0.3 м. В этом случае сигналы электрокаротажа могут быть слабо чувствительны к ее параметрам. Но учет этой зоны важен при анализе свойств коллекторов смешанного насыщения при большой минерализации пластовой воды. В статье приведены примеры данных ГИС и результаты инверсии, показывающие возможности двумерной многопластовой совместной численной инверсии. Детализированы электрофизические характеристики тонких коллекторов, вскрытых на глинистом и на полимерных минерализованных буровых растворах. Показано, что при неглубоком изменении породы коллектора и неизвестном соотношении минерализаций раствора в скважине и пластовой воды эффективен подбор моделей только с повышающим и только с понижающим проникновением и их комбинирование для формирования итоговой геоэлектрической модели.

Ключевые слова: многопластовая 2D совместная численная инверсия, геоэлектрические модели, скважинная электрметрия, гальванический и индукционный электрокаротаж, глинистый буровой раствор, полимерный буровой раствор

K. Sukhorukova^{1}, A. Lapkovskaya¹, S. Primakov¹, A. Petrov¹*

Possibilities of multi-layer 2D inversion of electrical logging data with different drilling fluids

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia
*e-mail: suhorukkv@gmail.com

Abstract. Some possibilities of two-dimensional multilayer numerical inversion of borehole electrometry data with drilling mud of different compositions: water-clay and mineralized polymer, are shown. Depending on the composition of the mud and the time elapsed between drilling and logging, a penetration zone is formed in the reservoirs, the thickness of which can be less than 0.2–0.3 m. In this case, electrical logging signals may be poorly sensitive to its parameters. But ignoring this zone is undesirable when analyzing the properties of mixed-saturated reservoirs with high salinity of formation water. The article provides examples of well logging data and inversion results, showing the capabilities of two-dimensional multilayer joint numerical inversion. The electrophysical characteristics of thin reservoirs opened with water-clay drilling mud and polymer mineralized drilling fluids are detailed. It is shown that with a shallow change in the reservoir rock and an unknown ratio of

drilling mud and formation water salinity, it is effective to select models with only increasing and only decreasing penetration and combining them to form the final geoelectric model.

Keywords: multilayer 2D coupled numerical inversion, geoelectrical models, downhole electrometry, galvanic and induction electrical logging, clay drilling mud, polymer drilling mud

Введение

В практике промысловых геофизических исследований нефтегазосодержащих отложений оценка насыщения рассчитывается по значениям пористости, удельного электрического сопротивления (УЭС) пластовой воды и УЭС коллектора. Первый параметр коллектора оценивается по данным методов плотностного, акустического, радиоактивного каротажа и каротажа самопроизвольной поляризации (в зависимости от применяемого комплекса). Второй – определяется по результатам лабораторных исследований проб пластовой воды. Для получения третьего – УЭС коллектора – разработано несколько методов электрокаротажа, в том числе и зондирующих. Каждый из параметров оценивается с достаточно большой погрешностью, но УЭС пластов определяется по сигналам электрокаротажных зондов, формируемым достаточно обширной областью среды, как правило, сопоставимой с длиной зонда.

Во многих компаниях принято оценивать УЭС пласта по значениям кажущегося сопротивления (КС) по одному из зондов бокового каротажа (БК), низкочастотного индукционного каротажа (ИК, в т.ч. многозондового), бокового каротажного зондирования (БКЗ) или электромагнитного каротажа (ВЭМКЗ). Такой подход работает, но при некоторых условиях: он статистически подтвержден практикой эксплуатации, свойства коллекторов довольно выдержанные, условия бурения одни и те же во всех скважинах, на пластовый отсчет мало влияют свойства вмещающих пород. Последнее условие – это условие на минимальную толщину коллектора, но обычно в разрезе встречаются однородные коллекторы большой мощности, насыщенные пластовой водой и поэтому не представляющие практического интереса. Нефтегазонасыщенные коллекторы зачастую характеризуются изменением УЭС от кровли к подошве соответственно изменению насыщения, и кроме того осложнены электрически контрастными прослоями. Эти особенности терригенных отложений обуславливают переход количественной интерпретации данных электрокаротажа с одномерных цилиндрически-слоистых геоэлектрических моделей на двумерные многопластовые [1–4]. Преимущество такого подхода заключается не только в том, что автоматически учитываются свойства весьма неоднородных вмещающих пород, но и в том, что находится такое сочетание электрофизических параметров пластов, которое соответствует всему набору измеренных электрокаротажных сигналов.

Каждый из методов электрокаротажа проектировался исходя из поиска оптимального соотношения глубинности, разрешающей способности и величины сигнала. Главной целью являлось извлечь информацию об удаленной от прибора в скважине части коллектора, не измененной в процессе бурения. Применение

водно-глинистых буровых растворов и значительное время между бурением и каротажем приводило к формированию достаточно глубоких измененных фильтрацией раствора зон в коллекторах [5]. Чувствительность сигналов существующей аппаратуры к параметрам этих зон при их толщине в несколько десятков сантиметров достаточно большая для оценки их радиальной толщины и УЭС. Но в последние десятилетия расширяется применение полимерных буровых растворов, как пресных, так и минерализованных, в связи с чем сигналы электрокаротажа существенно изменяются. Также значительно сократилось время между бурением и каротажем. В новых условиях по данным повторных каротажей фиксируются изменения в проницаемых породах, однако из-за небольшой глубины их изучение становится сложным даже по данным комплекса зондов [6].

Соответственно применяемой технологии бурения и составу бурового раствора изменяются как сами сигналы электрокаротажа, так и возможности определения электрофизических свойств вскрытых пород, что показано на последующих примерах.

Методы и материалы

В работе анализируются практические данные электрокаротажа, измеренные в вертикальных скважинах, бурение которых велось с применением пресных глинистых и минерализованных полимерных растворов. Данные получены российскими приборами, методы: БКЗ, БК, ИК и ВЭМКЗ. Способ анализа: совместная двумерная численная инверсия с построением многопластовой геоэлектрической модели (программы расчета и инверсии сигналов разработаны в ИНГГ СО РАН [7, 8]).

Совместная численная инверсия электрокаротажных сигналов проводится в классе осесимметричной геоэлектрической модели (2D модель). 2D модель определяется следующим образом: среда вокруг каротажного прибора делится горизонтальными границами на пласты пород, а цилиндрические границы разделяют скважину с буровым раствором, измененные при бурении проницаемые пласты прискважинные зоны и неизмененную часть [9]. Каждый элемент модели, находящийся между соседними горизонтальными и цилиндрическими границами, параметризуется значением УЭС, горизонтальным и вертикальным для анизотропных пород, а также значением относительной диэлектрической проницаемости, если в набор инверсируемых данных входят сигналы ВЭМКЗ, работающего в мегагерцовой области. При этом подбирается не средний уровень сигналов в пределах пласта, а их изменение вдоль скважины [10].

Программное обеспечение инверсии [7, 8, 11] и методические приемы [4, 6, 9, 10] тестировались на синтетических сигналах электрокаротажа в реалистичных изотропных и анизотропных моделях песчано-глинистых отложений со сложным радиальным профилем УЭС в диапазонах значений, типичных для Западно-Сибирского терригенного разреза [2]. Опыт инверсии измеренных в реальных условиях данных выявил особенности их получения и предобработки, привел к оптимизации методики подготовки сигналов к инверсии, проверки их кондиционности, выбора диапазонов возможных значений.

Результаты

Пример данных в скважине с водно-глинистым буровым раствором (БР; УЭС 0.7 Ом·м) приведен на рис. 1. Ввиду того, что результаты численной инверсии для случая фильтрующегося глинисто-водного БР описаны во многих статьях [3, 4, 6, 10], особо подробный анализ здесь не приводится. Проницаемые породы хорошо идентифицируются по диаграммам всех методов: кавернометрии (DS), гамма (ГК) и нейтронного (НКТВ) каротажа, потенциала самополяризации (PS) и гальванического микрозондирования (GMZ, PMZ, ВМК). Толщина глинистой корки, вероятно, уменьшенной в результате смыва, и плотность по данным зашумленного плотностного каротажа (GGKP) также соответствуют пористым проницаемым отложениям.

В коллекторах по комплексу данных БКЗ+БК+ИК определяется повышающее проникновение с УЭС и радиальной глубиной, соответствующим технологии бурения на глинистом растворе. В результате инверсии уточнено УЭС частей коллекторов $\times\times 08.0$ – $\times\times 11.6$ м и $\times\times 18.1$ – $\times\times 20.2$ м: в верхних пластах большее, чем в нижних, и соответствующее большему нефтесодержанию.

На рис. 2 приведен фрагмент данных ГИС, демонстрирующий сложность анализа данных ГИС, измеренных в скважине, пробуренной на полимерном растворе значительной солености (УЭС БР около 0.04 Ом·м). Каверномер (CALI) не фиксирует значимых изменений: диаметр скважины меняется дискретно, не соответствует данным ГК (GR), кроме того, отклонение от номинального диаметра (DN) не превышает погрешности измерения. Микроградиент (MGZ) и микропотенциал (MPZ) зонды пишут сигналы, расходящиеся по среднему уровню между собой. Водородосодержание (W) в песчаных и глинистых пластах примерно одинаково. Записи БКЗ (GZ1–GZ5, OGZ) сильно сглажены влиянием низкоомного БР (RS). На наличие изменения в прискважинной зоне, а значит, на наличие коллекторских свойств, указывает большее, чем в других местах, расхождение диаграмм ВЭМКЗ (RO05–RO20) в интервале $\times\times 51$ – $\times\times 77$ м. Информативным также оказывается сравнение данных микробокового (MLL, четвертый трек) и бокового (BK) зондов: расхождение диаграмм показывает интервалы проницаемых пород. Видимые расхождения достаточно велики, что приводит к выводу о глубоком изменении в поровом пространстве породы. При инверсии данных БКЗ+БК+ ВЭМКЗ толщина ЗП определяется 0.5–0.7 м, толщина некоторых проницаемых прослоев менее полуметра, изменение УЭС коррелирует с изменением насыщения и глинистости. Глубокое изменение в прискважинной области свидетельствует о значительном времени между бурением и каротажем.

Сложности с оценкой характера проникновения при использовании полимерного раствора иллюстрирует и рис. 3. В этом разрезе пластовые воды сильно минерализованы: по данным исследования проб в других скважинах минерализация может быть в диапазоне 100–200 г/л, что при температуре пластов 80–90 °С дает УЭС_{пв} несколько сотых Ом·м. УЭС БР составляет 0.04 Ом·м, т.е. находится в том же диапазоне. Точный состав бурового раствора не известен, также как и пластовых вод.

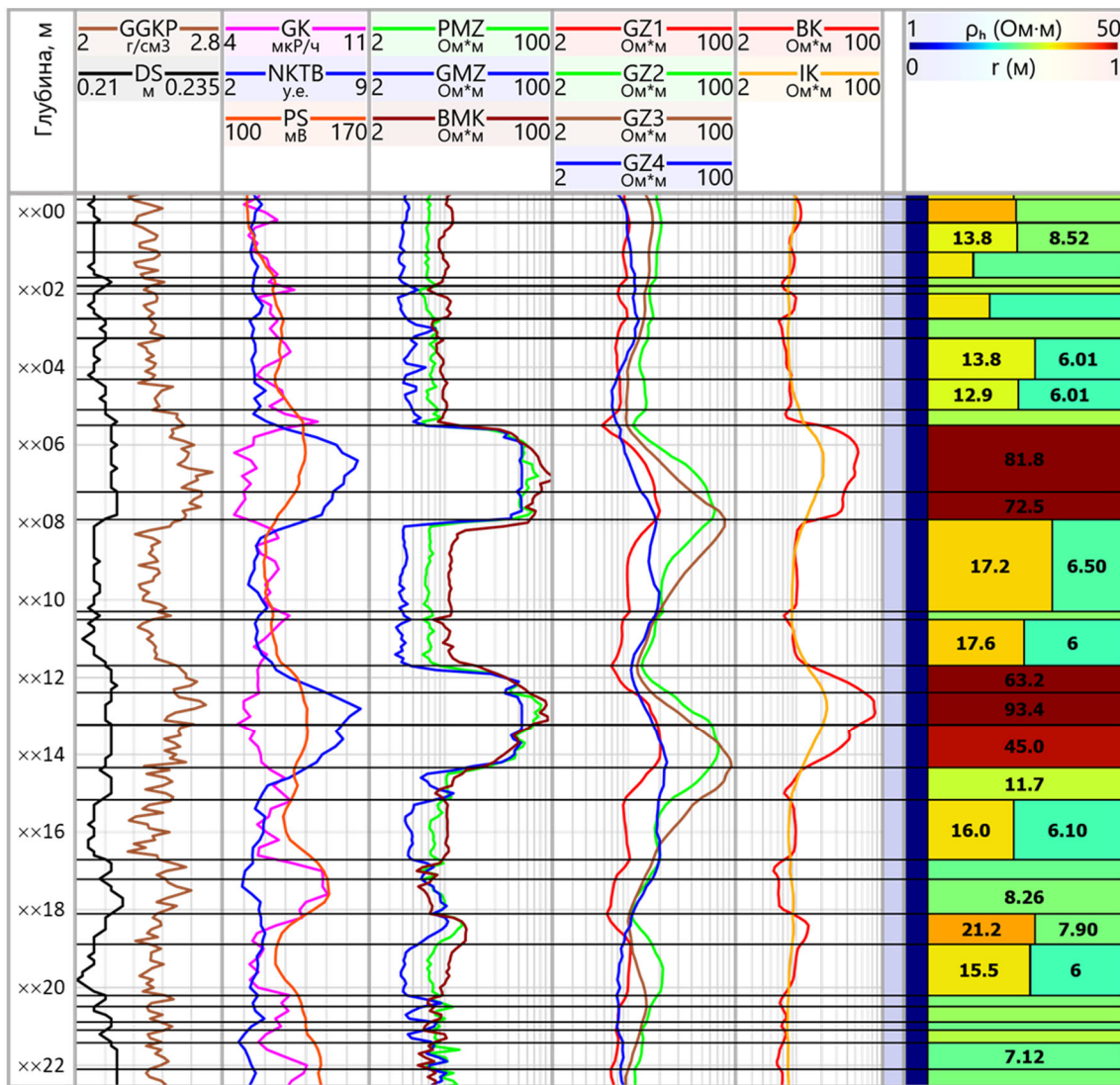


Рис. 1. Диаграммы ГИС в скважине с глинистым раствором и геоэлектрическая модель, полученная в результате многопластовой совместной инверсии данных БК, БКЗ и ИК

По данным кавернометрии выявляются заметные уменьшения диаметра скважины на интервале проницаемых пород, поэтому выделение коллекторов по данным кавернометрии, ГК, НКт и ПС не представляет особого труда, в отличие от оценки возможного характера проникновения. Отметим, что, несмотря на заявленную биополимерную основу бурового раствора, уменьшение диаметра достигает сантиметра. Хорошая разрешенность данных ПС обусловлена разным солевым составом раствора и пластовых вод.

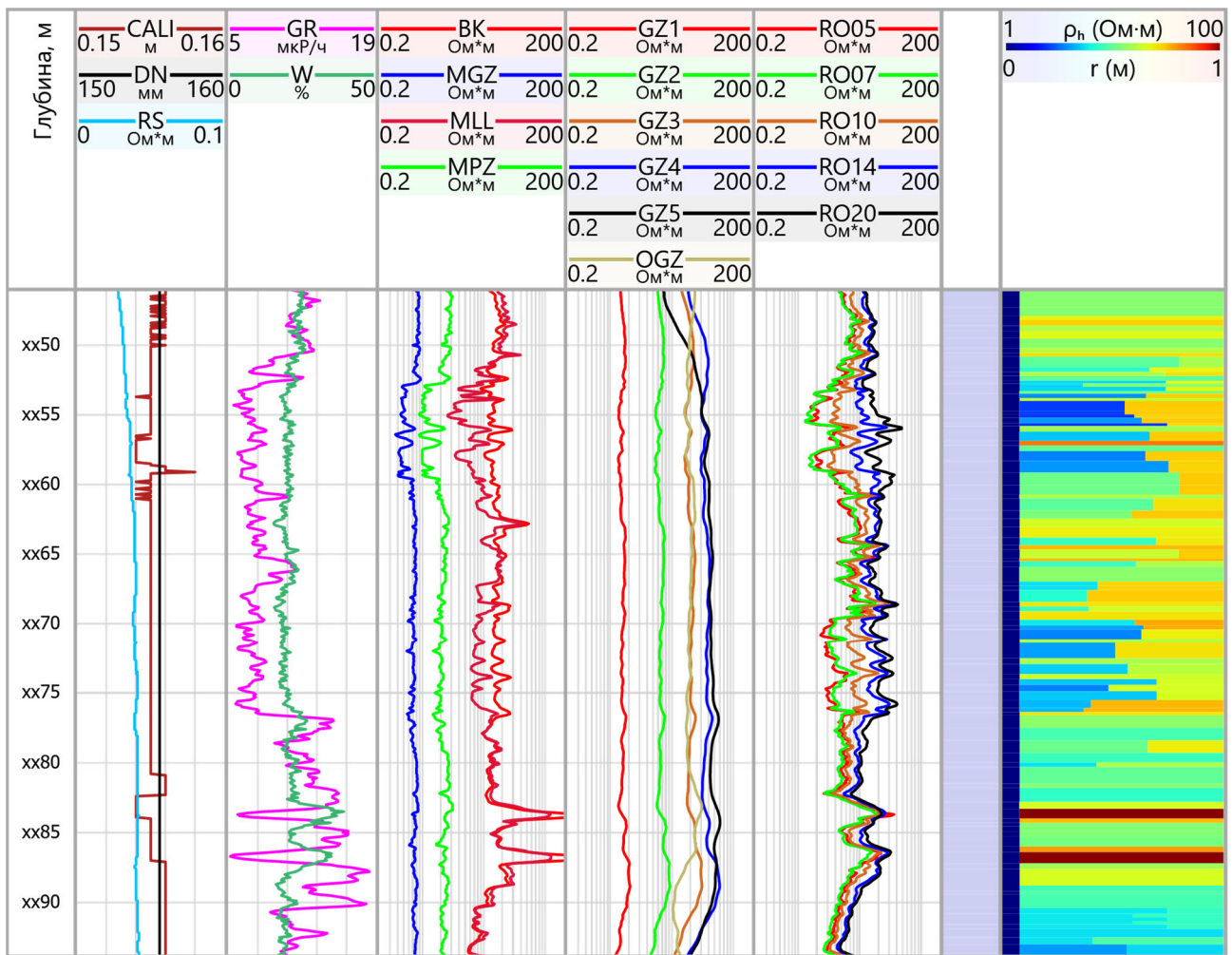


Рис. 2. Диаграммы ГИС в скважине с низкоомным полимерным раствором и геоэлектрическая модель, полученная в результате многопластовой совместной инверсии данных БК, БКЗ и ВИКИЗ.

Из-за того, что для оценки характера проникновения нет исходной информации, применен следующий прием: проведена двумерная инверсия данных БКЗ+БК+ИК в предположении 1) повышающего проникновения, 2) понижающего проникновения. Результаты инверсии представлены на треках "модель 1" и "модель 2" соответственно. При одинаковой глубине проникновения в моделях проявились интервалы с разными типами проникновения, в результате комбинирования которых построена окончательная модель. Определение правильного типа проникновения в подобных геоэлектрических условиях важно для оценки УЭС прослоев продуктивного интервала $\times\times05$ – $\times\times34$ м: в результате выбора их модели с понижающим проникновением УЭС пласта определяется выше примерно на 1.0–1.5 Ом·м, чем без учета проникновения, что важно для оценки продуктивности при большой минерализации пластовых вод. В нижнем коллекторе ($\times\times43$ – $\times\times63$ м) тип проникновения в основном повышающий, что вместе с низким УЭС пластов свидетельствует о насыщении пластовой водой и подтверждает, что ее минерализация выше, чем в буровом растворе.

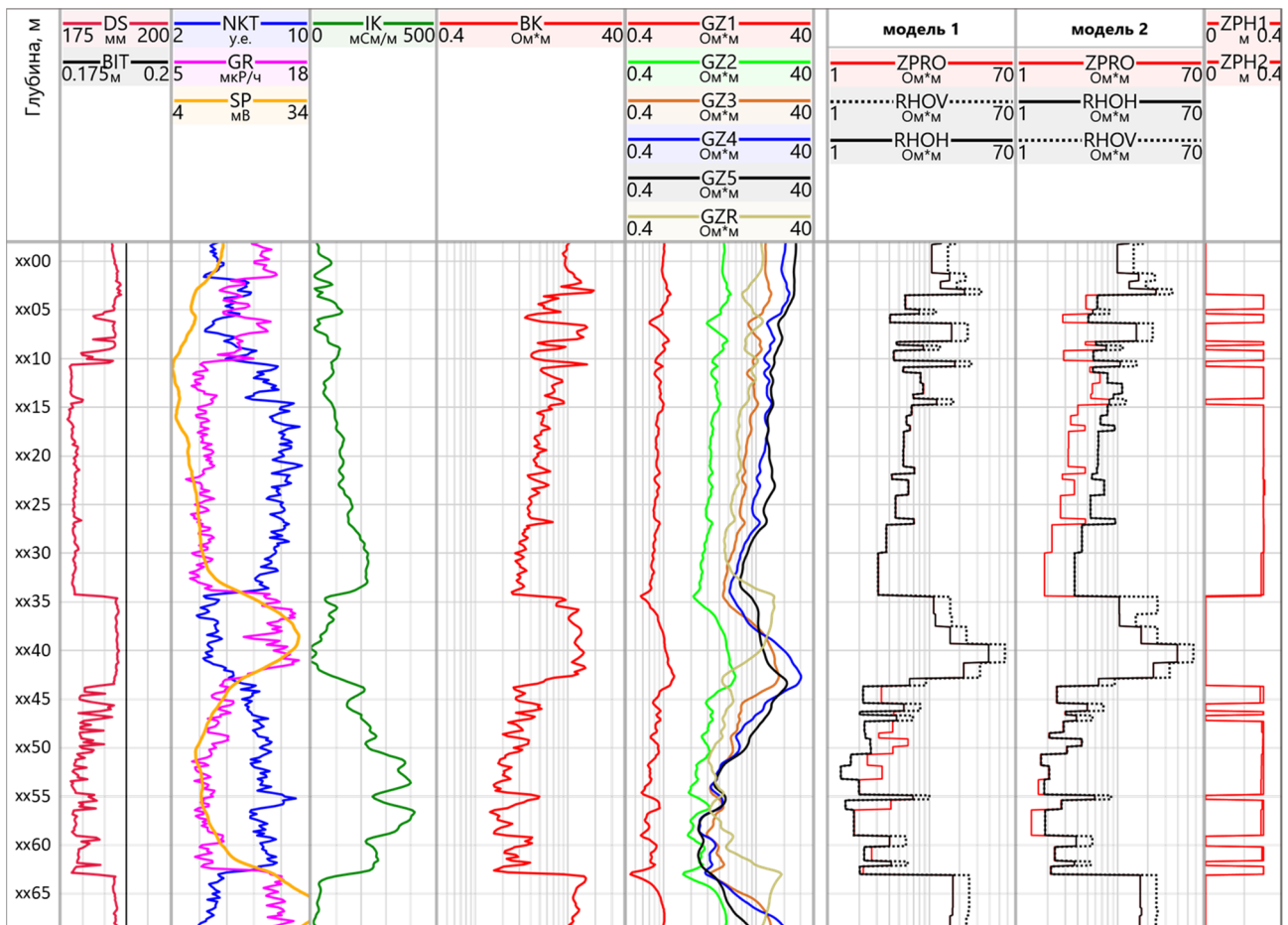


Рис. 3. Данные ГИС и геоэлектрические модели, полученные в результате инверсии комплекса БКЗ+БК+ИК при разном соотношении УЭС ЗП (ZPRO) и УЭС пласта (RHOH): RHOV – вертикальное УЭС непроницаемых пластов, ZPH – толщина зон проникновения, модель 1 – $УЭС_{ЗП} < УЭС_{П}$, модель 2 – $УЭС_{ЗП} > УЭС_{П}$.

Заключение

Количественная интерпретация данных гальванического и индукционного электрокаротажа с применением двумерной многопластовой совместной численной инверсии детализирует электрофизические характеристики тонких коллекторов, вскрытых в том числе на полимерных и минерализованных растворах. В случае неглубокого изменения породы коллектора вблизи скважины и неизвестного соотношения минерализаций БР и пластовой воды эффективен прием подбора моделей только с повышающим и только с понижающим проникновением и их комбинирование для формирования итоговой геоэлектрической модели.

Благодарности

Исследования выполнены по проекту ПФНИ № FWZZ2022-0026.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В. Совместная численная инверсия данных индукционных и гальванических каротажных зондирований в моделях геологических сред с осевой симметрией // Геология и геофизика, 2017. – Т. 58. – № 6. – С. 935-947.
2. Erov M.I., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V., Petrov A.M., Rabinovich M., Weston H., Tyurin E., Wang G.L., Abubakar A., Claverie M. 2020. Comparison of the Russian and Western Resistivity Logs in Typical Western Siberian Reservoir Environments: A Numerical Study. *Petrophysics*. 61(1), 38-71. DOI: 10.30632/PJV61N1-2020a1.
3. Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В. Двумерная инверсия сигналов российского электрокаротажа, измеренных на интервалах сложнопостроенных отложений [Электронный ресурс] // Геомодель-2019: 21-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (г. Геленджик, 9-13 сентября 2019 г.): Тезисы докладов. – 2019. – 4 с.
4. Эпов М.И., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Лапковская А.А., Леоненко А.Р., Петров А.М., Сухорукова К.В., Горносталев Д.И. Современное программно-методическое обеспечение интерпретации комплекса данных скважинной электротометрии // Геодинамика и тектонофизика: – том 12 – № 3S – С. 669-682 – 2021
5. Эпов М.И., Ельцов И.Н., Кашеваров А.А., Соболев А.Ю., Ульянов В.Н. Эволюция зоны проникновения по данным электромагнитного каротажа и гидродинамического моделирования // Геология и геофизика, 2004. – № 8. – С. 1033–1044.
6. Лапковская А.А., Сухорукова К.В., Нечаев О.В., Петров А.М. Восстановление двумерной геоэлектрической модели численной инверсией сигналов гальванического и индукционного каротажа // Геофизические технологии – № 1 – С. 118-133 – 2022
7. Нечаев О.В., Глинских В.Н. Быстрый прямой метод решения обратной задачи электрического каротажа в нефтегазовых скважинах // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2017. – № 15. – С. 53-63.
8. Нечаев О.В., Глинских В.Н. Трехмерное моделирование и инверсия данных комплекса методов электрокаротажа в моделях сред с наклоном главных осей тензора электрической анизотропии // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 127-139.
9. Петров А.М., Сухорукова К.В., Нечаев О.В. Совместная двумерная инверсия данных электрического и электромагнитного каротажных зондирований в анизотропных моделях песчано-глинистых отложений // НТВ «Каротажник». – 2019. – № 3 (297). – С. 85-103.
10. Сухорукова К.В., Петров А.М., Нечаев О.В. Геоэлектрические модели меловых коллекторов Западной Сибири по результатам комплексной интерпретации данных электрокаротажа // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири – № 3 (41) – С. 77-86 – 2020
11. Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В. Быстрая совместная двумерная инверсия данных электромагнитных и гальванических каротажных зондирований с определением вертикального сопротивления // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2018: сб. материалов XIV Междунар. науч. конгр. в 6 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – Т. 4. – С. 90–97.

© К. В. Сухорукова, А. А. Лапковская, С. А. Примаков, А. М. Петров, 2024