

С. В. Ананьев^{1}, К. В. Сухорукова², А. М. Петров², О. В. Нечаев²*

Влияние окаймляющей зоны на сигналы многозондового индукционного каротажа

¹ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: s.ananev@g.nsu.ru

Аннотация. Окаймляющая зона (ОЗ), образующаяся в коллекторах смешанного насыщения при их вскрытии, является качественным признаком наличия в них подвижной нефти. При оценке промышленного потенциала и разработке коллекторов смешанного насыщения анализ наличия ОЗ по данным геофизических исследований в скважинах является важным дополнением к стандартному инструментарию интерпретации данных электрокаротажа, основанному на связи удельного электрического сопротивления пласта с его флюидосодержанием. Известно, что высокой чувствительностью к параметрам ОЗ характеризуются сигналы метода высокочастотного индукционного каротажа (ВИКИЗ, ВЭМКЗ). В то же время чувствительность к ним сигналов многозондового низкочастотного индукционного каротажа не исследована. С учетом все более широкого внедрения подобной аппаратуры в практику геофизических работ, анализ возможности выявления наличия в пластах-коллекторах ОЗ по данным таких приборов представляет интерес для нефтегазовой геофизики. В работе рассматриваются результаты численного моделирования сигналов ВИКИЗ и 5ИК в упрощенных моделях коллекторов с учетом и без учета наличия окаймляющей зоны. По результатам моделирования установлено, что в условиях, характерных для терригенных отложений Западной Сибири, сигналы 5ИК обладают чувствительностью к параметрам окаймляющей зоны. Необходимость учета влияния окаймляющей зоны при интерпретации практических данных демонстрируется на примере инверсии данных 5ИК, измеренных на интервале терригенных коллекторов смешанного насыщения мелового возраста (Имилорское месторождение).

Ключевые слова: окаймляющая зона, зона проникновения, многозондовый индукционный каротаж, двумерное моделирование, синтетические сигналы

S. V. Ananyev^{1}, K. V. Sukhorukova², A. M. Petrov², O. V. Nechaev²*

Low resistivity annulus zone impact on multi-probe induction logs

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

* e-mail: s.ananev@g.nsu.ru

Abstract. The annulus zone, which is formed in reservoirs of mixed saturation during their opening, is a reliable sign of them containing mobile oil. When assessing the commercial potential and during the development of mixed-saturation reservoirs, the analysis of the annulus zone presence based on well logging data is an important addition to the standard interpreting procedures of logging data, based on the connection between formation electrical resistivity and its fluid content. It is known that the high-frequency induction logging methods (VIKIZ, VEMKZ) are characterized by high sensitivity to the annulus zone parameters. At the same time, the sensitivity of multiprobe low-frequency

induction logging methods to them has not been yet studied. Considering an increasing introduction of such equipment into the geophysical studies, exploring the possibility of detecting the annulus zone presence in reservoirs based on the data of such tools is of great interest to oil and gas geophysicists. The paper considers the results of VIKIZ and 5IK signals numerical simulation in simplified reservoir models with and without taking into account the presence of the annulus zone. Based on the simulation results, it was found that under conditions typical for terrigenous deposits of Western Siberia, the 5IK method is sensitive to the annulus zone parameters. The need to take into account the influence of the annulus zone during practical data interpretation is demonstrated by the example of the inversion of 5IK data measured in the interval of mixed-saturation terrigenous reservoirs of Cretaceous age (Imilorskoye field).

Keywords: annulus zone, flushed zone, multi-probe induction logging, two-dimensional numerical simulation, synthetic signals

Введение

При бурении на репрессии фильтрация пресного глинистого бурового раствора в коллектор со смешанным насыщением приводит к последовательному вытеснению содержащихся в нем подвижной нефти и минерализованной воды с формированием перед фронтом фильтрата окаймляющей зоны (ОЗ) с низким удельным электрическим сопротивлением [1]. Наличие в прискважинной области коллектора низкоомной окаймляющей зоны, образование которой невозможно в пластах с преимущественным насыщением нефтью или пластовой водой, является явным признаком смешанного насыщения коллектора с подвижной нефтью. Методы высокочастотного индукционного каротажа (ВИКИЗ, ВЭМКЗ), как показывает опыт их применения, обладают высокой чувствительностью к наличию в проницаемых пластах окаймляющей зоны [2]. Можно ожидать, что чувствительность к ней могут проявлять и другие индукционные методы каротажа, основанные на формировании в прискважинной области системы круговых токов. С учетом все большей распространенности приборов низкочастотного индукционного каротажа (5ИК, 4ИК) исследование возможности выявления окаймляющей зоны по их сигналам приобретает особую актуальность.

Исследование основано на численном моделировании сигналов ВИКИЗ и 5ИК в геоэлектрических моделях коллекторов смешанного насыщения, типичных для меловых разрезов Западной Сибири при их вскрытии на пресном глинистом растворе, и численной инверсии практических данных 5ИК на интервале нефтеводонасыщенных коллекторов мелового возраста с построением геоэлектрических моделей разного строения (без и с ОЗ).

Расчет сигналов и численная инверсия практических данных выполнена с применением алгоритмов программного комплекса «AlondraWL» (ИНГГ СО РАН). Основой комплекса являются представленные в работах [3, 4] верифицированные конечно-элементные алгоритмы для моделирования сигналов ВИКИЗ, БКЗ, БК и ИК в вертикальных скважинах.

Модели терригенных коллекторов смешанного насыщения

При наличии фильтрации пресного бурового раствора в песчаный коллектор по данным ВЭМКЗ и БКЗ, как правило, определяется геоэлектрическая модель с

измененными проникновением прискважинными зонами. В водонасыщенном и нефтенасыщенном песчанике выделяется соответственно повышающая или понижающая зона проникновения (ЗП). При смешанном насыщении коллектора его геоэлектрическая модель включает в себя высокоомную зону проникновения, низкоомную окаймляющую зону и неизмененную часть пласта [5].

На основе практических данных для численного моделирования сигналов ВИКИЗ и 5ИК построены упрощенные модели коллекторов в однородных глинистых отложениях с различной мощностью проницаемого пласта, с окаймляющей зоной и без неё [7]. Толщина пласта-коллектора меняется от 0.5 до 3.0 м. Пример моделей представлен на рис. 1. Толщины ЗП и ОЗ равны 0.3 м, УЭС блоков в коллекторе 20, 4 и 12 Ом·м, радиус скважины 0.108 м, УЭС бурового раствора 1 Ом·м. Для сравнения рассчитываются сигналы в модели без и с ОЗ.



Рис. 1. Модели коллекторов, используемые при численном моделировании сигналов зондов ВИКИЗ и 5ИК

Результаты численного моделирования сигналов ВИКИЗ и 5ИК

На рис. 2 приведены рассчитанные диаграммы разности фаз ($\Delta\phi$) зондов ВИКИЗ в моделях коллекторов без и с ОЗ, а также диаграмма приращения $\Delta\phi$ при добавлении в модель окаймляющей зоны при мощности проницаемого пласта 3 м.

В модели без ОЗ рассчитанные значения разности фаз увеличиваются по мере увеличения длины зонда, что обусловлено влиянием как вмещающих пород с низким УЭС, так и неизмененной части проницаемого пласта.

В модели с окаймляющей зоной на диаграммах $\Delta\phi$ наблюдается заметное расхождение сигналов зондов разной длины. Наиболее длинному и короткому зондам ВИКИЗ, как и в модели без ОЗ, соответствуют пониженные значения разности фаз относительно уровня во вмещающих породах. В случае короткого зонда это обусловлено большим вкладом в его показания повышающей зоны проникновения, чем для зондов большей длины, а в случае длинного зонда – большим вкладом неизмененной части пласта. Зондам средней длины (0.7, 1.0 и 1.4 м) соответствуют повышенные значения $\Delta\phi$ в проницаемом пласте, что является результатом вклада в сигналы низкоомной окаймляющей зоны.

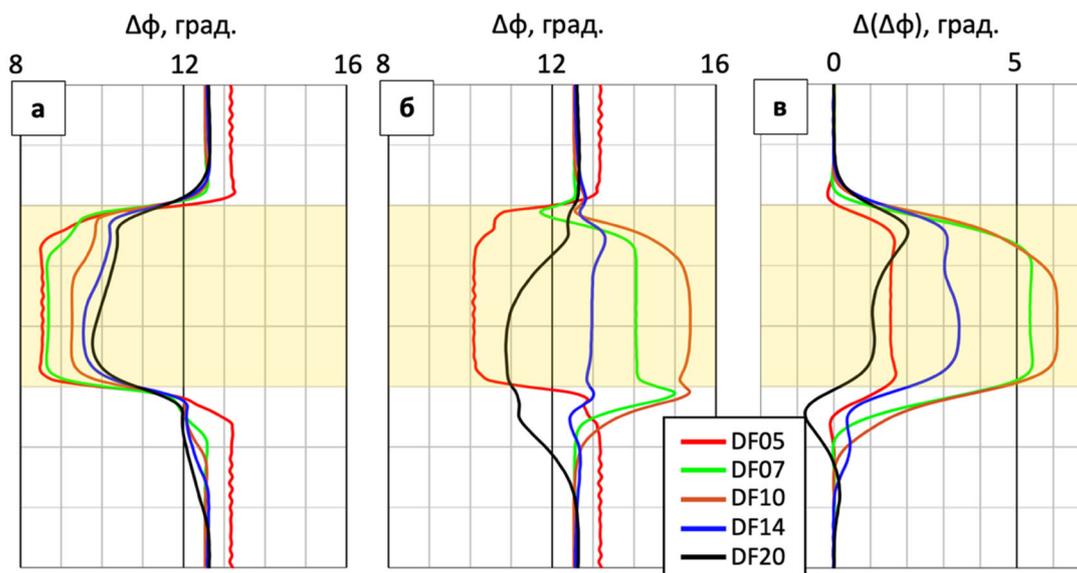


Рис. 2. Диаграммы ВИКИЗ: а) $\Delta\phi$ в модели без ОЗ; б) $\Delta\phi$ в модели с ОЗ; в) приращение $\Delta\phi$ при добавлении в модель ОЗ

Как видно на диаграмме приращения значений разности фаз ($\Delta(\Delta\phi)$), при добавлении окаймляющей зоны наибольшим образом изменяются сигналы средних зондов. Именно в области формирования сигнала зондов длиной 0.7 и 1.0 м окаймляющая зона занимает наибольшую долю по сравнению с остальными: сигнал зонда длиной 0.5 м формируется в зоне проникновения и частично в окаймляющей зоне, а области формирования сигналов зондов длиной 1.4 и 2.0 м уже захватывают неизмененную часть пласта.

На рис. 3 показаны диаграммы кажущейся удельной электрической проводимости (σ_k) зондов 5ИК, рассчитанные для модели коллектора без и с окаймляющей зоной, и диаграмма приращения σ_k при добавлении в модель ОЗ при мощности пронизываемого пласта 3 м. На диаграммах σ_k наблюдается значительное расхождение сигналов зондов разной длины во вмещающих породах, что обусловлено влиянием скин-эффекта в области высоких значений проводимости – чем длиннее зонд, тем сильнее рассчитанные для него значения σ_k занижены относительно истинной проводимости пластов. В пронизываемом пласте с зоной проникновения, характеризующейся меньшей удельной электропроводностью, чем неизмененная часть пласта, влияние скин-эффекта приводит к тому, что рассчитанные для наиболее длинного зонда IC4A значения σ_k значительно занижены относительно электропроводности неизмененной части пласта, а значения σ_k , рассчитанные для средних зондов, практически совпадают.

Добавление в модель низкоомной окаймляющей зоны приводит к заметному изменению рассчитанных сигналов 5ИК. Сигналы зондов (IC1A, IC2A; длины 0.5 и 0.85 м) в пронизываемом пласте демонстрируют такие же значения кажущейся удельной электропроводности, как и во вмещающих породах, а сигналы зонда (IC3A, 1.26 м) – повышенные значения, по сравнению с сигналами,

рассчитанными для модели без окаймляющей зоны. При этом сигналы всех трех средних зондов заметно расходятся, в отличие от сигналов в модели без ОЗ.

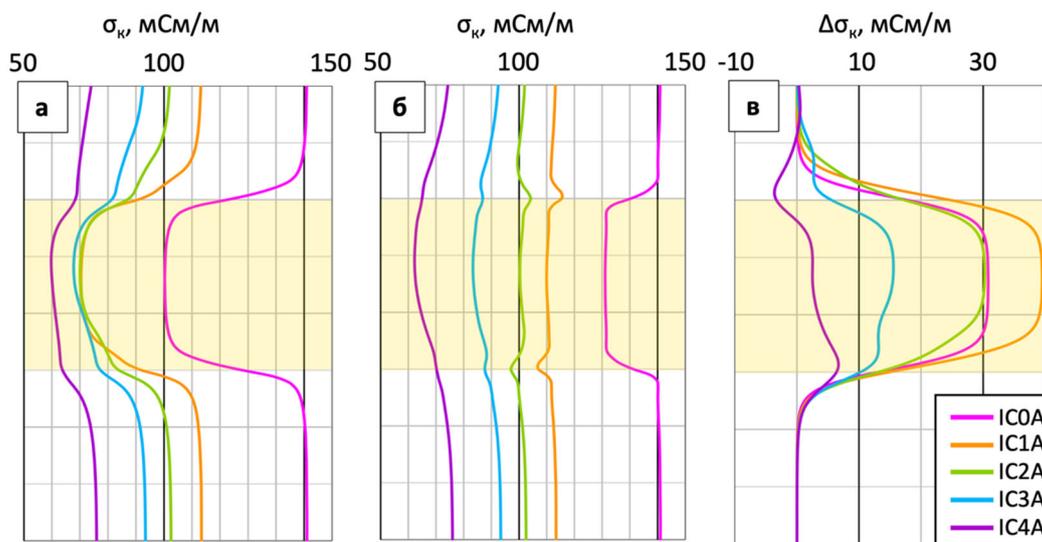


Рис. 3. Диаграммы 5ИК: а) σ_k в модели без ОЗ; б) σ_k в модели с ОЗ; в) приращение σ_k при добавлении в модель ОЗ

Влияние окаймляющей зоны на сигналы зондов 5ИК особенно заметно на диаграммах приращений $\Delta\sigma_k$. Как и в методе ВИКИЗ, наличие окаймляющей зоны наименьшим образом влияет на показания зонда наибольшей длины, и значительно более сильному влиянию ОЗ подвержены сигналы средних зондов (IC1A, IC2A, IC3A), при этом приращение кажущейся проводимости значительно превышает погрешность определения её значений, оцениваемую для рассматриваемой аппаратуры как $\pm (0.03 \times \sigma_k + 1)$ мСм/м [6].

Результаты численной инверсии практических данных 5ИК

Для оценки возможности выявления окаймляющей зоны и определения её параметров по практическим данным 5ИК в ходе исследования была проведена численная инверсия данных из скважины Имилорского месторождения. На рис. 4 представлены результаты численной инверсии, полученные для модели коллектора без окаймляющей зоны и при её наличии.

Как видно, в модели без ОЗ рассчитанные и измеренные сигналы хорошо совпадают в интервале непроницаемой покрышки, но заметно расходятся на интервале коллектора. Наибольшей абсолютной невязкой характеризуются сигналы зонда IC0A (среднее значение на интервале коллекторов составляет 17 мСм/м, в отдельных точках по глубине достигая 40 мСм/м). Среднее значение невязки по всем зондам составляет 10.5 мСм/м.

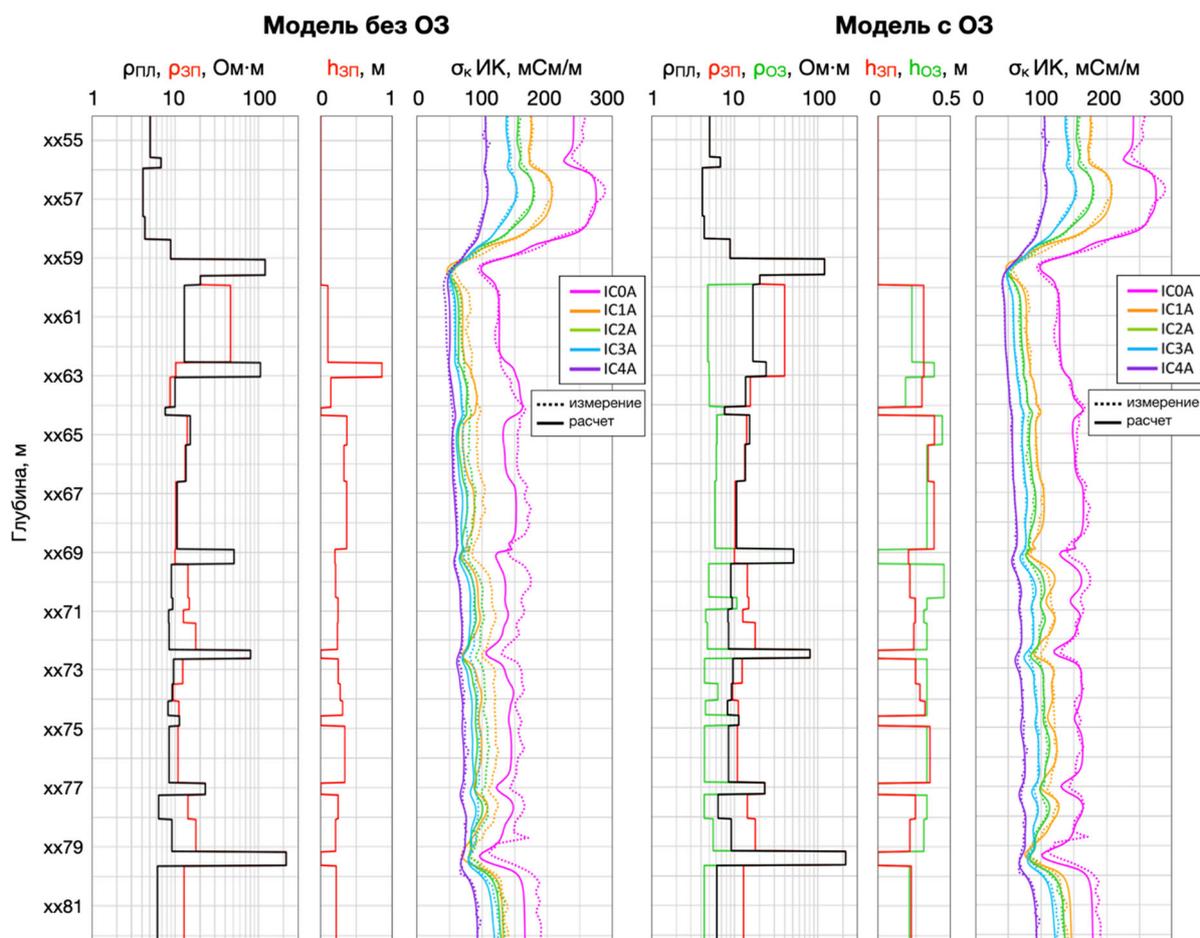


Рис. 4. Результаты численной инверсии практических данных 5ИК для модели без и с окаймляющей зоной

При добавлении в модель низкоомной окаймляющей зоны взаимное расположение сигналов существенно меняется, и рассчитанные сигналы, в особенности длинных зондов, совпадают с измеренными с практически значимой точностью: средняя абсолютная невязка сигналов зонда IC0A на интервале коллекторов составляет 6.4 мСм/м, среднее значение по всем зондам – 3.2 мСм/м.

Значения УЭС ОЗ, определяемые в проницаемых пластах при их мощности, сопоставимой с длиной средних и длинных зондов, соответствуют практическим данным и находятся в интервале 4–6 Ом·м. Определяемые значения УЭС ЗП в большинстве проницаемых пластов находятся в промежутке 10–20 Ом·м, однако могут достигать и существенно больших значений (интервал $\times\times 59,5$ – $\times\times 63$ м), что может быть проявлением низкой чувствительности зондов 5ИК к данному параметру при малой толщине ЗП.

Заключение

По результатам численного моделирования сигналов 5ИК и ВИКИЗ в типичных моделях меловых коллекторов Западной Сибири выявлено, что в рассматриваемых условиях оба метода обладают чувствительностью к окаймляю-

щей зоне. Выводы подтверждаются результатами численной инверсии практических данных 5ИК с Имилорского месторождения. Установлено, что измеренные на интервале коллектора смешанного насыщения сигналы 5ИК соответствуют интерпретационной модели, учитывающей наличие окаймляющей зоны. Однако возможность выявления окаймляющей зоны при интерпретации практических данных 5ИК существенно ограничивается низкой производительностью существующих алгоритмов инверсии. Появление инструментов эффективной инверсии практических данных многозондового индукционного каротажа с учетом окаймляющей зоны может существенно повысить информативность данного метода ГИС.

Благодарности

Исследование влияния окаймляющей зоны на сигналы многозондового индукционного каротажа выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промышленной геофизики».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ: Методическое руководство // под ред. М.И. Эпова, Ю.Н. Антонова. – Новосибирск: НИЦ ОИГТМ СО РАН, 2000. – 121 с.
2. Антонов Ю.Н., Сметанина Л.В., Михайлов И.В. Окаймляющая зона как признак подвижной нефти в терригенных коллекторах // Каротажник. – 2012. – №6. – С. 16–40.
3. 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.
4. 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: XIV Междунар. науч. конгр., 23–27 апреля 2018 г., Новосибирск, сб. материалов в 6 т. – Т. 4. – С. 90–98.
5. Петров А.М., Сухорукова К.В., Нечаев О.В. Совместная двумерная инверсия данных электрического и электромагнитного каротажных зондирований в анизотропных моделях песчано-глинистых отложений // Каротажник. – 2019. – №3 (297). – С. 85–103.
6. Рудяк Б.В., Снежко О.М., Шеин Ю.Л. Технология индукционного каротажного зондирования высокого разрешения // Каротажник. – 2013. – №3 (225). – С. 70–83.
7. Сухорукова К.В., Ананьев С.В., Петров А.М., Нечаев О.В. Сигналы многозондового индукционного и высокочастотного электромагнитного каротажа в пластах с окаймляющей зоной // Геофизические технологии. – 2022. – № 1. – С. 17–29.

© С. В. Ананьев, К. В. Сухорукова, А. М. Петров, О. В. Нечаев, 2023