

Интерактивное программное обеспечение для обработки и моделирования данных электрокаротажа нефтяных скважин в рамках двумерного подхода к интерпретации

О. О. Асанов^{1,2}, А. М. Петров^{1,2}, О. В. Нечаев^{1,2}, К. Н. Даниловский^{1,2}*

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² АО «Сибирский научно-исследовательский институт геологии,
геофизики и минерального сырья», г. Новосибирск, Российская Федерация

* e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Электрокаротаж повсеместно используется для выделения пород-коллекторов и оценки их нефтеперспективности. Однако интегральный характер отклика породы на возбуждаемое каротажным прибором поле приводит к тому, что на сигнал прибора напротив целевого пласта оказывают влияние скважина, заполненная буровым раствором, перекрывающие отложения, фильтрация в пласт раствора и др. Распространённые сегодня методики интерпретации данных электрокаротажа основываются на чрезмерных упрощениях, что в сложных условиях приводит к ошибкам в определении коэффициента нефтенасыщенности целевых пластов, затратам на испытания заведомо водонасыщенных интервалов и пропуску потенциально перспективных коллекторов. В работе представлены результаты разработки нового интерактивного программного обеспечения для работы с данными геофизических исследований в скважинах и геоэлектрической моделью среды, ориентированное на двумерный подход к интерпретации данных электрокаротажа. Использование двумерной осесимметричной геоэлектрической модели среды в качестве базовой позволяет корректно учитывать перечисленные выше факторы при интерпретации практических данных. Оригинальная реализация взаимодействия пользователя с геоэлектрической моделью околоскважинного пространства учитывает особенности двумерного подхода к интерпретации данных электрокаротажа и обеспечивает удобство работы с многопластовыми моделями. Интегрированный с программным обеспечением вычислительный сервер AlondraCore поддерживает моделирование данных электрокаротажа с использованием двух типов решателей прямых задач: высокоточных конечноэлементных и быстрых нейросетевых. Первые обеспечивают высокую точность расчета каротажных сигналов с возможностью настройки параметров зондов, а последние – оперативность моделирования сигналов распространенных конфигураций приборов.

Ключевые слова: нефтяные коллекторы, геофизические исследования скважин, электрокаротаж, программное обеспечение интерпретации, геоэлектрические модели, численное моделирование, искусственные нейронные сети, нейросетевое моделирование

Interactive software for processing and modeling oil well resistivity logs as part of a two-dimensional interpretation approach

O. O. Asanov^{1,2}, A. M. Petrov^{1,2}, O. V. Nechaev^{1,2}, K. N. Danilovskiy^{1,2}*

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

² JSC «Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials»,
Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

Abstract. Resistivity well logging is widely used to identify reservoir rocks and evaluate their oil potential. However, the integral nature of the rock response to the field excited by the logging tool leads to the fact that the tool signal opposite the target formation is influenced by a well filled with drilling fluid, overlying sediments, drilling fluid filtrate invasion into the formation, etc. Today's widespread methods of resistivity logs interpretation are based on excessive simplifications, which in complex conditions leads to errors in determining the oil saturation coefficient of the target reservoir, costs of testing water-saturated intervals and missing the potentially promising reservoirs. The paper presents the results of developing new interactive software for working with well logging data and geoelectric model of the environment, focused on a 2D approach to interpreting resistivity logs. The use of a 2D axisymmetric geoelectric model of the medium as a base allows one to correctly take into account the above factors when interpreting practical data. Original realization of user interaction with geoelectric model of near-wellbore space takes into account the features of 2D approach to resistivity logs interpretation and provides convenience of work with multilayer models. The computing server AlondraCore integrated with the software supports resistivity logs simulation using two types of forward problem solvers: high-precision finite-element and fast neural network-based ones. The finite-element algorithms provide high log simulation accuracy with the ability to adjust the tool parameters. On the other hand, the neural network-based algorithms provide fast solution of forward problems for common logging tools.

Keywords: oil reservoirs, well logging, resistivity logging, interpretation software, geoelectric models, numerical simulation, artificial neural networks, neural net-based simulation

Введение

Оценка пластовых значений удельного электрического сопротивления (УЭС) по данным российских зондирующих электрокаротажных методов традиционно производится с использованием одномерной радиально-слоистой модели. Подход полностью оправдан при исследовании мощных коллекторов, однако при уменьшении мощности продуктивных слоев погрешности определения пластовых характеристик резко возрастают.

Решением этой проблемы является применение моделирования и инверсии сигналов на базе двумерных осесимметричных геоэлектрических моделей. Такой подход широко используется ведущими зарубежными нефтесервисными компаниями для обработки данных, измеренных на интервалах переслаивания. При двумерном моделировании учитывается влияние вмещающих пород на каждое каротажное измерение, что позволяет гораздо более точно оценивать свойства тонких пластов, чем при использовании традиционного подхода, так как анализируется не средний уровень сигналов на интервале пласта, а их изменение вдоль ствола скважины [1].

На сегодняшний день применение двумерного подхода к интерпретации данных электрокаротажа ограничивается высокими требованиями алгоритмов моделирования и инверсии к производительности вычислительных устройств, а также отсутствием развитого интерпретационного инструментария, необходимого для трансформации научно-исследовательских прототипов в технологические решения.

В работе представлены результаты разработки нового интерактивного программного обеспечения (ПО) для работы с данными геофизических исследований в скважинах (ГИС) и геоэлектрической моделью среды, ориентированное на

двумерный подход к интерпретации данных электрокаротажа. Интеграция с алгоритмами моделирования и инверсии комплекса AlondraWL [2] обеспечивает возможность совместной интерпретации данных различных методов электрокаротажа с построением высокоразрешенных моделей сложнопостроенных отложений. Помимо интерпретации практических данных, разработанное ПО предоставляет широкие возможности для проведения численных экспериментов, необходимых для изучения поведения сигналов приборов в различных геоэлектрических условиях, обоснования оптимального комплекса электрометрических измерений и т.д.

Концептуально разработанное ПО выполнено в виде двух блоков: интерактивного приложения-клиента и вычислительного сервера AlondraCore.

Пользовательское приложение (клиент)

В процессе работы интерпретатор взаимодействует с графическим интерфейсом приложения. Приложение реализовано на языке программирования (ЯП) C# с использованием платформы Windows Presentation Foundation (WPF) с аппаратным ускорением графики на GPU, что позволяет обеспечить высокий уровень интерактивности.

В приложении-клиенте реализованы базовые функции для работы с данными ГИС, необходимые для интерпретации: создание/удаление, импорт/экспорт, копирование, редактирование, систематизация, увязка, коррекция, трансформация, визуализация и др. Помимо базовых функций, в ПО реализованы специализированные инструменты для работы с двумерными геоэлектрическими моделями среды, моделирования данных электрокаротажа, подготовки данных для инверсии.

На рис. 1 показан основной элемент интерфейса ПО: интерактивный планшет ГИС, визуализирующий практические данные, а также построенную по ним геоэлектрическую модель среды.

Важнейшей отличительной особенностью реализуемого ПО, в сравнении с решениями, реализованными в распространенных петрофизических комплексах [3-5], является ориентированность на двумерный подход. Наглядно её можно продемонстрировать на примере реализации взаимодействия пользователя с геоэлектрической моделью околоскважинного пространства.

Традиционный подход к интерпретации данных ГИС подразумевает рассмотрение каждого пласта-коллектора изолированно. Двумерный подход, напротив, требует построения модели пачки пластов на интервале глубин не только с выделением пластов-коллекторов, но и с детальным расчленением вмещающих их пород. При этом модель пачки не должна содержать “разрывов” – интервалов глубин, не охарактеризованных электрофизическими свойствами. Эти особенности в совокупности с необходимостью одновременной работы с десятками пластов требуют реализации взаимодействия с моделью среды, принципиально отличающегося от традиционного.

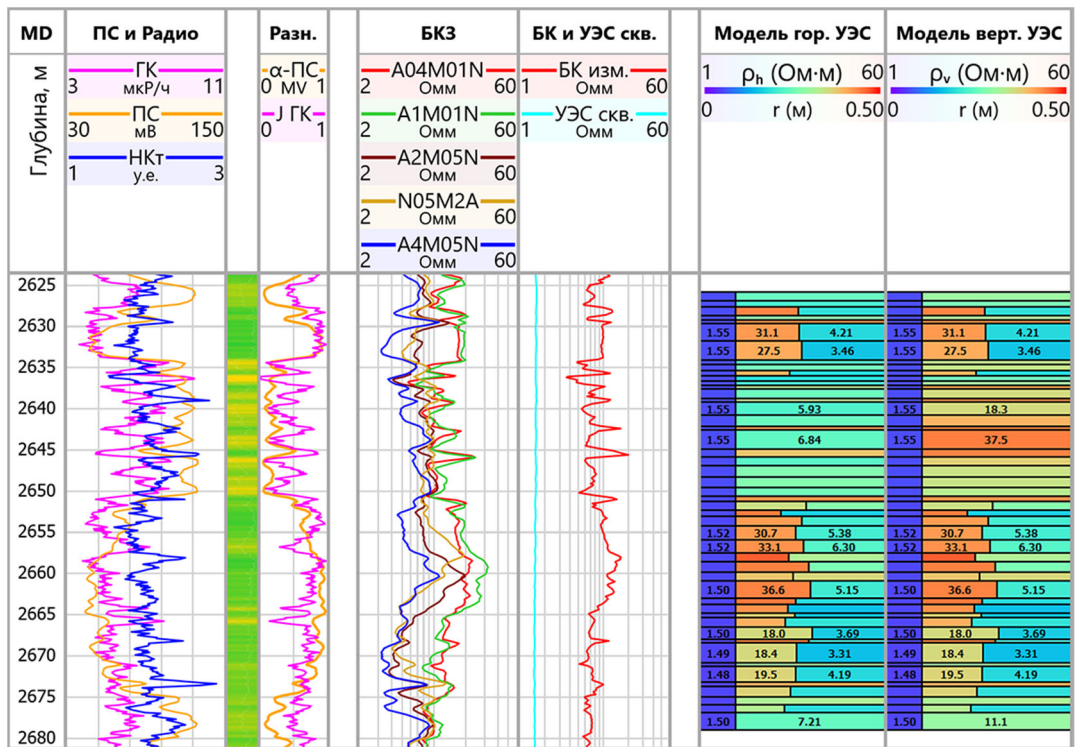


Рис. 1. Интерактивный планшет ГИС

В разрабатываемом ПО геоэлектрическая модель представляется в виде набора специальных треков, каждый из которых визуализирует одно электрофизическое свойство (горизонтальное УЭС, вертикальное УЭС или диэлектрическую проницаемость). Обязательным является задание только горизонтального УЭС, благодаря чему модель среды может быть настроена для работы с измерениями на постоянном и/или переменном токе с опциональным учетом диэлектрической проницаемости и анизотропии УЭС. Количество пластов в модели и блоков (радиальных зон) в каждом из них не ограничено.

Модель среды является интерактивной с возможностью перемещения границ, добавления, редактирования и удаления блоков среды при взаимодействии с ними мышью. Положения геоэлектрических границ на всех треках синхронизированы. Для учета описанных выше особенностей двумерного подхода модель среды на интервале глубин представляется в виде “неразрывного полотна”: в процессе редактирования блоки можно разделять горизонтальными границами с образованием новых блоков и пластов (рис. 2).

Удаление радиальных зон и пластов реализовано в рамках представления о том, что блоки среды бесконечно малого объема являются незначимыми. Сближение двух границ вплотную приводит к их слиянию с удалением из модели радиальной зоны нулевой ширины или пласта нулевой толщины. Аналогичным образом такой подход позволяет заполнять разрывы при объединении двух интервалов модели в один (рис. 3).

Описанный подход обеспечивает возможность быстрого создания и редактирования двумерных радиально-слоистых моделей среды на этапе подготовки

данных к инверсии или в процессе вычислительных экспериментов на основе прямого моделирования.

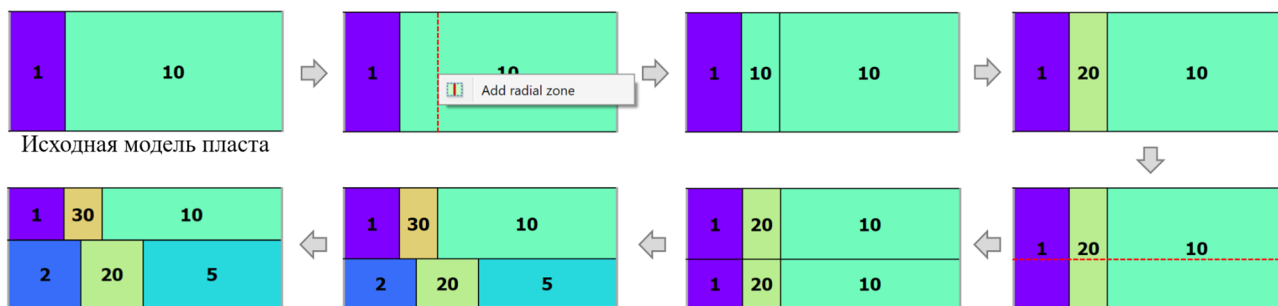


Рис. 2. Процесс редактирования геоэлектрической модели среды

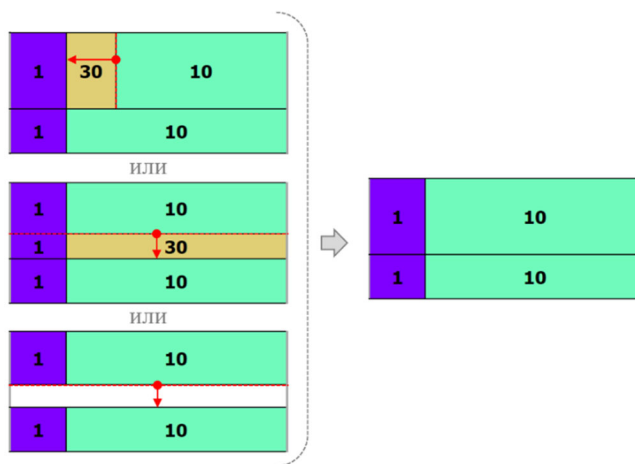


Рис. 3. Принцип удаления блоков, пластов и разрывов в модели среды

Вычислительный сервер AlondraCore

Вычислительный сервер AlondraCore предоставляет возможности расчета синтетических сигналов различных электрометрических методов ГИС в двумерных осесимметричных моделях среды. Основой алгоритмического комплекса являются конечноэлементные алгоритмы моделирования данных высокочастотного электромагнитного (ВЭМКЗ) и бокового (БКЗ) каротажных зондирований, фокусированного бокового (БК) и низкочастотного индукционного (ИК) каротажей [6, 7]. Все конечноэлементные алгоритмы реализованы на ЯП С++ с поддержкой параллельных вычислений. Возможность настройки параметров электрокаротажных зондов, таких как расстояние между электродами / катушками, частота генерируемого тока и др., позволяет моделировать сигналы без привязки к конкретным аппаратным реализациям методов.

Помимо численных решателей для наиболее распространенных приборов электрокаротажа доступны быстрые приближенные алгоритмы моделирования сигналов на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). Алгоритмы реализованы на ЯП Python с использованием платформы глубокого обучения TensorFlow. По сравнению с численными аналогами нейросетевые алгоритмы

характеризуются до нескольких тысяч раз более высокой производительностью при незначительной потере точности вычислений [8].

В ПО реализована возможность оперативного добавления новых приборов, на данный момент поддерживается моделирование сигналов более 40 зондов различных электрокаротажных методов. На рис. 4 представлены окна настройки параметров и выбора электрокаротажных зондов для моделирования.

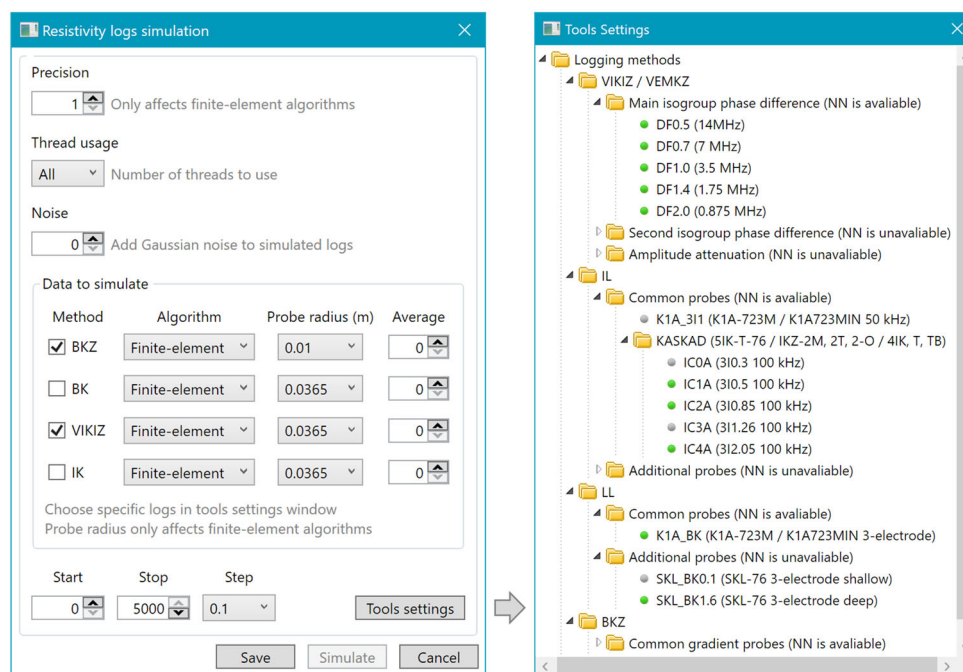


Рис. 4. Слева – окно с настройками моделирования сигналов электрокаротажа, справа – окно выбора зондов, сигналы которых требуется рассчитать

Заключение

Разрабатывается новое ПО для интерпретации данных электрокаротажа, отличительной особенностью которого, по сравнению с распространенными петрофизическими комплексами, является ориентированность на двумерный подход к интерпретации. Оригинальный подход к взаимодействию пользователя с геоэлектрической моделью околоскважинного пространства обеспечивает возможность быстрого создания и редактирования двумерных радиально-слоистых моделей среды на этапе подготовки данных к инверсии или в процессе вычислительных экспериментов.

Интегрированный с ПО вычислительный сервер AlondraCore поддерживает моделирование данных электрокаротажа с использованием двух типов решателей прямых задач: высокоточных конечноэлементных и быстрых нейросетевых. Первые обеспечивают высокую точность расчета каротажных сигналов с возможностью настройки параметров зондов, а последние – оперативность моделирования сигналов распространенных конфигураций приборов.

Дальнейшее развитие разрабатываемого ПО связано, в первую очередь, с реализацией интерактивных пользовательских инструментов для взаимодей-

ствия с алгоритмами решения обратных задач комплекса AlondraWL, а также с расширением списка поддерживаемых электрокаротажных приборов.

Благодарности

Высокоточные алгоритмы моделирования сигналов электрокаротажа разработаны при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промышленной геофизики».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. 9-13 сентября 2019 г., Геленджик. 4 с. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.201950044>, свободный. – (дата обращения: 01.04.22).

2. 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 [Электронный ресурс] // Геодинамика и тектонофизика: Электронный журнал. – 2021. – Т. 12. – №3S. – С. 35-38. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.5800/GT-2021-12-3s-0546>, свободный. – (дата обращения: 01.04.22).

3. Ремеев И.С. Решения программы Прайм для обработки, анализа и хранения данных ГИС // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. – 2010. – № 2. – С. 54-62.

4. Программный пакет "Геопоиск 9" для комплексной интерпретации данных геофизического исследования скважин ("ГеоПоиск 9"): свид. о гос. регистрации пр. для ЭВМ № 2016615422. Колкер И.Д. [и др.]; заявл. 25.03.2016; опубл. 24.05.2016, 1 с.

5. Сердюк К.С., Урамаев М.Ш., Михайлов И.В. Программная библиотека Emfcore количественной интерпретации данных электротометрических измерений в скважинах // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: IX Международный научный конгресс (г. Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 3 т. – СГУГиТ – Новосибирск, 2013. – Т. 2. – С. 83-89.

6. 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 Международный научный конгресс (г. Новосибирск, 23-27 апреля 2018 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 6 т. – СГУГиТ – Новосибирск, 2018 – Т. 4. – С. 90-98.

7. Глинских В.Н., Дудаев А.Р., Нечаев О.В. Высокопроизводительные гетерогенные вычисления CPU - GPU в задаче электрического каротажа нефтегазовых скважин // Вычислительные технологии. – 2017. – Т. 22. – № 3. – С. 16-31.

8. Петров А.М., Даниловский К.Н., Сухорукова К.В., Леоненко А.Р., Лапковская А.А. Нейросетевой подход к экспресс-моделированию сигналов электрокаротажа в реалистичных моделях сложнопостроенных терригенных отложений // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – № 4 (48). – С. 70-78.

© О. О. Асанов, А. М. Петров, О. В. Нечаев, К. Н. Даниловский, 2022