

И. В. Суродина^{1,2✉}, К. В. Сухорукова¹

Трёхмерное конечно-разностное моделирование микрозондов без фокусировки тока

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

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Аннотация. Работа посвящена прямому моделированию показаний микрозондов каротажа в произвольной трёхмерной изотропной среде. В частности, рассматриваются зонды без фокусировки тока - микроградиент зонд (МГЗ) и микропотенциал зонд (МПЗ). На основе конечно-разностного метода был создан алгоритм и написана программа, позволяющая моделировать кажущееся сопротивление МГЗ и МПЗ в изотропных средах. Проведено тестирование и верификация программы. Представлены результаты расчетов для реалистичных моделей.

Ключевые слова: конечно-разностное моделирование, микрокаротаж, уравнение Пуассона

I. V. Surodina^{1,2✉}, K. V. Suhorukova¹

Three-dimensional finite-difference simulation of microprobes without current focusing

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

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS,
Russian Federation
e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

Abstract. The work is devoted to direct simulation of micrologging in an arbitrary three-dimensional isotropic medium. In particular, probes without current focusing are considered - microgradient probe and micropotential probe. Based on the finite-difference method, an algorithm was created and a program was written that allows modeling the apparent resistivity of MGP and MPP in isotropic media. The program was tested and verified. The results of calculations for realistic models are presented.

Keywords: finite different simulation, micrologging, Poisson equation

Введение

Метод электрического микрозондирования – гальванический микрокаротаж – предназначен для исследования удельного электрического сопротивления (УЭС) породы в нескольких сантиметрах от стенки скважины. Микрозонды по своей конфигурации делятся на обычные и фокусирующие. К первым относятся микроградиент и микропотенциал зонды, ко вторым – несколько разновидностей зондов бокового каротажа.

Электроды микроградиент и микропотенциал зондов (МГЗ и МПЗ) расположены в изоляционном материале внешней части прижимной площадки. Прижатие микрозонда к стенке скважины обеспечивается рессорным или рычажным устройством [1].

Традиционно каротаж МГЗ и МПЗ применяется для автоматизированного выделения в разрезе проницаемых интервалов – потенциальных коллекторов нефти и газа. При бурении с применением водно-глинистого бурового раствора на стенке скважины в интервале проницаемой породы формируется глинистая корка. В результате процесса фильтрации в поровое пространство породы бурового раствора на стенке скважины оседают глинистые частицы, и нарастает фильтрационная корка – плотный глинистый слой небольшой толщины (до 1.5–2.0 см) с сопротивлением, близким к УЭС бурового раствора, но существенно меньшим, чем УЭС пласта. Из-за небольшой толщины этого прослоя его влияние не сказывается на сигналах глубинных зондов электрокаротажа, но приводит к характерному соотношению сигналов МГЗ и МПЗ: если кажущееся сопротивление МПЗ больше, чем МГЗ, то это признак наличия глинистой корки и соответственно проницаемости пласта – потенциального коллектора углеводородов. По этому соотношению в программных комплексах для обработки данных каротажа автоматически выделяют интервалы коллекторов.

Другим, не менее важным аспектом, повышающим интерес к микрокаротажу, остается сложность решения обратной задачи фильтрации бурового раствора в коллектор. Фильтрат отличается по электропроводности от нефти и пластовой воды, поэтому в пористой среде формируется специфическое радиальное распределение электропроводности, зависящее как от параметров бурения, так и от фильтрационно-емкостных свойств и исходного соотношения пластовых флюидов. Радиальное распределение оценивается по данным больших зондов электрокаротажа, но для решения обратной фильтрационной задачи также важно знать значение УЭС на ближних к скважине сантиметрах породы. Для этого и поставлена задача создания программных средств моделирования сигналов электрических микрозондов.

Прямая трёхмерная задача электрического микрокаротажа

Метод микрозондирования заключается в детальном исследовании кажущегося сопротивления прискважинной части разреза зондами очень малой длины. Зондовая установка представляет собой "башмак", на внешней изолирующей стороне которого установлены три точечных электрода на расстоянии 2.5 см друг от друга [2]. Они образуют два зонда: микроградиент зонд (МГЗ) А0.025М0.025N и микропотенциал зонд (МПЗ) А0.05М, у которого электродом N служит корпус прибора (рис. 1). Башмак экранирует микрозонд от пластовой жидкости и тем самым снижает влияние скважины на результаты измерений.

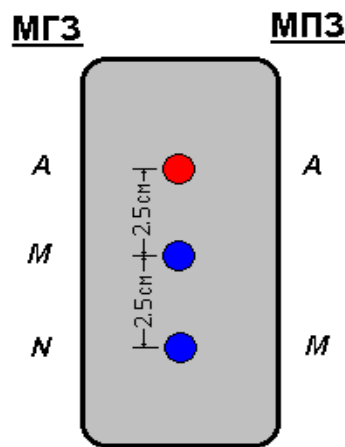


Рис. 1 Схема зондовой установки МГЗ и МПЗ

Задача моделирования МГЗ и МПЗ сводится к моделированию потенциала Φ точечного источника A постоянного тока в среде с заданным распределением электропроводности $\sigma(x, y, z) = 1/\rho(x, y, z)$. Кривизной поверхности скважины в виду малости размеров зонда можно пренебречь: считаем плоской границу раздела сред "скважина – горная порода".

Для определенности расположим источник A в начале координат, а приемники (измерительные электроды) M, N вдоль оси Y . Ось Z направим перпендикулярно оси скважины. Задачу для потенциала будем решать, выделяя известное решение для потенциала в однородной среде. Представим потенциал электрического поля $U = U^0 + U^a$, где $U^0 = \rho_0 I / 4\pi R$ – потенциал точечного источника в однородной среде с сопротивлением ρ_0 на расстоянии R , I – сила тока, U^a – аномальный потенциал.

В декартовой системе координат уравнение для Φ^a примет вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial U^a}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial U^a}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial U^a}{\partial z} \right) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left((\sigma - \sigma_0) \frac{\partial U^0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left((\sigma - \sigma_0) \frac{\partial U^0}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((\sigma - \sigma_0) \frac{\partial U^0}{\partial z} \right) \quad (1)$$

При удалении от источника потенциал затухает как $1/R$, поэтому вдали от источников ($x = \pm X, y = \pm Y, z = \pm Z$) для функции U^a справедливы предельные значения:

$$U^a|_{x=\pm X} = 0, \quad U^a|_{y=\pm Y} = 0, \quad U^a|_{z=\pm Z} = 0. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) определяют задачу Дирихле для одного точечного источника. Для дискретизации данной задачи используем консервативную разностную схему [3]. Полученную систему линейных алгебраических уравнений приводим к симметричному виду с помощью диагонального преобразования подобия, далее нормируем матрицу так, чтобы её диагональные элементы стали

единичными. Эта подготовительная работа с матрицей не занимает много времени, но позволяет существенно сократить ресурсы для памяти на графическом процессоре (GPU) и в итоге получить быстрое решение задачи. Подробно этот подход описан в работе [4].

Тестирование и отладка программы моделирования сигналов МГЗ и МПЗ проходили в три этапа.

Этап 1: Проверка принципа взаимности. Одним из возможных методов тестирования программ моделирования электромагнитных полей служит проверка выполнения так называемого принципа взаимности. В данной задаче принцип взаимности проявляется в неизменности значения потенциала при смене положений источника и приемника поля. Серия вычислительных экспериментов показала, что значения потенциала остаются неизменными с погрешностью в 1–2%. Расчёты проведены на видеокарте K40 кластера НКС30Т+GPU ССКЦ СО РАН.

Этап 2: Сравнение с программой для точечного источника, находящегося на поверхности горизонтально-слоистой среды с непроводящим верхним полупространством. Тестирование проводилось для тонких сильно контрастных слоев. В процессе сравнительного моделирования построена итоговая сетка, на которой вычисленный потенциал совпал с тестовыми значениями с погрешностью 2–3 %.

Этап 3: Вычисление кажущегося сопротивления. Для МГЗ кажущееся сопротивление считается через разность потенциалов в точках М и N и коэффициент зонда. Для МПЗ дополнительно вычисляется потенциал в удалённой точке и затем берётся разность потенциалов. Коэффициент зонда на практике вычисляется экспериментально. Следуя [5], он был взят равным 0.5. Местоположение удалённой точки определено из ряда экспериментальных вычислений, поскольку сам корпус прибора не моделируется.

Результаты

В тестовых расчётах башмак моделировался как металлическая прямоугольная пластина 0.1 x 0.2 м и толщиной 0.005 м. Под башмаком располагался изоляционный слой толщиной 0.002 м, под изоляционным слоем – сама установка А0.025М0.025N. В программе предусмотрена возможность изменения как размеров башмака и изоляционного слоя, так и их сопротивлений.

Проведена серия расчетов для двухслойных моделей: 3 и 10 Ом·м и 3 и 20 Ом·м. Для этих моделей увеличивалась толщина слоя с УЭС 3 Ом·м, находящегося под прибором и моделирующего зону проникновения (ЗП), начиная от 0.001 до 0.2 м. На рисунках 2а (2б) приведены значения потенциалов на измерительных электродах в зависимости от толщины ЗП (от расстояния от прибора до удаляющегося слоя с УЭС 10 Ом м (20 Ом м)). Также на рисунках приведены значения разности потенциалов МГЗ.

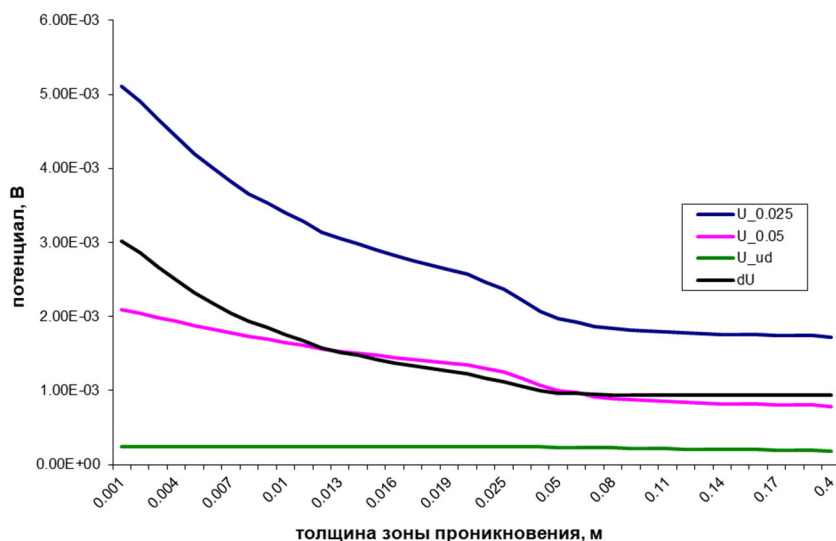


Рис. 2а. Значение потенциала (В) на измерительных электродах в зависимости от толщины ЗП (м). Модель: а) УЭС ЗП 3 Ом·м, УЭС пласта 10 Ом·м

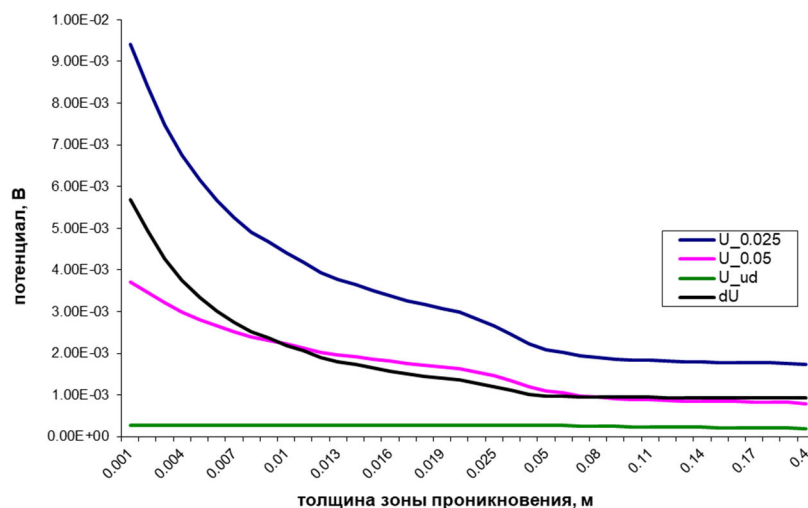


Рис. 2б. Значение потенциала (В) на измерительных электродах в зависимости от толщины ЗП (м). Модель б) УЭС ЗП 3 Ом·м, УЭС пласта 20 Ом·м

При толщине ЗП около 4 см для обеих моделей (рис. 2а и 2б) разность потенциалов МГЗ (dU) выходит на асимптоту. Это согласуется с ранее известными оценками, что глубинность исследования МГЗ составляет 4 см [6] (Doll, 1950). Потенциал на удаленном электроде (U_{ud}) меняется довольно слабо по сравнению с электродами М ($U_{0.025}$) и N ($U_{0.05}$).

На рисунках 3а–б показано кажущееся сопротивление для этих же моделей для зондов МГЗ и МПЗ. По кажущемуся сопротивлению видно, что глубинность МПЗ больше, чем МГЗ – выход на асимптоту у МПЗ наступает на 11 см, а у МГЗ – на 4 см. Это также согласуется с данными Долля [6].

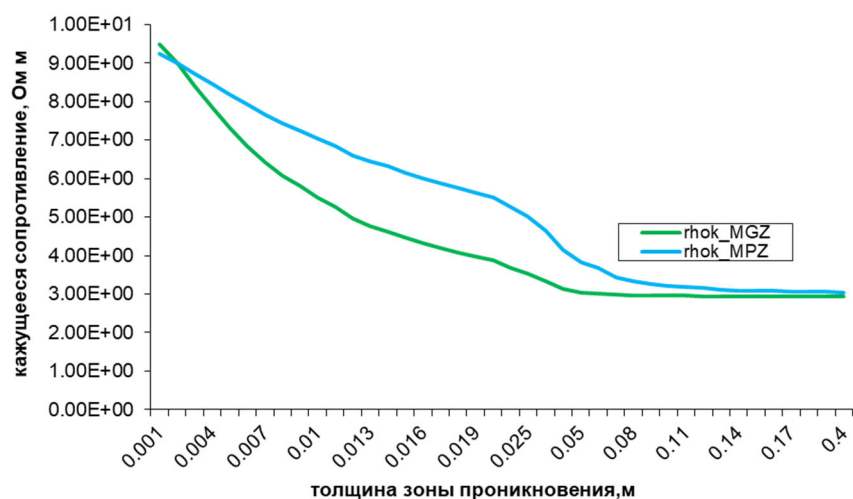


Рис. 3а. Значение кажущегося сопротивления ρ_{hok} (Ом·м) в зависимости от толщины ЗП (м). Модель: а) УЭС ЗП 3 Ом·м, УЭС пласта 10 Ом·м

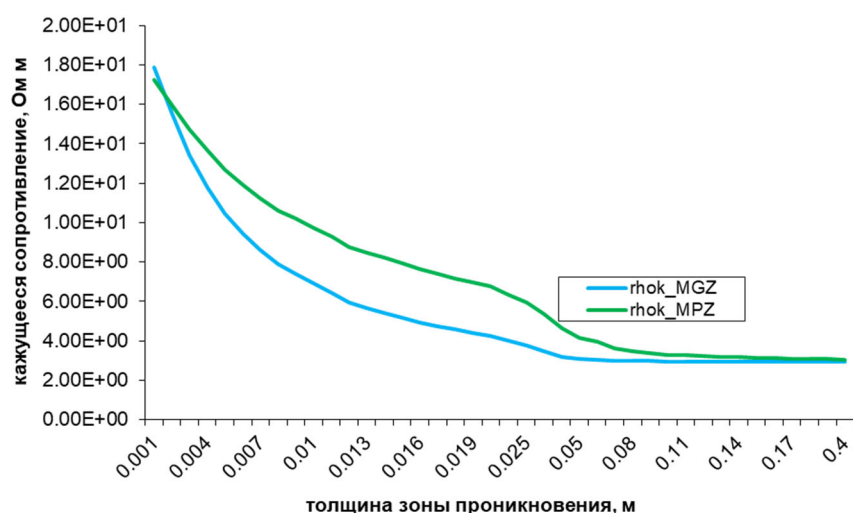


Рис. 3б. Значение кажущегося сопротивления ρ_{hok} (Ом·м) в зависимости от толщины ЗП (м). Модель: б) УЭС ЗП 3 Ом·м, УЭС пласта 20 Ом·м

В однородной среде с УЭС 1–300 Ом·м сигналы обоих зондов с достаточной точностью соответствуют требуемым уровням (рис. 4а). Модель на рис. 4б описывает ситуацию нефтенасыщенного коллектора, бурение которого велось на минерализованном полимерном растворе, вследствие чего в прискважинной области в пластовой воде повысилась минерализация (из-за диффузии ионов из бурового раствора через полимерную пленку). В этом случае выход на асимптоту сигнала МГЗ происходит при толщине измененной зоны около 7 см, а МПЗ – около 20 см. Отличие от случая менее контрастной модели на рис. 3б свидетельствует о необходимости численного анализа сигналов электрических микрозондов в каждом практически важном случае.

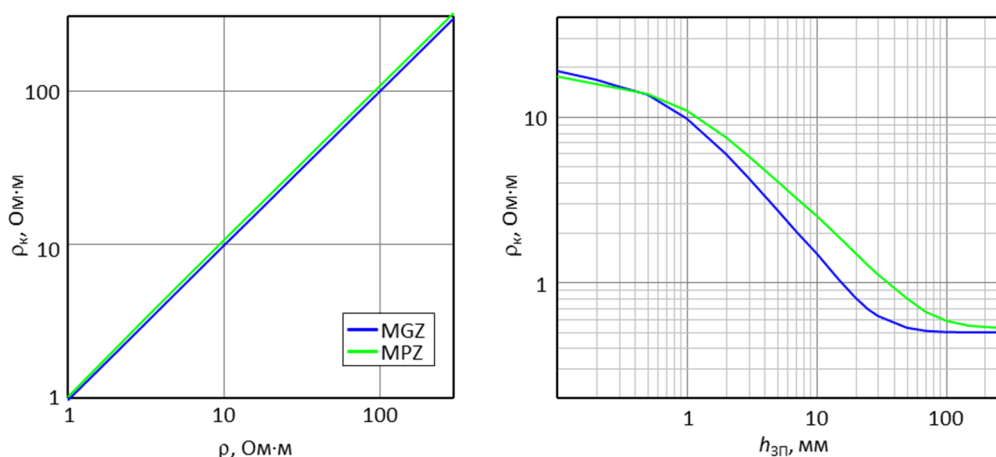


Рис. 4. Значение кажущегося сопротивления ($\Omega \cdot \text{м}$) в зависимости от толщины ЗП (м). Модель: а) однородное пространство;
б) УЭС ЗП $0.5 \Omega \cdot \text{м}$, УЭС пласта $20 \Omega \cdot \text{м}$

Заключение

Создан алгоритм и написана программа для быстрого прямого моделирования показаний микрозондов. Проведено тщательное тестирование и верификация полученных результатов.

Благодарности

Исследования выполнены по проекту ПФНИ № FWZZ2022-0026.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <https://rosprombur.ru/mikrokarotazh-skvezhin.html>
2. Померанц Л.И., Бондаренко М.Т. Геофизические методы исследования нефтяных и газовых скважин - М.: Недра, 1981 г. – 376 с.
3. Самарский А.А. Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. – 655 с.
4. Суродин И.В. Параллельные алгоритмы для решения прямых задач электрического каротажа на графических процессорах // Математические заметки СВФУ. – 2015. – Т. 22. – № 2. – С. 51-61.
5. Чаадаев Е.В. Теория электрического и электромагнитного каротажа – Калинин: Союзпромгеофизика, 1989. – 445 с.
6. Doll, H.G. The Microlog. Trans. AIME. – 1950. – Vol. 189. – P. 17–32.

© И. В. Суродин, К. В. Сухорукова, 2025