На правах рукописи



ГЛИНСКИХ Анастасия Вячеславовна

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ САМОПРОИЗВОЛЬНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И АППРОКСИМАЦИИ СИГМОИДАЛЬНЫМИ ФУНКЦИЯМИ

1.6.9 – геофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск
2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).

Научный руководитель:

Эпов Михаил Иванович, академик РАН, профессор, доктор технических наук, научный руководитель ИНГГ СО РАН, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН.

Официальные оппоненты:

Акимова Елена Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела некорректных задач анализа и приложений Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук (ИММ УрО РАН, г. Екатеринбург);

Дашевский Юлий Александрович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования геофизических процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тюменский индустриальный университет» (ФГБОУ ВО «ТИУ», г. Тюмень).

Защита состоится 25 декабря 2026 г. в 15 час. на заседании диссертационного совета 24.1.087.02, созданного на базе ИНГГ СО РАН, в большом конференц-зале главного корпуса по адресу:

г. Новосибирск, Проспект Академика Коптюга, д. 3.

Отзыв в одном экземпляре, оформленный в соответствии с требованиями Минобрнауки России, просим направлять по адресу:

630090, г. Новосибирск, Проспект Академика Коптюга, д. 3;

e-mail: MelnikEA@ipgg.sbras.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ИНГГ СО РАН:

http://www.ipgg.sbras.ru/dissertations/glinskikh2026/dis-Glinskikh.pdf

Автореферат разослан 30 октября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.087.02, д.г.-м.н. Мельник Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – численные решения прямых и приближенные аналитические решения обратных задач стационарной геоэлектродинамики в осесимметричных моделях геологических сред применительно к задачам каротажа потенциалов самопроизвольной поляризации для экспресс-оценок содержания углеводородов и минерализации пластовых вод, а также количественного определения петрофизических параметров песчано-глинистых коллекторов, вскрытых нефтегазовыми скважинами.

Актуальность. Метод потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС) является одним из основных инструментов геофизических исследований в скважинах (ГИС) и широко применяется при изучении геологических разрезов нефтегазовых залежей. Каротаж ПС входит в предусмотренный нормативными документами обязательный комплекс ГИС, что обусловлено простотой регистрации сигналов и их высокой информативностью при оценке фильтрационно-ёмкостных свойств флюидонасыщенных пластов-коллекторов и выделении глинистых флюидоупоров. Традиционно метод ПС применяется для литологического расчленения разрезов, идентификации флюидонасыщенных пластов и количественной оценки их коллекторских свойств, главным образом песчанистости/глинистости и пористости, а также для определения минерализации пластовой воды. Таким образом, несмотря на создание новых методов ГИС каротаж ПС по-прежнему является одним из базовых при подсчёте запасов углеводородов.

С развитием вычислительной техники важнейшей задачей в области ГИС, в том числе каротажа ПС, стала разработка эффективных численных алгоритмов для моделирования и инверсии сигналов. Современные численные методы значительно понижают погрешности моделирования ПС и увеличивают скорость обработки сигналов, что особенно важно при работе с большими объёмами информации и в сложных геологических ситуациях.

Кроме того, разработка эффективных численных алгоритмов решения прямых и обратных задач каротажа (включая ПС) открывает новые возможности для поиска пропущенных нефтесодержащих интервалов путём переинтерпретации архивных материалов. Это направление особенно актуально для метода ПС, поскольку на

месторождениях, находящихся на поздней стадии разработки, данные ПС являются одними из немногих широкодоступных.

В настоящее время основной вектор исследований ПС направлен на создание количественных физико-математических описаний диаграмм ПС и привлечение новых численных подходов к решению соответствующих прямых и обратных задач в полных математических постановках. Это направление активно развивается благодаря междисциплинарным исследованиям, объединяющим знания в области физики пористых сред, геологии, гидрогеологии, электрохимии и вычислительной математики. Интеграция этих знаний позволяет не только улучшать методы интерпретации каротажных данных, но и создавать более точные и надёжные модели, способные учитывать реальную сложность геологической среды.

Цель исследования – развитие программно-алгоритмической базы метода ПС для количественного изучения характеристик песчано-глинистых коллекторов в сложнопостроенных терригенных разрезах путём создания эффективных вычислительных подходов к моделированию и интерпретации сигналов ПС.

Научные задачи

1. Разработать и программно реализовать алгоритм численного моделирования сигналов ПС в осесимметричных моделях геологических сред методом конечных элементов, обеспечивающий учёт геоэлектрического строения прискважинной области с заданным числом радиальных зон, а также петрофизических свойств песчано-глинистых коллекторов, включая содержание и тип глинистых минералов; выполнить его верификацию и апробацию на синтетических и практических каротажных данных.

2. Разработать и программно реализовать метод количественной инверсии диаграмм ПС на основе их аналитической аппроксимации с учётом геоэлектрических условий прискважинной области; обосновать его применимость для приближённого экспресс-определения минерализации пластовой воды на синтетических и практических каротажных данных.

Методы исследований и фактический материал

Основным методом исследования сигналов ПС является численное моделирование в осесимметричных моделях геологических сред. Прямая задача формулируется на основе уравнения Пуассона и соответствующих граничных условий для электрического потенциала с описанием электрохимического источника тока в рамках формализма связанных потоков и решается методом конечных элементов (МКЭ). Алгоритм разработан на основе широко используемого программно-алгоритмического обеспечения для решения прямой задачи бокового каротажного зондирования (БКЗ), созданного в ИНГГ СО РАН (разработчик: к.ф.-м.н. О.В. Нечаев) и реализованного на языке C++. При параметризации среды учитываются слоистое строение разреза, радиальная неоднородность прискважинной области с заданным числом зон и петрофизические свойства песчано-глинистых коллекторов, включая содержание и тип глинистых минералов. Верификация алгоритма проводилась на синтетических и практических каротажных данных. Результаты численного моделирования сопоставляются с известными аналитическими решениями и данными корректировочных палеток ПС. При моделировании практических диаграмм параметры среды задаются в рамках тонкослоистых геоэлектрических моделей, полученных в результате инверсии сигналов высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ), а также с привлечением результатов интерпретации данных других методов ГИС и лабораторных исследований керна.

Для количественной интерпретации диаграмм ПС применяется метод аналитической аппроксимации, развивающий подход, предложенный в работе [Tabanou, Glowinski, Rouault, 1987]. Форма локальных аномалий по глубине описывается функцией, построенной на основе двух сигмоидальных переходов на кровле и подошве пласта, параметры которой связываются с геоэлектрическими характеристиками прискважинной области. Неизвестные коэффициенты в этих зависимостях определяются путём минимизации невязки между аналитическими и синтетическими диаграммами, рассчитанными с помощью ресурсоёмкого метода конечных элементов. Для приближённого определения минерализации пластовой воды ис-

пользуются восстановленная амплитуда статического ПС, априорные геоэлектрические и петрофизические параметры среды, а также значения пластовой температуры. Апробация метода аналитической аппроксимации проводилась на синтетических и практических диаграммах ПС.

Фактические материалы включают практические данные ПС, полученные при каротаже скважин на месторождениях Западной Сибири и Юго-Восточной Азии.

Защищаемые научные результаты

1. Алгоритм численного моделирования сигналов ПС в осесимметричных моделях геологических сред методом конечных элементов и его программная реализация, обеспечивающие описание радиальной неоднородности прискважинной области с помощью заданного числа зон с различными геоэлектрическими параметрами и учёт петрофизических свойств песчано-глинистых коллекторов, включая содержание и тип глинистых минералов.

2. Метод количественной интерпретации диаграмм ПС и его программная реализация, основанные на аналитической аппроксимации локальных по глубине аномалий функцией, построенной из сигмоидальных переходов, параметры которой зависят от геоэлектрических характеристик прискважинной области, и позволяющие выполнять приближённое экспресс-определение минерализации пластовой воды при наличии априорных геоэлектрических и петрофизических данных.

Научная новизна

1. Разработан алгоритм численного моделирования сигналов ПС:

– основанный на решении осесимметричной прямой задачи МКЭ;

– обеспечивающий описание радиальной неоднородности прискважинной области с помощью заданного числа зон с различными геоэлектрическими параметрами;

– учитывающий петрофизические свойства песчано-глинистых коллекторов, включая содержание и тип глинистых минералов;

– позволяющий исследовать влияние геоэлектрических и петрофизических параметров среды на форму и амплитуду диаграмм ПС;

– реализованный в виде программного обеспечения.

2. Разработан метод количественной интерпретации диаграмм ПС:

– основанный на аналитической аппроксимации локальных по глубине аномалий функцией, построенной из сигмоидальных переходов;

– учитывающий геоэлектрические характеристики прискважинной области посредством определения параметров аппроксимационной функции;

– применимый для сложнопостроенных многопластовых моделей, в том числе при наличии зон проникновения;

– позволяющий восстанавливать амплитуду статического потенциала ПС и выполнять приближённое экспресс-определение минерализации пластовой воды;

– реализованный в виде программного обеспечения.

Личный вклад

Автором разработан и программно реализован алгоритм численного моделирования сигналов ПС в осесимметричной постановке с использованием метода конечных элементов. Корректность алгоритма подтверждена сопоставлением с аналитическими решениями и корректировочными палетками; выполнена его апробация на практических каротажных данных. Автором разработан и программно реализован метод количественной инверсии диаграмм ПС на основе их аналитической аппроксимации, проведены его проверка на синтетических данных и апробация на практических каротажных материалах. Выполнены анализ и обобщение полученных результатов, подготовлены научные публикации.

Теоретическая и практическая значимость

Разработанный алгоритм численного моделирования расширяет возможности анализа источников сигналов ПС в сложнопостроенных терригенных разрезах. Алгоритм позволяет описывать радиальную неоднородность прискважинной области с помощью заданного числа зон с различными геоэлектрическими параметрами и учитывать петрофизические свойства песчано-глинистых коллекторов, включая содержание и тип глинистых минералов. С его использованием установлены особенности влияния геоэлектрических и петрофизических параметров среды на форму и амплитуду сигналов ПС.

Программная реализация алгоритма может применяться для расчёта синтетических диаграмм в реалистичных моделях геологических сред, оценки влияния прискважинных условий на измеряемые сигналы и обоснования подходов к интерпретации реальных каротажных данных. Кроме того, алгоритм может служить вычислительной основой для разработки инверсионных методов определения петрофизических параметров коллекторов. Практическая применимость алгоритма подтверждена результатами моделирования и интерпретации данных ПС в водонасыщенных песчано-глинистых разрезах.

Предложенный метод аналитической аппроксимации развивает подходы к количественной интерпретации диаграмм ПС посредством установления связей между параметрами локальных по глубине аномалий и геоэлектрическими характеристиками прискважинной области. Метод позволяет учитывать влияние зоны проникновения и описывать сигналы ПС в сложнопостроенных многопластовых моделях без многократного выполнения ресурсоёмких прямых расчётов. Восстановленная в результате аппроксимации амплитуда статического потенциала ПС может использоваться для приближённого экспресс-определения минерализации пластовой воды при наличии априорных геоэлектрических и петрофизических данных. Практическая применимость метода показана на каротажных материалах, полученных при каротаже скважин на месторождениях Западной Сибири; его программная реализация может быть использована в составе программных комплексов для интерпретации данных ГИС.

Апробация работы и публикации

Представленные результаты докладывались научному сообществу и получили одобрение специалистов на международных и всероссийских конференциях: 19th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (Rhodes, Greece, 2021), всероссийской молодёжной научной конференции с участием иностранных учёных «Трофимуковские чтения» (Новосибирск, 2021, 2023), XVIII, XIX и XXII Международной научной конференции «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (Новосибирск, 2022, 2023, 2026), международной научно-практической конференции ЕАГЕ Геомодель «ГеоБайкал» (Иркутск, 2023), VI Всероссийской молодёжной

научно-практической школы-конференции «Науки о Земле. Современное состояние» (Шира, Хакасия, 2023).

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах категории К1, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций, 1 статья в другом рецензируемом научном журнале и 8 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских конференций. Кроме того, получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук. Научные исследования проводились по проектам ФНИ FWZZ-2022-0026 и FWZZ-2026-0049.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю академику РАН, д.т.н., профессору Михаилу Ивановичу Эпову за формирование вектора научных интересов, ценные консультации, советы и неоценимую помощь на всех этапах работы над диссертацией.

Автор искренне благодарит к.ф.-м.н. О.В. Нечаева за профессиональную компетентность и разработку программной основы, использованной при создании алгоритма численного моделирования сигналов ПС.

За квалифицированную помощь при работе с практическими каротажными материалами, полученные знания в области скважинной геофизики и отзывчивость во время работы над диссертацией автор выражает глубокую признательность д.т.н. К.В. Сухоруковой.

Автор искренне благодарен своим коллегам – научным сотрудникам лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН: к.т.н. Н.А. Голикову, к.т.н. К.Н. Даниловскому и к.т.н. А.М. Петрову за плодотворное сотрудничество, неравнодушное отношение и конструктивные замечания при обсуждении работы.

Особую благодарность автор выражает В.И. Самойловой за поддержку и ценные методические рекомендации при оформлении диссертационной работы.

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и библиографического списка из 131 наименования. Объём – 130 страниц, 32 рисунка, 1 таблица.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Аналитический обзор известных решений. Их достоинства и недостатки

В первой главе представлен аналитический обзор исследований, посвящённых физическим основам метода потенциалов самопроизвольной поляризации, численному моделированию и количественной интерпретации каротажных данных.

Формирование электрических полей ПС обусловлено физико-химическими процессами при взаимодействии пластовых флюидов, бурового раствора и горных пород. В большинстве практических случаев доминирующий вклад в сигнал вносит ионная диффузия. Проанализированы аналитические решения и корректировочные палетки, учитывающие влияние толщины пластов, контрастов удельного электрического сопротивления (УЭС) и зоны проникновения на форму и амплитуду сигналов ПС. Выполнен обзор методов решения прямых и обратных задач, включая конечные элементы, конечные разности и численно-аналитические подходы. Описано развитие моделей ПС на основе теории связанных потоков и переноса ионов в заряженных пористых средах, а также методов количественной интерпретации, включая совместную инверсию с другими скважинными измерениями.

Численные подходы позволяют учитывать сложную геометрию среды и неоднородность электрофизических свойств. Однако использование статического ПС и задание источника в виде скачка потенциала на границе сред в ряде подходов ограничивают явный учёт распределённых токов. Современные методы интерпретации сложны в практической реализации и чувствительны к исходным параметрам модели. Многообразие факторов формирования сигнала ПС затрудняет его однозначную интерпретацию и требует уточнения моделей и разработки эффективных вычислительных алгоритмов.

Глава 2. Численное моделирование потенциалов самопроизвольной поляризации

Вторая глава посвящена разработке и тестированию алгоритма решения прямой задачи ПС методом конечных элементов в осесимметричной постановке.

В **разделе 2.1** описываются модель среды и физические принципы формирования ПС. Рассматривается двумерная модель, включающая вертикальную скважину и пачку контрастных по электрофизическим свойствам пластов различной толщины с плоскопараллельными горизонтальными границами. В рамках формализма связанных потоков выводится уравнение Пуассона для диффузионно-адсорбционной компоненты ПС:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho}\nabla\varphi\right) = \frac{k_b T}{e}\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho}(2T_+ - 1)\nabla \ln \rho_w\right),$$

где φ – электрический потенциал, В, ρ_w и ρ – соответствующие значения УЭС, Ом·м., T_+ – безразмерное макроскопическое число переноса катионов (число Гитторфа); $k_b = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$ – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, К; $e = 1.60 \cdot 10^{-19}$ Кл – элементарный заряд. Число T_+ характеризует долю электрического тока, переносимого катионами в пористой среде, и объединяет диффузионный и мембранный вклады.

В **разделе 2.2** рассматривается численное решение прямой задачи ПС в осесимметричной модели среды в цилиндрической системе координат. Прискважинная область каждого проницаемого пласта может включать несколько коаксиально-цилиндрических зон. Приведены уравнение Пуассона и граничные условия. Численная реализация основана на МКЭ [Глинских, Нечаев, 2022a; 2022b; 2022c; Epov, Glinskikh, Nechaev, 2022; Glinskikh, Nechaev, 2023; Глинских, Нечаев, 2023; Глинских, Нечаев, Даниловский, 2023; Даниловский, Глинских, 2026]. Выбор метода обусловлен необходимостью корректного описания неоднородного распределения УЭС и сложной конфигурации источников тока.

Для задания электрохимического источника используются распределения УЭС среды, УЭС флюида и числа переноса катионов с учётом радиальных и вертикальных компонент плотности тока. Сту-

пенчатые распределения аппроксимируются сигмоидальными функциями, что позволяет аналитически вычислять непрерывные производные в правой части уравнения Пуассона.

В **разделе 2.3** приводятся результаты численного моделирования сигналов ПС. Тестирование разработанного алгоритма выполнено в трёхпластовой модели, включающей пласт водонасыщенного песчаника и глинистые вмещающие породы. На первом этапе проверена корректность расчёта абсолютной амплитуды сигнала ПС. Далее выполнено сопоставление с аналитическими решениями, описывающими влияние конечной толщины проницаемого пласта (ПП) [Дахнов, 1959], контраста УЭС бурового раствора (БР) и пластов [Бурсиан, 1936], а также зоны проникновения (ЗП) [Кузьмичев, 2006] (рис. 1).

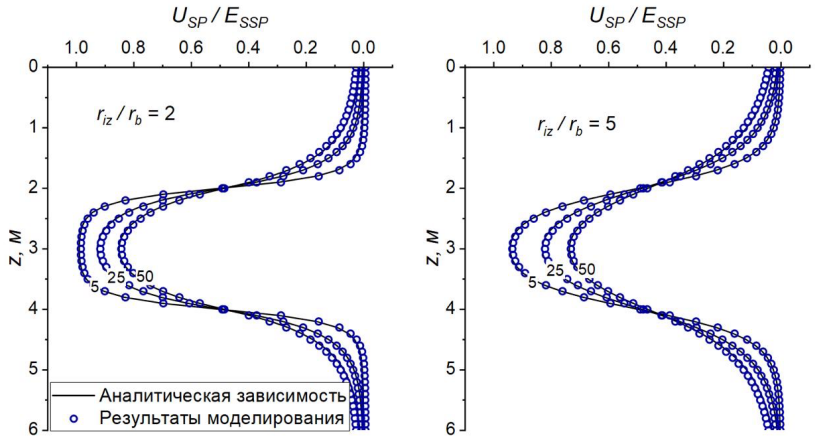


Рисунок 1 – Диаграммы нормированного сигнала ПС для различных отношений радиуса ЗП к радиусу скважины

Шифры – отношение УЭС ЗП к УЭС БР. Отношение УЭС ЗП к УЭС ПП принято равным 5. Сплошная линия – аналитическое решение по формуле [Кузьмичев, 2006], кружки – расчёты по разработанному алгоритму.

Рассчитанные диаграммы согласуются с аналитическими решениями и воспроизводят изменение формы и снижение амплитуды

сигнала ПС. Для проверки совместного влияния этих факторов результаты моделирования сопоставлены с корректировочными палетками Schlumberger.

Для учёта петрофизических свойств песчано-глинистых коллекторов использованы зависимости числа переноса катионов и УЭС породы, адаптированные на основе модели [Revil, 1999]. Численное моделирование с учётом этих зависимостей показало, что влияние глинистой фазы на форму и амплитуду сигналов наиболее выражено при низкой пористости и частичной водонасыщенности и ослабевает при их увеличении. При высокой пористости и полном водонасыщении амплитуда сигнала приближается к значению для незаглинизированного водонасыщенного песчаника. Изменение нормированного сигнала ПС зависит как от содержания глинистого материала, так и от его минерального состава (рис. 2): наиболее сильное влияние оказывает смектит, умеренное – иллит, а влияние каолинита наименее выражено. Таким образом, степень изменения сигнала определяется сочетанием пористости, водонасыщенности, содержания и типа глинистых минералов.

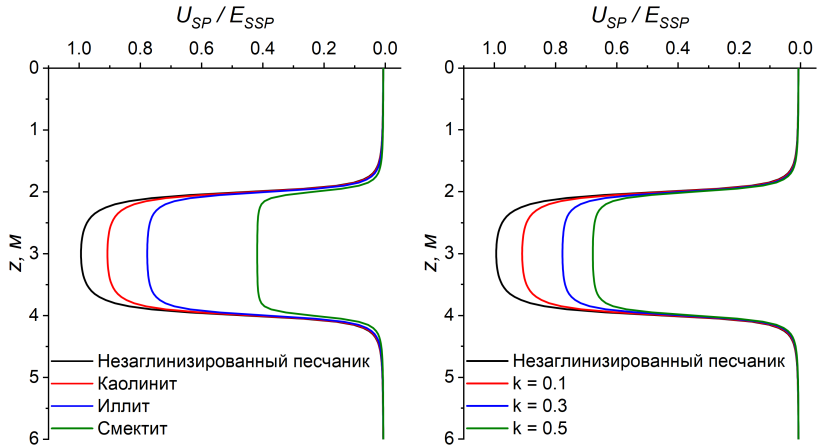


Рисунок 2 – Влияние типа глинистого минерала (слева) и содержания глинистого материала (иллит, справа) на нормированный сигнал ПС

Практическая апробация алгоритма выполнена на интервале переслаивающихся водонасыщенных песчано-глинистых отложений верхнего миоцена, вскрытых скважиной газового месторождения Юго-Восточной Азии (рис. 3). Для построения модели использованы данные ПС, кавернометрии, ГК, распределение УЭС по данным индукционного каротажа и микрокаротажа, а также УЭС бурового раствора и его фильтрата.

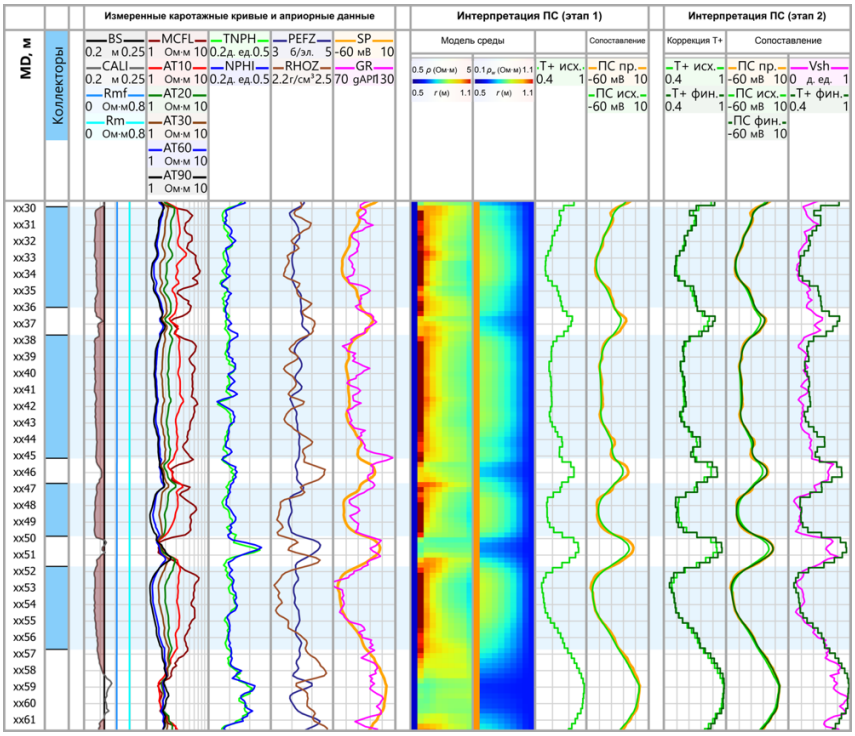


Рисунок 3 – Применение разработанного алгоритма для интерпретации практических данных ПС

Слева направо: выделение пластов-коллекторов; измеренные каротажные данные; исходная модель среды и сопоставление измеренной диаграммы с результатом первого этапа; окончательные результаты интерпретации и сопоставление восстановленного числа переноса катионов T_+ с коэффициентом глинистости V_{sh}.

Независимая оценка глинистости получена по комплексу гамма-, нейтронного и плотностного каротажа. Интерпретация выполнялась в два этапа. Сначала при предположении о постоянной минерализации пластовой воды и приближённом задании числа переноса катионов T_+ получена минерализация 37 г/л, согласующаяся с независимой петрофизической оценкой 36–39 г/л. Затем при фиксированной минерализации уточнялся глубинный профиль числа переноса катионов по минимуму невязки между измеренной и синтетической диаграммами ПС в диапазоне от 0.4 до 1.0. Это улучшило согласование диаграмм, в том числе в тонких прослоях. Восстановленный профиль коррелирует с независимой оценкой глинистости [Danilovskiy, Glinskikh, Petrov, 2026].

Глава 3. Аппроксимация диаграмм потенциалов самопроизвольной поляризации аналитическими функциями для экспресс-определения минерализации пластовой воды

В третьей главе предлагается метод аппроксимации диаграмм ПС аналитическими функциями, эмпирически учитывающий совокупное влияние электрофизических параметров среды. Кроме того, обоснована применимость предложенного подхода для экспресс-определения минерализации пластовой воды [Глинских, 2023a; 2023b; Глинских, Даниловский, 2023; Глинских, Эпов, 2024].

В **разделе 3.1** описывается общая идея аппроксимации диаграмм ПС аналитическими функциями. В предлагаемом подходе разработанный в главе 2 алгоритм решения прямой задачи ПС используется для формирования набора синтетических диаграмм, на основе которого выполняется настройка параметров аналитической аппроксимационной функции. Это позволяет установить связь параметров функции с геоэлектрическими характеристиками среды и в дальнейшем использовать полученную модель для быстрой интерпретации практических каротажных данных без многократного решения ресурсоёмкой прямой задачи.

В **разделе 3.2** описана настройка локальной аппроксимационной функции на 72 синтетических диаграммах ПС, рассчитанных МКЭ для модели с одним коллектором при различных геоэлектрических условиях. Для сопоставления формы диаграмм сигналы нормированы на значение СПС.

Для описания переходов на границах пласта была выбрана сигмоидальная функция следующего вида: $F_p(x)=\frac{1}{2}\left(1+\frac{x}{(1+|x|^p)^{1/p}}\right)$, где x – безразмерный аргумент функции; p – безразмерный параметр, определяющий форму переходной зоны. Аппроксимация диаграмм ПС выполнялась для нормированного на опорное значение СПС сигнала. В результате модель диаграммы для её локальной аппроксимации описывалась следующим образом: $u_{model}(z)=b+A[D(z)]^q$, где b – безразмерный локальный базовый уровень; A – безразмерный амплитудный множитель; q – безразмерный показатель степени оконной функции; $D(z)$ – суммарная безразмерная функция для двух переходов разного знака на кровле и подошве пласта.

При независимом подборе параметров для каждой диаграммы среднее отклонение составило менее 0.30 % от амплитуды СПС. Однако взаимная компенсация параметров затрудняет их непосредственную регрессию по геоэлектрическим характеристикам. Поэтому параметры функции представлены гладкими зависимостями от логарифмических контрастов УЭС и нормированной толщины пласта, а коэффициенты этих зависимостей определены глобальной минимизацией средней невязки по всему набору диаграмм. Средняя RMSE составила 0.49 %, максимальная – 1.14 %; средняя абсолютная ошибка восстановления амплитуды – 0.58 %, максимальная – 1.64 %. Примеры аппроксимации приведены на рис. 4.

Проверка на 576 синтетических диаграммах показала, что при наличии зоны проникновения выбранная аналитическая форма сохраняется. Для построения глобальной модели зависимости её параметров дополнены характеристиками зоны проникновения. Средняя RMSE составила 0.71 %, максимальная – 1.83 %; средняя ошибка восстановления амплитуды – 0.73 %, максимальная – 4.19 %.

В **разделе 3.3** применимость аппроксимационной модели проверена на независимом наборе из 80 многопластовых моделей, содержащих 200 проницаемых пластов. Диаграммы рассчитаны МКЭ для разделённых и близко расположенных пластов без ЗП и со смешанным наличием зон проникновения.

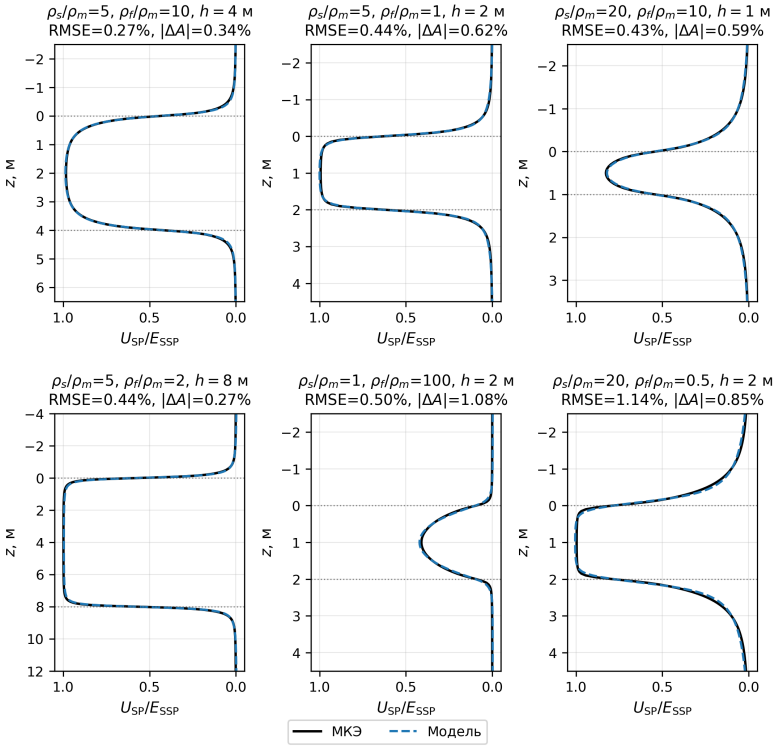


Рисунок 4 – Примеры аппроксимации с применением глобальной модели синтетических диаграмм, рассчитанных МКЭ для одного коллектора без зоны проникновения

Многопластовая диаграмма представлена суммой локальных вкладов, параметры которых вычисляются по ранее полученным геоэлектрическим зависимостям без дополнительной настройки. Средняя RMSE составила 0.56 %, максимальная – 3.04 %; средняя абсолютная ошибка восстановления амплитуды – 0.61 %, максимальная – 6.19 %. Все показатели выражены в процентах от опорного значения СПС 100 мВ. Средняя RMSE сопоставима с результатами для одиночного коллектора, а наибольшие невязки получены для близко расположенных пластов со смешанным наличием ЗП. Это показывает применимость модели к многопластовым диаграммам без дополнительной настройки параметров.

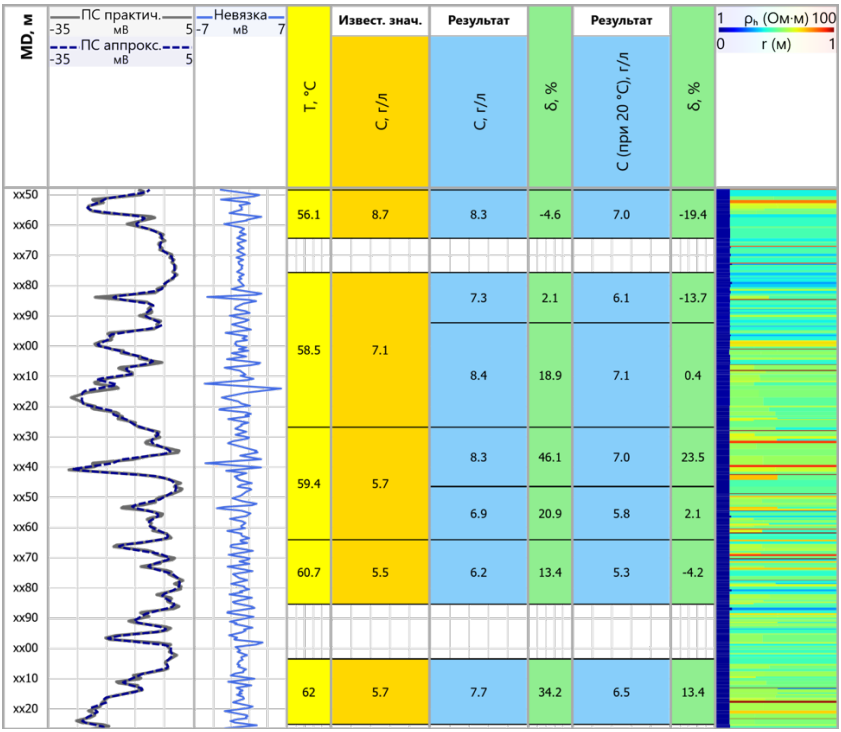


Рисунок 5 – Сопоставление лабораторных и расчётных значений минерализации пластовой воды для нижнемеловых отложений месторождения Утреннее

Показаны исходные и температурно-приведённые оценки, их относительные отклонения и геоэлектрическая модель по данным ВИКИЗ.

В **разделе 3.4** представлена аппроксимация практических диаграмм ПС в скважинах месторождений Западной Сибири.

Практическая апробация выполнена на интервале нижнемеловых отложений месторождения Утреннее. На основе тонкослоистой геоэлектрической модели, полученной по данным ВИКИЗ, проведена аппроксимация измеренной диаграммы ПС. Восстановленные амплитуды СПС использованы для оценки УЭС пластовой воды и её минерализации с учётом температуры. Результаты сопоставлены с

лабораторными определениями (рис. 5). После учёта неопределённости эффективного УЭС ФБР и температурного приведения относительные расхождения для шести из семи интервалов не превышают 20 %, максимальное составляет около 23.5 %.

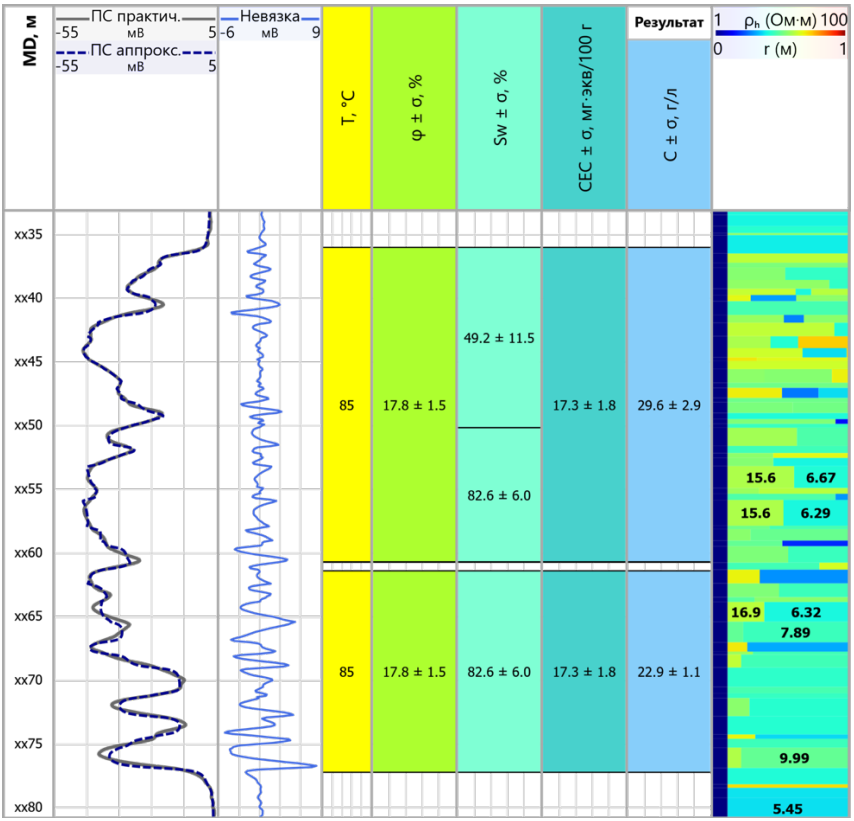


Рисунок 6 – Результаты оценки минерализации пластовой воды для ачимовских коллекторов скважины А Имилорского месторождения

Сплошная линия – измеренная диаграмма ПС, штриховая – её аппроксимация.

Метод также применён к песчано-глинистым коллекторам ачимовской толщи, вскрытым тремя скважинами Имилорского и двумя

скважинами Тевлинско-Русскинского месторождений. При расчёте минерализации дополнительно учтены пористость, водонасыщенность и ёмкость катионного обмена. Для скважин А и В Имилорского месторождения ёмкость катионного обмена определена по лабораторным исследованиям керна; средние значения составили (17.3 ± 1.8) и (10.9 ± 1.4) мг-экв/100 г соответственно. Расчётная минерализация верхнего и нижнего пластов составила (29.6 ± 2.9) и (22.9 ± 1.1) г/л для скважины А (рис. 6), (33.1 ± 2.0) и (28.9 ± 1.4) г/л – для скважины В. Для остальных скважин эффективная ёмкость катионного обмена подбиралась с учётом данных соседних скважин и предполагаемой близости минерализации ачимовских пластов. Расчётная минерализация составила (26.2 ± 5.3) г/л для скважины С Имилорского месторождения и 22.3–30.0 г/л для пластов Тевлинско-Русскинского месторождения.

Практическая апробация показала возможность использования восстановленных амплитуд СПС для приближённой оценки минерализации пластовой воды при наличии геоэлектрической модели и дополнительных петрофизических данных [Глинских, Эпов, 2024].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные алгоритмы численного моделирования потенциалов самопроизвольной поляризации и быстрой интерпретации данных ПС на основе аппроксимации диаграмм аналитическими функциями имеют ряд существенных преимуществ.

Во-первых, предложенный алгоритм численного моделирования потенциалов самопроизвольной поляризации обеспечивает высокую точность расчёта сигналов ПС в двумерной постановке задачи за счёт применения метода конечных элементов. Используемая при этом физико-математическая модель формирования сигналов ПС, полученная в рамках теории связанных потоков применительно к диффузионно-адсорбционному источнику ПС, позволяет учитывать их зависимость от ключевых геоэлектрических и петрофизических параметров пласта-коллектора, включая пористость, водонасыщенность, содержание и тип глинистых минералов.

Во-вторых, разработанный алгоритм аппроксимации и быстрой интерпретации диаграмм ПС, созданный на основе результатов чис-

ленного моделирования потенциалов самопроизвольной поляризации методом конечных элементов, даёт возможность учитывать влияние на сигналы ПС широкого диапазона геоэлектрических и петрофизических параметров. Это позволяет с высокой точностью воспроизводить форму диаграмм и амплитуду сигналов ПС, что создаёт основу для экспресс-интерпретации практических каротажных данных.

В-третьих, предложенный подход к аппроксимации диаграмм ПС аналитическими функциями открывает новые возможности для определения минерализации пластовой воды в песчано-глинистых коллекторах без многократного решения ресурсоёмкой прямой задачи конечно-элементными методами. Экспресс-определение минерализации пластовой воды особенно важно при работе с большим объёмом каротажных данных.

Таким образом, использование разработанных алгоритмов численного моделирования потенциалов самопроизвольной поляризации и быстрой интерпретации данных ПС на основе аппроксимации аналитическими функциями позволяет учитывать влияние геоэлектрических и петрофизических параметров пласта-коллектора, повышать качество интерпретации данных ПС и определять минерализацию пластовой воды в песчано-глинистых коллекторах при небольших временных затратах.

Научно-исследовательские работы по развитию программно-алгоритмической базы метода ПС целесообразно продолжить. Необходимо дальнейшее обоснование и расширение области применимости предложенного метода определения минерализации пластовой воды за счёт более широкого учёта петрофизических параметров и неопределённостей исходных данных. Перспективным направлением является также расширение физико-математической модели с учётом электрокинетических и окислительно-восстановительных процессов, протекающих в скважине и околоскважинном пространстве. Кроме того, полученные результаты создают предпосылки для переинтерпретации архивных материалов ПС, в том числе с целью поиска ранее не выделенных продуктивных интервалов на месторождениях, находящихся на поздней стадии разработки.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций

1. Epov M. Finite-Element Modeling of Spontaneous Potential in an Axisymmetric Reservoir Model with Account of Its Shale Content / M. Epov, **A. Glinskikh**, O. Nechaev // Geosciences. – 2022. – Vol. 12. – № 1. – Art. 30.
2. **Глинских А.В.** Аппроксимация диаграмм каротажа потенциалов самопроизвольной поляризации аналитическими функциями для экспресс-определения минерализации пластовой воды / А.В. Глинских, М.И. Эпов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2024. – № 4а. – С. 46-55.
3. Danilovskiy K. Finite Element Modeling of Spontaneous Potential Well Logs in Complex Near-Wellbore Environments / K. Danilovskiy, **A. Glinskikh**, A. Petrov // Geosciences. – 2026. – Vol. 16. – № 5. – Art. 192.

Статьи в других рецензируемых научных журналах

4. **Глинских А.В.** Развитие физико-математических моделей потенциалов самопроизвольной поляризации для каротажа нефтегазовых скважин / А.В. Глинских, О.В. Нечаев // Геофизические технологии. – 2022. – № 2. – С. 30-43.

Программы для ЭВМ

5. **Глинских А.В.** Программа численного моделирования данных каротажа потенциалов самопроизвольной поляризации SP_FEM / А.В. Глинских, О.В. Нечаев // Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022666046, опубл. 24.08.2022.
6. **Глинских А.В.** Программа для повышения вертикального разрешения сигналов каротажа потенциалов самопроизвольной поляризации SP_Enhancer / А.В. Глинских, К.Н. Даниловский // Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2023687075, опубл. 11.12.2023.
7. Даниловский К.Н. Программа численного моделирования сигналов каротажа потенциала самопроизвольной поляризации SPEAR / К.Н. Даниловский, **А.В. Глинских** // Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2026661235, опубл. 17.04.2026.

Технический редактор Т.С. Курганова

Подписано к печати 20.10.2026
Бумага 60х84/16. Бумага офсет № 1. Гарнитура «Таймс».
Печ. л. 1,0. Тираж 100. Заказ № 253

ИНГГ СО РАН, ОИТ, 630090, Новосибирск, пр-т Ак. Коптюга, 3.