

Совместная численная инверсия данных электрокаротажа в вертикальных скважинах Имилорского месторождения

А. А. Лапковская^{1,2}, А. М. Петров², К. Н. Даниловский², К. В. Сухорукова^{1,2}*

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация

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

*Lapkovskayaanya@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается пример применения совместной двумерной численной инверсии данных электрокаротажа, измеренных на интервалах сложнопостроенных отложений Имилорского месторождения. Сложное строение этих отложений затрудняет применение традиционных методик интерпретации данных электрокаротажа, приводя к необходимости поиска новых подходов к интерпретации, таких как комплексирование электрокаротажных методов при инверсии в классе 2D моделей, что позволяет уточнить определяемые электрофизические свойства отложений сложного строения. В связи с отсутствием в скважинах старого фонда измерений современной аппаратурой, предлагаемым подходом к повышению точности определяемых электрофизических параметров в работе является совместная двумерная инверсия данных бокового каротажного зондирования, фокусированного бокового и низкочастотного индукционного каротажей.

Ключевые слова: совместная численная инверсия, боковой каротаж, боковое каротажное зондирование, низкочастотный индукционный каротаж, Имилорское месторождение

Joint numerical inversion of resistivity logging data in vertical wells of the Imilorskoye field

A. A. Lapkovskaya,^{1,2}, A. M. Petrov², K. N. Danilovskiy², K. V. Sukhorukova^{1,2}*

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

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

* Lapkovskayaanya@gmail.com

Abstract. The paper considers an example of applying a joint 2D numerical inversion to the resistivity logs measured at complex sediments intervals of the Imilorskoye field. Complex structure of the sediments makes it difficult to use the traditional interpretation techniques for processing resistivity logs. This leads to the need to find new interpretation approaches, such as joint 2D inversion of resistivity logs obtained by different geophysical methods, which makes it possible to retrieve more reliable estimates of complex sediments electrophysical properties. Due to the lack of measurements taken by modern equipment in old wells, the proposed approach for improving the accuracy of the retrieved electrophysical parameters in this work is a joint 2D inversion of unfocused lateral logging sounding data, focused lateral and low-frequency induction logs.

Keywords: joint numerical inversion, focused lateral logging, unfocused lateral logging sounding, low-frequency induction logging, Imilorskoye field

Введение

Вовлекаемые в разработку пласты все чаще характеризуются небольшой мощностью и сильной вертикальной неоднородностью, в том числе тонким переслаиванием прослоев с контрастными значениями удельного электрического

сопротивления (УЭС). Применение традиционных подходов к интерпретации каротажа в интервалах таких коллекторов может приводить к недостоверной оценке значения УЭС коллектора и его эффективной толщины, и, в конечном счете, коэффициента нефтегазонасыщения.

Применительно к данным электрокаротажа скважин, актуальной является совместная двумерная инверсия данных бокового каротажного зондирования (БКЗ) и высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ). Вовлечение в инверсию данных комплекса зондов, работа которых основана на разных физических принципах возбуждения электромагнитного поля в среде, приводит к существенному уменьшению неоднозначности определения параметров модели [1]. Однако данные БКЗ и ВИКИЗ не всегда совместны в связи с разным временем каротажа этими методами в процессе бурения, некачественной записью сигналов, влиянием эксцентриситета прибора в скважине, а также поляризационных (диэлектрических) эффектов [2].

В скважинах несовременного бурения данные метода высокочастотного индукционного зондирования попросту отсутствуют. В качестве альтернативного варианта, в таких скважинах для повышения достоверности определяемых при двумерной инверсии параметров геоэлектрической модели предлагается комплексирование данных методов БКЗ, бокового каротажа (БК) и низкочастотного индукционного каротажа (ИК). Этот комплекс интересен не только разной глубиной и разрешающей способностью зондов, что уменьшает неоднозначность определения параметров модели за счет разных физических принципов возбуждения полей в среде, но и тем, что зонды часто реализуются в виде одного комплексного прибора, следовательно, сигналы регистрируются одновременно.

Методы и материалы

В настоящее время при интерпретации данных индукционных и гальванических зондирований широко используют средства численной инверсии, основанные на модели цилиндрически-слоистой среды для пласта с бесконечной мощностью [3].

Для построения моделей в работе используется новый алгоритмический подход к 2D моделированию сигналов электрокаротажа среды на основе свёрточных нейронных сетей для трёх распространенных в России методов электрокаротажа: БКЗ, БК и ИК.

Алгоритмы экспресс-моделирования позволяют рассчитывать сигналы конкретных геофизических приборов в детальных моделях среды с малыми толщинами пластов, с учетом неровностей стенки скважины и вытеснения бурового раствора корпусом каротажного прибора. В непроницаемых пластах возможен учет анизотропии УЭС, проницаемые пласты считаются изотропными и включают одну прискважинную зону, измененную фильтрацией бурового раствора [4].

Комплексирование методов скважинной электрометрии является широко используемым приёмом повышения эффективности их применения при изучении коллекторов нефти и газа сложного строения [5]. В силу разной чувствитель-

ности и разной разрешающей способности обеспечивается возможность повышения достоверности определения УЭС по комплексу методов.

В используемом комплексе методов зондирующим является метод БКЗ. Для градиент-зондов характерна сложная форма сигналов при пересечении границ пластов: отсутствие фокусировки тока приводит к тому, что чувствительность сигналов к свойствам пласта может быть большой на значительном удалении от его границ. Из-за этого при двумерной инверсии данных БКЗ функционал невязки может характеризоваться большим числом локальных минимумов в моделях, соответствующих по сложности реальной среде [6].

Сигналы БКЗ чувствительны и к зоне проникновения, и к неизменной части пласта. Чем больше УЭС зоны проникновения (ЗП) по сравнению с УЭС пласта, тем больше ее вклад в сигналы градиент-зондов. Тем не менее при определении параметров ЗП проявляется в полной мере их эквивалентность: сигналы могут быть равны для моделей с существенно разным сочетанием толщины и УЭС ЗП.

Сигналы фокусированного зонда БК, с другой стороны, при наличии повышающего проникновения фильтра бурового раствора в значительной степени определяются сопротивлением именно зоны проникновения и не дают сколь угодно надежной информации об УЭС неизменной части пласта.

Большой радиальной глубиной, и, как следствие, чувствительностью к УЭС неизменной проникновением части пласта, характеризуются сигналы зондов низкочастотного индукционного каротажа. При упрощенной интерпретации кажущееся УЭС по данным ИК зачастую принимают в качестве истинного значения УЭС пород, но на самом деле вклад измененной зоны в сигналы может быть существенным, и он тем больше, чем глубже проникновение.

Поскольку для каждого из методов характерна своя область эквивалентности параметров измененной зоны, для сужения этой области используют комплексирование БКЗ, БК и ИК. Более точное определение параметров ЗП обеспечивает большую достоверность получаемого значения УЭС коллектора.

Результаты

Для 13 скважин Имилорского месторождения проведена численная инверсия наборов данных разных зондов из комплекса БКЗ+БК+ИК:

- А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, А2.0М0.5N;
- А4.0М0.5N, А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, А2.0М0.5N, А4.0М0.5N, А8.0М0.5N, N0.5 M2.0A;
- А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, А2.0М0.5N, А4.0М0.5N, БК;
- А0.4М0.1N, А1.0М0.1N, А2.0М0.5N, А4.0М0.5N, А8.0М0.5N, А-2.0М0.5N, БК, ИК.

Примеры результатов инверсии на рис. 1–3 наглядно иллюстрируют особенности полученных геоэлектрических моделей.

Как оказалось для предоставленных по Имилорскому месторождению материалов каротажа, существенной проблемой при инверсии данных метода БКЗ является искажение сигналов длинного зонда в зонах экранирования при прибли-

жения к высокоомным пластам, что в некоторых случаях приводит к появлению ложных тонких проводящих пластов, например на глубине $\times\times 71$ м (рис. 1). При добавлении к данным БКЗ сигнала высокоразрешенного метода БК глубинности последнего оказывается недостаточно для исключения возникновения в процессе инверсии таких артефактов (рис. 2). При этом в области под высокоомными карбонатами часто может быть потенциальное скопление нефти, поэтому появление в модели таких пластов с большой электропроводностью и не обосновано, и снизит оценку нефтесодержания. В этом случае целесообразно комплексирование с ИК как методом, чувствительным к проводящим областям среды, что не позволит алгоритму инверсии занижать УЭС пластов в окружении высокоомных вмещающих.

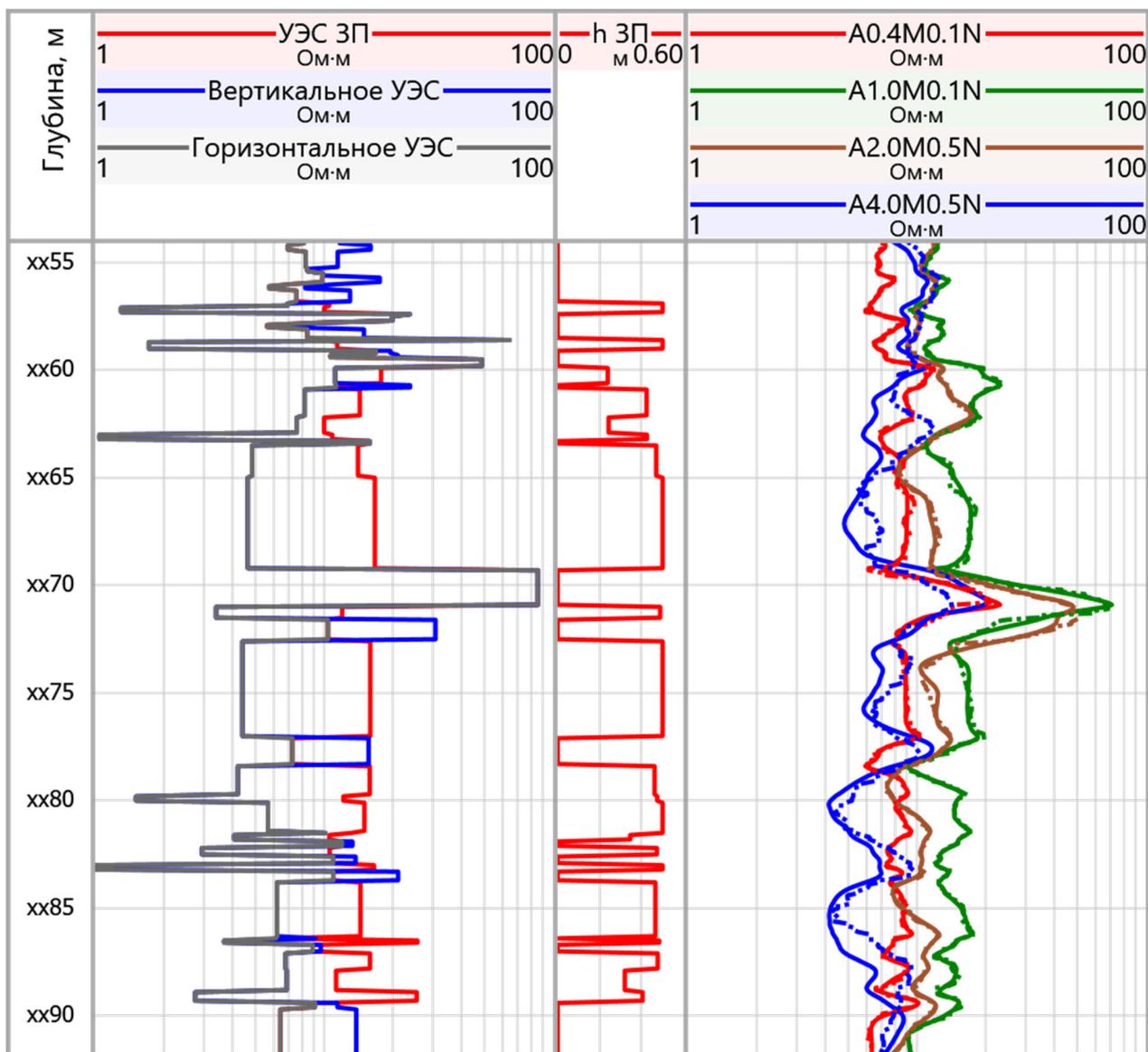


Рис. 1. Скважина F3, результат инверсии данных. Слева направо: 2D модель; второй трек - толщина ЗП; третий трек – сигналы БКЗ; для диаграмм сигналов: пунктир – измерение, сплошная линия – расчет

Инверсия данных более полного комплекса гальванического и индукционного каротажа, а именно добавление данных кровельного и восьмиметрового градиент-зондов и индукционного каротажа (рис. 3) повышает качество подбора модели и обоснованность ее параметров: УЭС проницаемых пластов в области высокоомных пород подбирается не ниже, чем ближнего песчаного пласта, и по значению соответствует нефтяному насыщению.

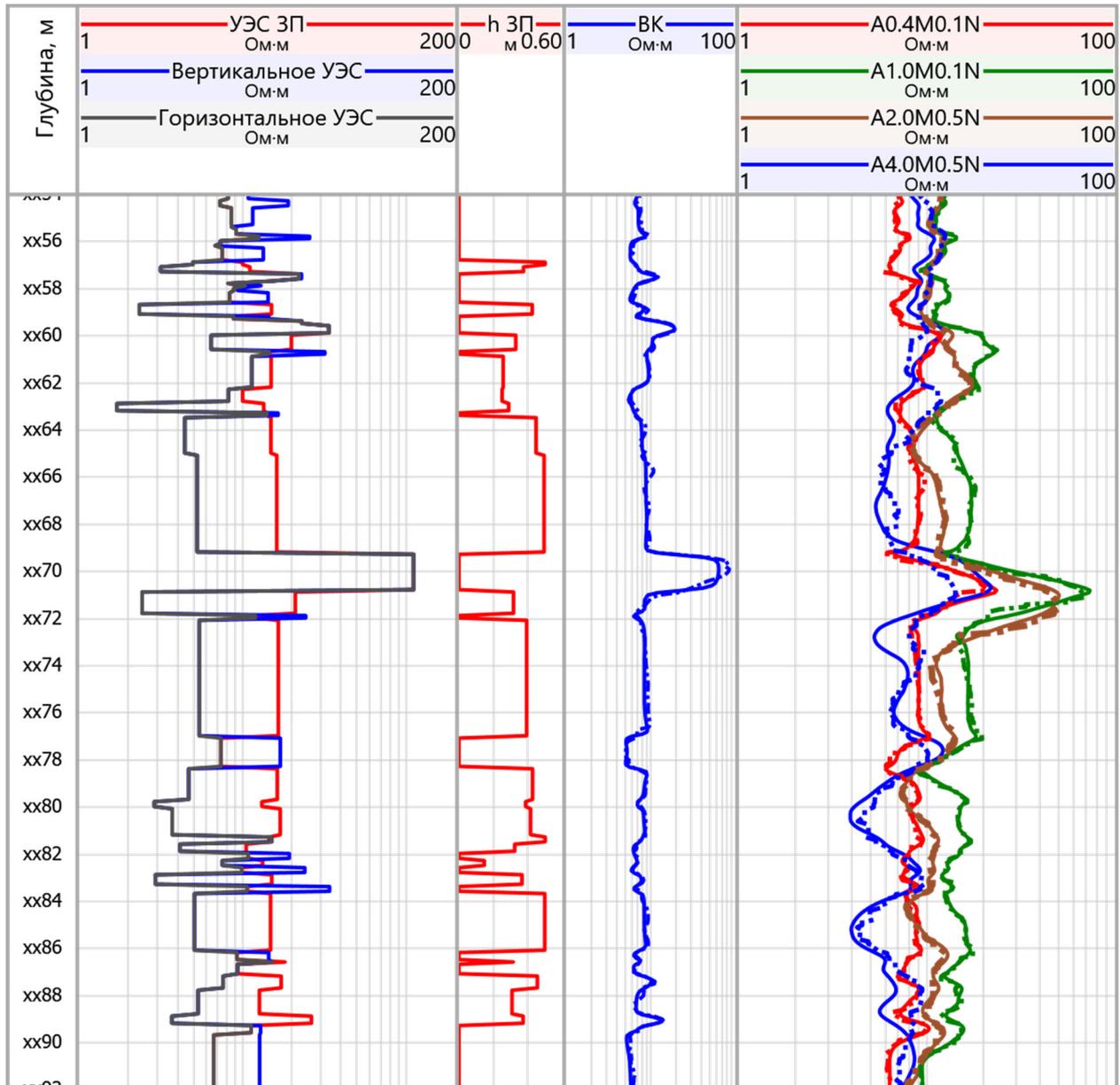


Рис. 2. Скважина F3, результат инверсии данных БКЗ+БК. Слева направо: 2D модель, второй трек – толщина ЗП; третий трек – сигналы БК, четвертый трек – сигналы БКЗ; для диаграмм сигналов: пунктир – измерение, сплошная линия – расчет.

При выявлении искажений данных четырехметрового и восьмиметрового зонда в процессе инверсии в связи с некорректностью устанавливался нулевой весовой коэффициент влияния их сигналов в суммарной невязке. Несмотря на

это, в большей части интервала сигналы этих зондов соответствуют подобранной модели.

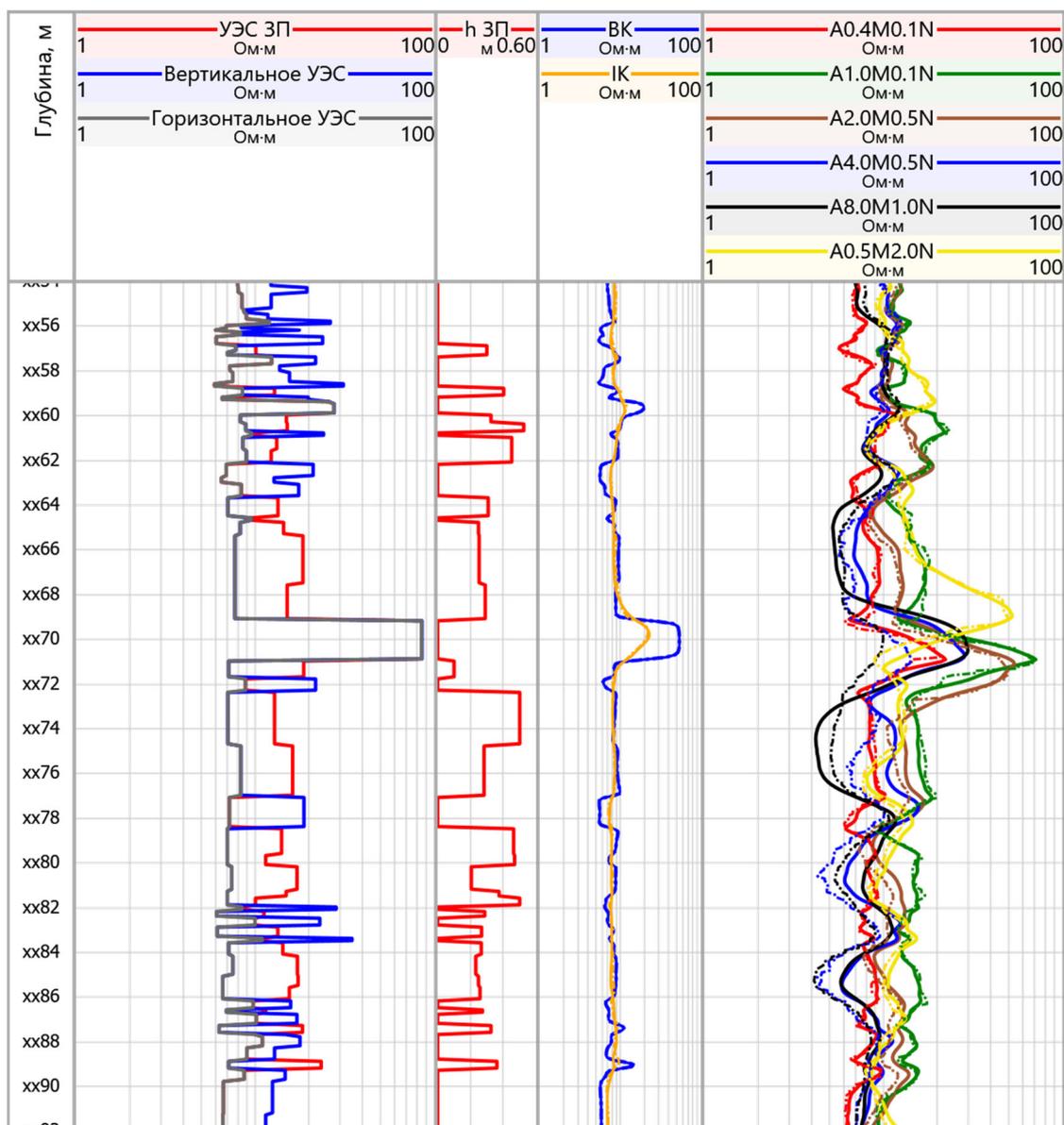


Рис. 3. Скважина F3, результат инверсии данных БКЗ+БК+ИК. Слева направо: 2D модель; второй трек – толщина ЗП; третий трек – сигналы БК и ИК; четвертый трек – сигналы БКЗ; для диаграмм сигналов: пунктир – измерение, сплошная линия – расчет.

Выводы

На примере практических данных скважинной электрометрии из скважин Имилорского месторождения показана необходимость комплексирования данных каротажа на постоянном и переменном токе при численной инверсии в классе двумерных геоэлектрических моделей.

При неглубоком проникновении фильтрата бурового раствора в проницаемые отложения добавление индукционного метода к комплексу БКЗ+БК позво-

лило сгладить необоснованные контрастные участки УЭС не только в непроницаемой части интервала, но и в пластах с проникновением, а также выявить некондиционные записи градиент-зондов А8.0М0.1N и А4.0М0.5N.

Таким образом, совместная инверсия сигналов комплекса гальванических и индукционных зондов электрокаротажа позволяет существенно уменьшить область эквивалентных моделей и уточнить электрофизические параметры проницаемых отложений.

Благодарности

Исследовательская часть работы выполнена при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. (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": Сб. материалов в 6 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. Т. 4. – С. 90–98.

2. Петров А. М., Нечаев О. В., Сухорукова К. В. Двумерная инверсия сигналов российского электрокаротажа, измеренных на интервалах сложнопостроенных отложений // Геомодель-2019: 21-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (г. Геленджик, 9-13 сентября 2019 г.): Тезисы докладов – Геленджик– 2019– С.1-4.

3. Никитенко М.Н., Глинских В.Н., Сухорукова К.В., Эпов М.И. Численная инверсия комплекса данных электрометрии в наклонно-горизонтальных скважинах // Геомодель - 2016: 18-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа (г. Геленджик, 12 - 15 сентября 2016 г.): Тезисы докладов – Геленджик – 2016 – 0201с.

4. 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

5. Mezzatesta, A. G., Payton, C. C., Strack, K. M., & Tabarovsky, L. A. Simultaneous Inversion of Galvanic and Induction Logging Measurements to Improve Resolution // Caribbean Petroleum Engineering Conference, 1994. – Paper SPE 26976. 9.

6. 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 электрометрии // Геодинамика и тектонофизика. – 2021. – Т. 12. – №. S3. – С. 669-682

© А. А. Лапковская, К. В. Сухорукова, А. М. Петров, 2022