

УДК 550.832

ВОЗМОЖНОСТИ ЧИСЛЕННОЙ ИНВЕРСИИ ДАННЫХ БОКОВОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОЛЛЕКТОРОВ СЕВЕРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

С.А. Примаков[✉], К.В. Сухорукова

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

Поступила в редакцию: 29.09.2025

Принята в печать: 12.11.2025

Опубликована онлайн: 19.11.2025

DOI: [10.15372/GiG2025193](https://doi.org/10.15372/GiG2025193)

EDN: [DVUTNP](https://www.edn.ru/DVUTNP)

Ссылка для цитирования:

Примаков С.А., Сухорукова К.В. (2026).

Возможности численной инверсии данных бокового каротажного зондирования при определении геоэлектрических параметров коллекторов северных месторождений Западной Сибири // Геология и геофизика, DOI: [10.15372/GiG2025193](https://doi.org/10.15372/GiG2025193), EDN: [DVUTNP](https://www.edn.ru/DVUTNP).

© С.А. Примаков, К.В. Сухорукова, 2026

[✉]E-mail: PrimakovSA@ipgg.sbras.ru

В статье представлены результаты численного моделирования и инверсии данных бокового каротажного зондирования (БКЗ) для определения геоэлектрических параметров нефтегазонасыщенных коллекторов северных месторождений Западной Сибири. Исследование основано на анализе синтетических сигналов БКЗ, рассчитанных для типичной модели ачимовских отложений Ямбургского месторождения, характеризующихся небольшой толщиной коллекторов. Рассмотрено влияние изменения таких параметров, как удельное электрическое сопротивление (УЭС) пласта, толщина зоны проникновения (ЗП) и сдвиг данных по глубине, на сигналы БКЗ. Проведена оценка точности восстановления параметров коллектора с помощью двумерной численной инверсии, выявлены области эквивалентности и предложены рекомендации по минимизации погрешностей. Результаты показали, что наибольшая чувствительность сигналов БКЗ наблюдается к изменению УЭС пласта и толщины ЗП, при этом погрешность определения УЭС пласта составляет до 12 %.

Боковое каротажное зондирование, численное моделирование, численная инверсия, двумерная аксиально-симметричная геоэлектрическая модель, нефтегазонасыщенный коллектор, удельное электрическое сопротивление, северные месторождения Западной Сибири

ВВЕДЕНИЕ

В связи с истощением отложений с легко извлекаемыми углеводородами российские нефтедобывающие компании все больше обращают внимание на месторождения, находящиеся в суровых климатических условиях на северных окраинах Западной Сибири. К таким месторождениям относятся газоконденсатные месторождения заполярной части Западно-Сибирской равнины, например, Ямбургское, расположенное на Тазовском полуострове в субарктической зоне в районе Ямало-Ненецкого автономного округа Тюменской области. В разрезе месторождения представляют интерес ачимовские отложения, исследование строения которых, как и на всех западно-сибирских месторождениях, сильно осложняется тонкослоистым строением, глинистой и карбонатной цементацией, а также высоким контрастом удельного электрического сопротивления (УЭС) переслаивающихся пород. Промышленная нефтегазонасыщенность нижнемеловых отложений Ямбургского месторождения доказана еще в 1972 г. при опробовании первой пробуренной скважины, в которой открыты три газоконденсатные залежи [Конторович и др., 1975].

Оценка возможной продуктивности этих отложений существенно зависит от солености пластовых вод, которая, по данным лабораторных исследований воды, из притоков может быть довольно низкой и

сильно варьируется (например, по пласту Ач₈ зафиксирован диапазон 9–19 г/л). При малой солености становится особенно важным правильное определение УЭС коллектора: небольшое занижение значения переводит пласт в непродуктивный. По этим причинам стандартные методики интерпретации данных электрокаротажа, основанные зачастую на анализе отсчетов единичных зондов, особенно низкочастотного индукционного каротажа (ИК), или в лучшем случае на результате инверсии кривых зондирования бокового каротажного зондирования (БКЗ), в рассматриваемых условиях оказываются малоэффективными. Наилучший результат в условиях подобных разрезов дало бы применение высокоразрешающих методов электрокаротажа, например, электромагнитного зондирования, но при оценке свойств коллекторов, по данным ГИС из старого фонда скважин, информация представлена большей частью данными БКЗ и дополнены в лучшем случае данными одного зонда ИК и одного – бокового каротажа (БК), при этом качество этих сведений не всегда высокое.

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе визуального и численного анализа практических данных электрокаротажа сформировано представление о типичных электрических свой-

ствах ачимовских коллекторов Ямбургского месторождения, восстанавливаемые параметры которых характеризуются большой неопределенностью при инверсии сигналов БКЗ как наиболее часто применяемого метода. Для исследования возможности уменьшения области их эквивалентности проведен численный эксперимент по следующей схеме:

- по практическим данным скважинной электрометрии и других методов ГИС выявить типичную геоэлектрическую модель газонефтяного коллектора;
- рассчитать в типичной модели синтетические сигналы БКЗ программными средствами численного моделирования;
- с применением 2D-инверсии синтетических сигналов оценить точность восстановления параметров геоэлектрической модели по их отклонению от исходных значений;
- исследовать эквивалентные модели, полученные при инверсии с фиксацией параметров проницаемого пласта (УЭС пласта или толщины зоны проникновения (ЗП)).

Как показывает практика [Эпов и др., 2024а], при исследовании высокоомных пластов (> 40 Ом·м), насыщенных углеводородами (газ, нефть, газоконденсат), определение параметров модели с помощью совместной инверсии комплекса методов БКЗ, БК и ИК может приводить к широким диапазонам эквивалентности как УЭС пласта, так и параметров ЗП.

ИК используется в этом комплексе методов как дополнительный метод к зондирующему БКЗ для более точного определения сопротивления пласта со смешанным насыщением при минерализации пластовой воды около 20 г/л, т. е. с УЭС 6–20 Ом·м [Лапковская и др., 2022; Сухорукова и др., 2025]. Но с увеличением УЭС неизменной части коллектора чувствительность ИК к этому параметру падает: при изменении УЭС пласта с 50 до 70 Ом·м значения сигналов ИК меняются не более чем на 3–4 мСм/м, при этом значение кажущейся удельной электропроводности определяется, например, зондом ИК 3И1.0 в приборе серии К1А-723 с погрешностью $\pm[5 + 0.1(x_b/x - 1)]$ % в диапазоне 10–2500 мСм/м [Прибор..., 2016]. Значительный вклад в погрешность также добавляет скважина с контрастным по электропроводности раствором [Дворкин и др., 2021], что не всегда можно учесть с необходимой точностью. По этой причине определение УЭС пласта происходит в основном по данным длинных зондов БКЗ.

Для моделирования синтетических сигналов БКЗ конечно-элементным алгоритмом использованы программы, разработанные в лаборатории скважинной геофизики ИНГГ СО РАН [Нечаев, Глинских, 2017, 2018; Epov et al., 2020], а также их нейронные экпресс-аналоги на основе сверточных нейронных сетей [Петров и др., 2021; Petrov et al., 2025]. Программы тестировались на результатах других программ,

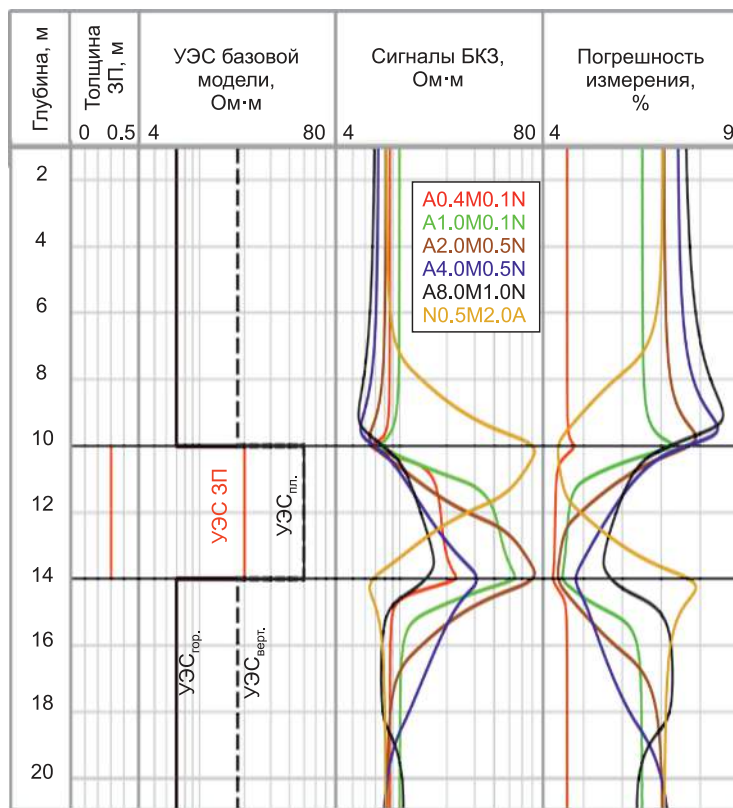


Рис. 1. Параметры базовой геоэлектрической модели (толщина ЗП, значения УЭС), расчетные сигналы БКЗ и погрешности их измерения. УЭС_{пл.} – УЭС пласта, УЭС_{гор.} и УЭС_{верт.} – УЭС горизонтальное и вертикальное.

расчетами в широком диапазоне геоэлектрических параметров пластовых моделей, а также при применении для интерпретации практических данных в разных условиях разрезов Западной Сибири [Эпов и др., 2021, 20246]. С применением указанных программных средств исследовано влияние изменения параметров газонефтяного коллектора на сигналы БКЗ, а также проведен анализ эквивалентных моделей, получаемых при инверсии при фиксированном значении одного из параметров.

Для исследования областей эквивалентности значений параметров модели с помощью инверсии данных БКЗ выбрана модель, сигналы в которой были «базовыми» для исследования. Вмещающие породы – анизотропные глинистые отложения с горизонтальным и вертикальным сопротивлениями, равными 7 и 18 Ом·м соответственно; проницаемый пласт-коллектор – песчаник со следующими параметрами: УЭС пласта 50 Ом·м, УЭС в ЗП – 20 Ом·м, толщина ЗП – 0.3 м (рис. 1). Мощность пласта 4 м. Для всех моделей взяты следующие значения параметров скважины: диаметр – 196 мм, УЭС глинистого бурового раствора – 1.3 Ом·м. Выбранная базовая модель соответствует конкретным условиям для нефтегазовых коллекторов северных месторождений Западной Сибири (Байкаловское, Дерябинское, Ямбургское и т. д.).

Рассчитанные сигналы БКЗ выглядят достаточно просто (соответственно строению модели): диаграммы кажущегося сопротивления зонда А0.4М0.1N выходят на уровень около УЭС ЗП (20 Ом·м), уровень УЭС пласта сложно оценить как визуально, так и по кривой зондирования. В анизотропных вмещающих пластах можно заметить обусловленное анизотропией расхождение сигналов зондов разной длины в перекрывающей толще, в подстилающей – соотношение большей частью задается эффектами экранирования при подходе к высокоомному коллектору.

Эти базовые сигналы далее сравниваются с сигналами, рассчитанными в измененных моделях (с другими значениями параметров), или подаются на вход программы 2D-инверсии при разных стартовых значениях параметров модели. Анализируются поточечно рассчитанные невязки базовых сигналов и сигналов, рассчитанных в измененных/подобранных моделях. По этим невязкам сделан вывод о возможности определения параметров.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОНИЦАЕМОГО ПЛАСТА НА СИГНАЛЫ БКЗ

Для исследования эквивалентности при определении параметров модели с помощью инверсии данных БКЗ рассчитаны синтетические сигналы в моделях с измененными параметрами. Этот подход является одним из общепринятых для исследования чувствительности сигналов зондов к разным параметрам окружающей скважину среды, хотя и не полностью

описывает особенности процесса минимизации суммарной невязки сигналов при их численной инверсии, что будет показано ниже.

Сравнение сигналов в базовой и измененных моделях производилось следующим образом: рассчитывалось относительное изменение сигналов в измененной модели относительно сигналов в базовой модели по формуле $|\rho_{k2} - \rho_{k1}| / \rho_{k1}$, где ρ_{k1} – рассчитанные сигналы в базовой модели, ρ_{k2} – рассчитанные сигналы в измененной модели. Затем из полученного значения вычиталось значение допускаемой погрешности измерения сигналов БКЗ для стандартных зондов аппаратуры К1А-723-М, К1А-723-МТ. Погрешность измерения в каждой точке скважины для каждого зонда рассчитывалась по формуле $\pm [4 + 0.005(x_b/x - 1)]$ %, где x_b и x – верхний предел и текущее значение кажущегося сопротивления соответственно [Прибор..., 2016]. Значения погрешности измерения для всех зондов зависят от значений самих сигналов соответственно формуле и изменяются в диапазоне от 4.2 до 8.5 % (см. рис. 1). Форма диаграмм погрешностей зеркальна сигналам: максимальные значения погрешности соответствуют минимальным значениям сигнала и наоборот; минимальным уровнем характеризуется короткий зонд. Диапазон измерения сигналов БКЗ для короткого зонда А0.4М0.1N составляет 0.2–1000 Ом·м, для остальных зондов – 0.2–5000 Ом·м. Значение этой модифицированной невязки в процентах и рассматривается далее:

$$\delta = \frac{|\rho_{k2} - \rho_{k1}|}{\rho_{k1}} \cdot 100 - (4 + 0.005(x_b/x - 1)), \%$$

Если полученное значение δ не превышает нуля, то разница сигналов в измененной и базовой моделях меньше погрешности измерения, т. е. такое изменение выбранного параметра незначительно влияет на сигналы, и можно говорить о некой эквивалентности выбранного параметра, обусловленной неточностью измерений. Если значение δ больше нуля, то изменение выбранного параметра оказывает практически значимое влияние на сигнал, которое будет надежно зафиксировано прибором и повлияет на результат подбора параметра.

Влияние вариации значения УЭС ЗП в работе не рассматривается, поскольку оно косвенно представлено в представленных ниже результатах; также этот параметр может быть оценен априорно по данным микрозондирования.

Влияние УЭС пласта

В первом случае рассматривается влияние изменения УЭС неизменной проникновением фильтра бурового раствора части пласта на сигналы БКЗ. Значение параметра изменялось на ± 10 и ± 20 %, что соответствует ± 5 и ± 10 Ом·м, рассчитывались сиг-

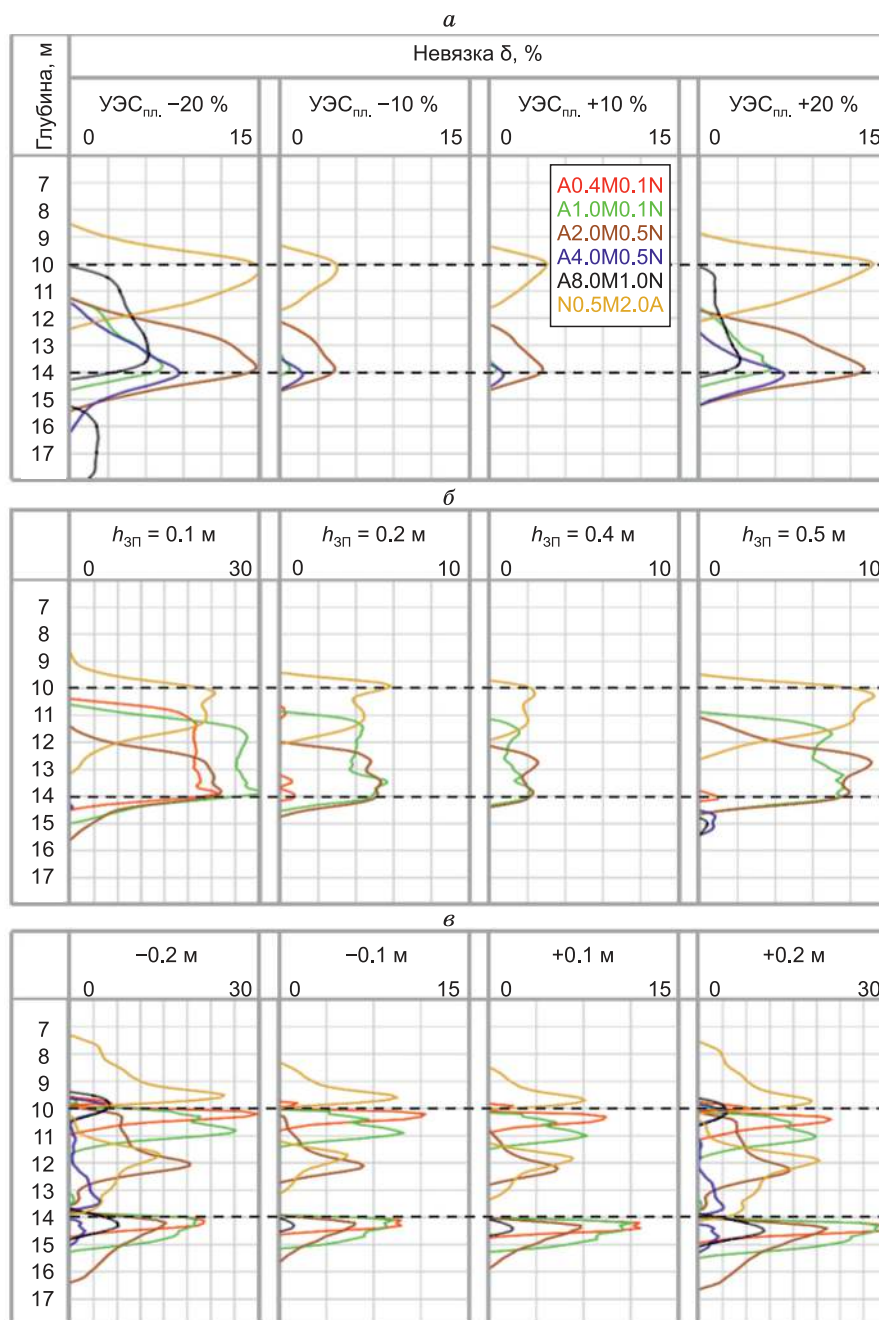


Рис. 2. Невязки сигналов БКЗ в базовой модели и в моделях с вариацией параметров (в % относительно сигналов в базовой модели с вычетом погрешности измерений). Треки: *а* – невязки для модели с вариацией УЭС пласта (на ± 10 и ± 20 % относительно базового значения 50 Ом·м); *б* – невязки для модели с вариацией толщины ЗП (± 0.1 и ± 0.2 м; базовое значение 0.3 м); *в* – невязки, вызванные сдвигом базовых сигналов по глубине (± 0.1 и ± 0.2 м).

налы БКЗ и невязки между ними и базовыми сигналами (рис. 2, *а*).

Как можно заметить, изменение УЭС пласта на ± 10 % относительно базовой модели в среднем слабо влияет на сигналы: значения δ для зондов A1.0M0.1N и A4.0M0.5N немного превышают погрешности измерения зонда на границе коллектора и подстилающей породы. Основное влияние изменения УЭС проявляется в сигналах прямого и обращенного двухмет-

ровых зондов (A2.0M0.5N и N0.5M2.0A). Это значит, что изменение на 10 % УЭС пласта, равного 50 Ом·м, не приводит к практически значимому изменению сигналов четырех из шести зондов (изменение для зондов A1.0M0.5N и A4.0M0.5N не очень большое), превышающему погрешность измерения, и можно сделать вывод о некоторой эквивалентности этого параметра в выбранном диапазоне. Для того чтобы в такой модели уменьшить область эквивалентности,

необходимо более точно подобрать сигналы двухметровых зондов в интервалах, где невязки δ достигают 4.0–4.5 %, т. е. на границах и в областях под кровлей и над подошвой пласта, сравнимых с длиной зонда.

При изменении УЭС пласта на ± 20 % (± 10 Ом·м) невязки для всех зондов, кроме короткого, превышают погрешность измерения и особенно значительно – для двухметровых (значение δ достигает 14–15 %). Это говорит о том, что при таком изменении этого параметра все зонды достаточно чувствительны к нему, и значение УЭС можно приблизить к значению в базовой модели при инверсии данных БКЗ. Также можно заметить, что увеличение УЭС пласта оказывает несколько меньшее влияние на сигналы, чем его уменьшение, что наиболее заметно на невязках зондов А1.0М0.5N, А4.0М0.5N и А8.0М1.0N. Влияние изменения на самый короткий зонд оказывается меньше погрешности измерения, поскольку на сигнал этого зонда сильнее влияют параметры ЗП.

Стоит отметить, что сигналы зондов А2.0М0.5N и N0.5М2.0А характеризуются большей чувствительностью к УЭС пласта, чем сигналы зондов А4.0М0.5N и А8.0М1.0N. Это связано с тем, что сигналы длинных зондов не успевают выйти на УЭС пласта из-за ограниченной толщины пласта, равной 4 м. Невязки δ для двухметровых зондов в 1.5–2 раза больше, чем для остальных, интервалы повышенной чувствительности занимают всю толщину пласта, что приводит к выводу о необходимости тщательного подбора сигналов именно этих зондов. Следует также отметить область в подстилающем пласте с повышенным значением δ для самого длинного зонда в случае снижения УЭС пласта на 20 % (до 40 Ом·м), при таком же повышении значения параметра аналогичная область отсутствует.

Влияние толщины ЗП

Следующий варьируемый параметр – толщина ЗП. Как известно, при бурении с фильтрующимся раствором параметры ЗП зависят от фильтрационно-емкостных свойств коллектора и последние можно оценить по толщине и УЭС этой измененной фильтрацией зоны [Allen et al., 1991; Эпов и др., 2004; Сухорукова и др., 2022]. При полимерном буровом растворе его проникновение или фильтрация в поры породы в процессе бурения минимизировано, но возможна как диффузия ионов через полимерную пленку, так и фильтрация при изменении свойств полимеров со временем. Поэтому отказ от наличия изменений в прискважинной зоне в общем случае не обоснован. При этом в публикациях не приводятся факты глубокого проникновения при использовании полимерных растворов, поэтому имеет смысл рассматривать небольшие значения толщины ЗП.

Для исследования влияния изменения толщины ЗП на сигналы БКЗ проведены расчеты для четырех моделей, в которых толщина отличалась на ± 0.1 и ± 0.2 м от значения 0.3 м в базовой модели (см. рис. 2, б). УЭС ЗП не варьируется и совпадает с базовым.

В модели с толщиной ЗП 0.1 м высокоомная, не измененная проникновением фильтрата бурового раствора часть пласта находится близко к скважине, что увеличивает значения как кажущегося сопротивления для всех коротких и двухметровых зондов, так и невязок их сигналов до 20–26 %. При этом сигналы зондов А4.0М0.5N и А8.0М1.0N отличаются от сигналов в базовой модели не более чем на погрешность измерения.

При толщине ЗП 0.2 м и более зонд А0.4М0.1N уже практически теряет чувствительность к этому параметру, что является несколько неочевидным, учитывая его длину, но подтверждает сильную зависимость от параметров скважины с буровым раствором. Значение δ для двухметровых зондов и зонда А1.0М0.1N при толщине 0.2 м достигает в среднем 4.0–4.5 %, при толщине 0.4 м – в среднем около 2 %. Для обоих случаев значения невязки для зондов А0.4М0.1N, А4.0М0.5N и А8.0М1.0N меньше погрешности измерения, что говорит об их слабой чувствительности к изменению толщины ЗП, на 30 % отличающейся от значения в базовой модели.

При увеличении толщины ЗП до 0.5 м невязки δ для сигналов зондов А1.0М0.1N, А2.0М0.5N и N0.5М2.0А снова увеличиваются до 7–8 %, а для остальных зондов не превышают погрешности измерения (за исключением небольшого превышения в области подошвы коллектора).

В рассматриваемой модели логично было бы предположить, что при увеличении толщины ЗП большее влияние, чем в базовой модели, будет оказывать ее УЭС, а при уменьшении – УЭС пласта. Однако при базовом значении этого параметра, равном 0.3 м, невязки для 0.2 и 0.4 м ведут себя иначе, даже для зондов А1.0М0.1N, А2.0М0.5N и N0.5М2.0А, а увеличиваться начинают между значениями 0.4 и 0.5 м. Такое поведение отражает свойства как выбранной базовой модели (на значение невязки влияют соотношение УЭС блоков модели, толщина ЗП и толщина пласта), так и погрешности измерения, рассчитываемой по формуле, заданной производителями аппаратуры.

Из этих результатов следует вывод о том, что при инверсии данных БКЗ в параметры модели с высокоомным пластом с неглубокой ЗП большее внимание стоит уделить подбору сигналов зондов А1.0М0.1N, А2.0М0.5N и N0.5М2.0А, так как они наиболее чувствительны к изменению как УЭС пласта, так и толщины ЗП.

Сопротивление пласта при выбранных параметрах моделей может варьироваться в пределах ± 5 Ом·м без значимых изменений сигналов длинных и коротких зондов, т. е. для рассмотренной модели

минимальная ошибка подбора УЭС пласта, равного 50 Ом·м, будет составлять 10 %. По результатам расчетов толщина ЗП при известных значениях УЭС пласта и зоны может быть подобрана с ошибкой ± 0.05 м при базовом значении 0.3 м.

Влияние сдвига практических данных по глубине

Еще один важный в контексте численной инверсии вариант, который осталось рассмотреть, – это сдвиг сигналов (неувязка) по глубине. Неувязка возникает при неполной коррекции стоянок во время каротажа, при ошибках ввода положения точки записи и при «посадке» данных БКЗ на сигналы другого метода, которым чаще всего являются БК и/или гамма-каротаж. В результате данные зондов БКЗ могут быть смещены относительно друг друга, сжаты по глубине или растянуты в каком-то интервале скважины.

Рассмотрим простейший вариант: сдвиг сигналов всех зондов на наиболее часто применяемый шаг представления данных каротажа, на ± 0.1 и ± 0.2 м (см. рис. 2, в). Отметим, что в этом случае сами сигналы, рассчитанные в базовой модели, никак не изменяются, а всего лишь сдвигаются вверх или вниз по скважине, и анализируются их невязки с несмещенными сигналами. При ручной увязке данных БКЗ на больших интервалах скважины масштаб отображения диаграмм выбирается интерпретатором с точки зрения уменьшения времени на увязку и достижения визуального соответствия, и несогласование на 0.1 м на этом этапе обработки может оказаться незамеченным.

При сдвиге самые большие значения невязки δ получаются в области максимального изменения сигналов – вблизи границ пластов. При этом в области границ коллектора чувствительность к сдвигу большая для всех зондов, значения δ больше нуля в интервале около длины зонда под границей (кроме A4.0M0.5N и A8.0M1.0N). Максимумы под подошвой локализуются вблизи нее, под кровлей – на расстоянии около длины зонда. Под подошвой невязки получаются немного меньше, чем под кровлей, при сдвиге вверх и больше – при сдвиге вниз. При сдвиге по глубине на ± 0.1 м невязки δ для зондов A0.4M0.1N, A1.0M0.1N, A2.0M0.5N и N0.5M2.0A составляют в максимумах 7–11 %, а сигналы зондов A4.0M0.5N и A8.0M1.0N в среднем изменяются не более чем на погрешность измерения. При сдвиге сигналов на ± 0.2 м невязки всех зондов увеличиваются до 15–30 % с расширением областей повышенных значений. Кроме этого, чувствительность к сдвигу появляется у зонда A4.0M0.5N: значение δ в области кровли около 6 %, в нижней половине коллектора и под подошвой – в среднем около 2 %, в максимуме над подошвой до 4 %. Значение δ для зонда A8.0M1.0N под подошвой достигает 7.5 % (-0.2 м) и 11 % ($+0.2$ м), на кровле ≈ 7

и 4 % соответственно, интервалы превышения длинной около метра: с середины на кровле и полностью под подошвой. Для остальных зондов интервалы ненулевых значений δ составляют около 1.3 длин зондов при сдвиге на ± 0.2 м и около длины зонда при сдвиге ± 0.1 м.

Поэтому в случае плохого качества подбора сигналов зондов в областях под границами пластов, если интервалы повышенных значений поточечной невязки пропорциональны длинам зондов, то следует проверить увязку сигналов по глубине, возможной причиной также может быть неточно заданное положение границы между пластами.

ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПРИ ДВУМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ

Анализ чувствительности сигналов БКЗ к отдельным параметрам модели пласта достаточно информативен, однако не дает полного ответа на вопрос: насколько близкой к базовой модели получится модель, определенная при инверсии сигналов, рассчитанных в базовой, если какой-то из параметров считается известным и фиксированным (не участвует в подборе), но отличается от значения в базовой модели?

Исследование проводилось следующим образом: фиксировался один параметр – УЭС пласта либо толщина ЗП, его значение было изменено по сравнению с базовой моделью, остальные параметры подбирались путем инверсии данных БКЗ, рассчитанных в той же самой, что и в первой части статьи, базовой модели. В результате инверсии получалась новая модель, и сигналы в ней, так же как и выше, сравнивались с сигналами в базовой модели с расчетом относительных невязок δ . Интервал подбора сигналов 1–30 м.

В большинстве случаев стартовые значения параметров брались равными значениям в базовой модели, за исключением фиксированного, который не варьировался при подборе. Как показал численный анализ, выбор стартовых значений, далеких от базовых, не приводит к принципиально отличному результату инверсии. Остальные параметры подбирались при инверсии без ограничения диапазона значений. На вход программы инверсии подавались те же сигналы, рассчитанные в базовой модели, что и ранее, для всех зондов при расчете невязки их веса принимались одинаковыми.

Инверсия с фиксированным УЭС пласта

В первом случае в подбираемой модели фиксировалось значение УЭС пласта в диапазоне от 40 до 70 Ом·м (рис. 3, верхняя часть). Для подбора сигналов варьировались параметры зоны проникновения, представленные на рис. 3, в.

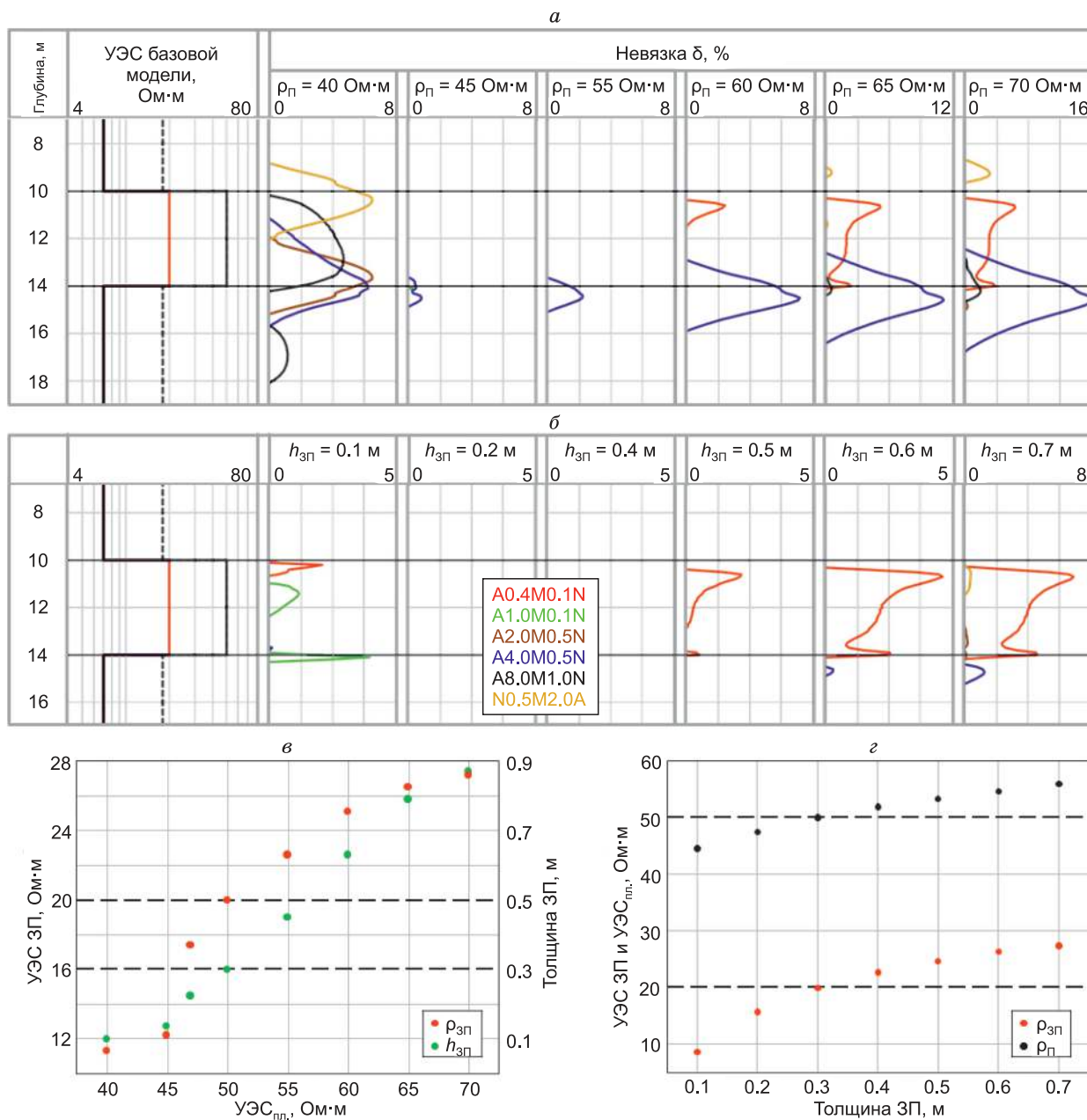


Рис. 3. Относительные невязки δ сигналов БКЗ в базовой модели и моделях, подобранных при инверсии с различным фиксированным значением УЭС пласта (а) и толщиной ЗП (б). Значения варьируемых параметров модели показаны внизу (в, з) в зависимости от значения фиксированного параметра.

Для всех вариантов значения УЭС пласта (40, 45, 55, 60, 65 и 70 Ом·м) очевиден плохой подбор сигнала зонда А4.0М0.5N в области подошвы коллектора. Во всех случаях значения δ на этом интервале получаются самые большие: 6, 1, 2, 7, 11 и 16 % соответственно. Для моделей с УЭС пласта 45 и 55 Ом·м значение δ для четырехметрового зонда достигает 1–2 %, а для остальных зондов – меньше допустимой погрешности измерения. При меньших, чем в базовой модели, значениях УЭС подбор сигналов идет за счет уменьшения толщины ЗП и снижения ее УЭС, при больших – наоборот, увеличиваются оба

параметра (см. рис. 3, в). Такое изменение приводит к приближению неизменной части, если ее УЭС меньше базового, и к отдалению – если больше, что позволяет алгоритму инверсии приблизить сигналы в варьируемой модели к сигналам в базовой.

Достаточно большие отклонения сигналов от базовых при УЭС = 40 Ом·м для четырех зондов А2.0М0.5N, А4.0М0.5N, А8.0М1.0N и N0.5М2.0A на всем интервале пласта вместе с примерно метровыми участками вмещающих пластов приводят к выводу о том, что при априорно заниженном УЭС не удастся с хорошей точностью подобрать сигналы, и большее

несовпадение длинных зондов при минимальной толщине ЗП – это признак более высокого УЭС неизменной части. В этом случае дополнительную информацию могут предоставить данные микрокаротажа. При переоценке значения УЭС коллектора необходимо анализировать данные зондов А0.4М0.1N и А4.0М0.5N и толщину ЗП, которая будет существенно больше ожидаемой по априорным данным о процессе бурения и примененном растворе.

Таким образом, из анализа результатов подбора параметров численной инверсии следует вывод, что для значений УЭС пласта в выбранной модели между около 40 и 60 Ом·м сигналы БКЗ можно подобрать вариацией параметров зоны проникновения (если пренебречь точностью подбора сигнала зонда А4.0М0.5N в области подошвы). При подборе моделей стоит обращать внимание на сигнал четырехметрового зонда в интервале около 1 м над подошвой высокоомного пласта и 2 м – под его подошвой.

Инверсия с фиксированной толщиной ЗП

Во втором случае подбирались параметры моделей с фиксированной толщиной ЗП, которая варьировалась от 0.1 до 0.7 м (см. рис. 3, б). Толщина ЗП может фиксироваться при инверсии исходя из предположений о свойствах коллектора и особенностях процесса фильтрации бурового раствора при известных параметрах бурения и времени, прошедшего после вскрытия пласта [Эпов и др., 2004; Нестерова и др., 2008; Лапковская и др., 2022].

Как и в случае с фиксированным УЭС пласта, толщина ЗП может варьироваться в широких пределах при подборе сигналов в пределах погрешности измерения: для 0.2 и 0.4 м находятся эквивалентные сочетания значений УЭС. Индикатором завышения оценки толщины ЗП оказывается невязка δ для самого короткого зонда, сигналы остальных зондов подбираются за счет варьирования значениями УЭС. Невязка при этом по форме и значениям примерно такая же, что и для случая с большими фиксированными УЭС, что объясняется повышением чувствительности короткого зонда к УЭС ЗП. При минимальной толщине 0.1 м к толщине ЗП становится чувствителен зонд А1.0М0.1N в метровом интервале над серединой пласта.

При уменьшении толщины ЗП относительно базовой модели подбор сигналов БКЗ происходит за счет уменьшения значений УЭС как в зоне проникновения (9 и 16 Ом·м для 0.1 и 0.2 м соответственно), так и в пласте (44 и 48 Ом·м). Увеличение толщины от 0.4 до 0.7 м приводит к увеличению УЭС обеих зон: ЗП подбирается в интервале 22–27 Ом·м, пласт – 52–56 Ом·м (см. рис. 3, в). То есть инверсия с фиксированной в широком диапазоне значений толщиной ЗП определяет УЭС пласта, равное 50 Ом·м, с ошибкой $\pm 12\%$, УЭС ЗП – в диапазоне от 9 до 27 Ом·м.

Из результатов проведенного анализа следует, что для толщины ЗП характерен большой диапазон значений, для которых можно подобрать сигналы БКЗ варьированием значений УЭС пласта и ЗП. Фактически, если сигнал короткого зонда окажется измененным в результате некорректной обработки или он будет исключен из инверсируемого набора, разница между сигналами в эквивалентных моделях практически не будет заметна: во всех случаях невязки для остальных зондов получаются меньше граничного значения. По этой причине диапазон изменения толщины ЗП при инверсии данных БКЗ целесообразно ограничивать, исходя из имеющейся априорной информации.

Таким образом, исследование особенностей процесса численной инверсии данных БКЗ в классе двумерных аксиально-симметричных моделей приводит к выводу о необходимости тщательного контроля определяемых значений толщины ЗП. Большая чувствительность сигналов к значениям УЭС в сравнении с толщиной ЗП обуславливает и порядок действий при проведении инверсии: при первых запусках подбираются значения УЭС измененных и неизменных частей пластов, далее добавляется и подбор толщины ЗП с контролем значений заданием диапазона изменения согласно априорной информации. Уменьшение области эквивалентности также достигается включением в инверсируемый набор данных других зондов электрокаротажа: индукционного (в том числе многозондового и высокочастотного) и фокусирующего бокового.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам численного моделирования сигналов БКЗ в геоэлектрической модели коллектора с УЭС неизменной части 50 Ом·м и понижающей зоной проникновения (УЭС 20 Ом·м, толщина 0.3 м) неправильная оценка одного из параметров приводит к следующим последствиям:

- изменение УЭС пласта на 10 % отражается в повышенной невязке сигналов зондов А2.0М0.5N и N0.5M2.0A, на 20 % – всех зондов, кроме короткого, изменение толщины ЗП на 10 % значимо повышает невязку сигналов А1.0М0.1N, А2.0М0.5N и N0.5M2.0A, а также А0.4М0.1N – при толщине около 0.1 м;
- невязки большей амплитуды характерны для сигналов, несогласованных по глубине с положением границ пласта;
- повышение невязки δ при изменении УЭС пласта или толщины ЗП происходит на интервале пласта и в области возле границ во вмещающих пластах, а интервалы повышенных значений из-за неувязки сигналов по глубине локализуются рядом с границами и примерно пропорциональны длине зондов.

Двумерная численная инверсия сигналов БКЗ для геоэлектрической модели нефтегазоносного

коллектора с понижающей ЗП имеет следующие особенности:

- нельзя проигнорировать наличие понижающей ЗП;
- завышение УЭС коллектора отражается в большой невязке зонда A4.0M0.5N, занижение – зондов A2.0M0.5N, A4.0M0.5N, A8.0M1.0N и N0.5M2.0A;
- при значении глубины проникновения в диапазоне 0.1–0.5 м алгоритм инверсии успешно подбирает сигналы варьированием значений УЭС пласта и ЗП;
- индикатором завышения толщины ЗП при значении более 0.5 м является повышенная невязка зонда A0.4M0.1N;
- УЭС неизменной части коллектора, равное 50 Ом·м, может быть определено с погрешностью до 12 %.

Главным методическим результатом анализа невязок на примере синтетических сигналов БКЗ на интервале нефтегазонасыщенных коллекторов можно считать следующее. В очень простой по строению модели коллектора диаграммы поточно рассчитанных невязок достаточно сложны по форме. В более реалистичном тонкослоистом разрезе формы диаграмм еще более осложнены многочисленными максимумами в области границ пластов с разными значениями УЭС. Возможно появление дополнительных максимумов невязок из-за искажения измеренных сигналов БКЗ в результате сглаживания в экстремумах при переходе контрастных границ (сглаживание происходит при пересчете на глубинные отсчеты и при последующей увязке по глубине). Поэтому критерием успешности численной инверсии в значительной степени остается также визуальное сравнение измеренных и синтетических сигналов.

При выявлении по диаграммам невязок проблемных участков подбора необходимо обращать внимание не на локальные максимальные значения, а на интервалы повышенных значений, длина которых соответствует толщине пластов и – в меньшей степени – длине зонда. Также необходимо увеличивать вес в минимизируемой функции для тех зондов, сигналы которых наиболее чувствительны к отдельным параметрам коллектора. При значительном повышении невязки зонда A0.4M0.1N необходимо увеличить его вес (коэффициент) в невязке и уточнить инверсией параметры ЗП, при повышении невязки зонда A4.0M0.5N – уточнить УЭС неизменной части коллектора, также увеличив вес для этого зонда. При инверсии целесообразно ограничивать толщину ЗП при наличии априорной информации об этом параметре. Вследствие выявленных особенностей сигналов БКЗ на интервале высокоомных коллекторов точность результата инверсии в классе двумерных моделей повышается комплексированием с одновременно измеренными кондиционными сигналами ИК и БК, учетом данных каверномера и резистивиметра, а также аккуратной увязкой данных по глубине.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ-2022-0026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

ЛИТЕРАТУРА

- Дворкин В.И., Лаздин А.Р., Сакаев Р.Ш., Николаев Н.А. (2021). Определение насыщения пластов методом индукционного каротажа в скважинах, пробуренных на высокоминерализованных растворах // Нефтегазовое дело, № 1 (19), с. 16–23, DOI: [10.17122/ngdelo-2021-1-16-23](https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-1-16-23).
- Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К., Сурков В.С., Трофимук А.А., Эрвье Ю.Г. (1975). Геология нефти и газа Западной Сибири. М., Недра, 680 с.
- Лапковская А.А., Сухорукова К.В., Нечаев О.В., Петров А.М. (2022). Восстановление двумерной геоэлектрической модели численной инверсией сигналов гальванического и индукционного каротажа // Геофизические технологии, № 1, с. 118–133, DOI: [10.18303/2619-1563-2022-1-118](https://doi.org/10.18303/2619-1563-2022-1-118).
- Нестерова Г.В., Кашеваров А.А., Ельцов И.Н. (2008). Эволюция зоны проникновения по данным повторного каротажа и гидродинамического моделирования // Каротажник, № 1 (166), с. 52–68.
- Нечаев О.В., Глинских В.Н. (2017). Быстрый прямой метод решения обратной задачи электрического каротажа в нефтегазовых скважинах // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии, т. 15, № 4, с. 53–63, DOI: [10.25205/1818-7900-2017-15-4-53-63](https://doi.org/10.25205/1818-7900-2017-15-4-53-63).
- Нечаев О.В., Глинских В.Н. (2018). Трехмерное моделирование и инверсия данных комплекса методов электрокаротажа в моделях сред с наклоном главных осей тензора электрической анизотропии // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии, т. 16, № 4, с. 127–139, DOI: [10.25205/1818-7900-2018-16-4-127-139](https://doi.org/10.25205/1818-7900-2018-16-4-127-139).
- Петров А.М., Даниловский К.Н., Сухорукова К.В., Леоненко А.Р., Лапковская А.А. (2021). Нейросетевой подход к экспресс-моделированию сигналов электрокаротажа в реалистичных моделях сложнопостроенных терригенных отложений // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, № 4 (48), с. 70–78, DOI: [10.20403/2078-0575-2021-4-70-78](https://doi.org/10.20403/2078-0575-2021-4-70-78).
- Прибор комплексный электрического каротажа К1А-723-М, К1А-723-МТ. Руководство по эксплуатации. (2016). ООО НПО «ГЕОПРОМ», 67 с.
- Сухорукова К.В., Нестерова Г.В., Примаков С.А. (2022). Выявление окаймляющей зоны при совместной инверсии сигналов гальванического и электромагнитного каротажного зондирования, измеренных одновременно и в разное время // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, № 11с, с. 77–86, DOI: [10.20403/2078-0575-2022-11с-77-86](https://doi.org/10.20403/2078-0575-2022-11с-77-86).
- Сухорукова К.В., Петров А.М., Лапковская А.А., Ананьев С.В. (2025). Методические аспекты комплексирования данных электрокаротажа при инверсии в классе двумерных осесимметричных моделей // Геология и геофизика, т. 66, № 4, с. 513–522, DOI: [10.15372/GiG2024177](https://doi.org/10.15372/GiG2024177), EDN: [TMFLJT](https://www.edn.ru/TMFLJT).
- Эпов М.И., Ельцов И.Н., Кашеваров А.А., Соболев А.Ю., Ульянов В.Н. (2004). Эволюция зоны проникновения по данным электромагнитного каротажа и гидродинамического моделирования // Геология и геофизика, т. 45, № 8, с. 1033–1044, EDN: [YRJIWC](https://www.edn.ru/YRJIWC).
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Лапковская А.А., Леоненко А.Р., Петров А.М., Сухорукова К.В., Горносталев Д.И. (2021). Современное программно-методическое обеспечение интерпретации комплекса данных скважинной

- электрометрии // Геодинамика и тектонофизика, т. 12, № 3S, с. 669–682, DOI: [10.5800/GT-2021-12-3s-0546](https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3s-0546).
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Петров А.М., Примаков С.А., Лапковская А.А., Сухорукова К.В., Лежнин Д.С. (2024а).** Определение удельного электрического сопротивления коллекторов нефти и газа с применением численной инверсии данных электрокаротажа // Наука и техника в газовой промышленности, № 1, с. 25–34.
- Эпов М.И., Примаков С.А., Сухорукова К.В., Лежнин Д.С. (2024б).** Геоэлектрические модели нижнемеловых отложений Широкого Приобья по результатам многопластовой инверсии данных электрокаротажа // Георесурсы, т. 26, № 4, с. 153–162, DOI: [10.18599/grs.2024.4.19](https://doi.org/10.18599/grs.2024.4.19).
- Allen D., Auzeais F., Dussan E., Goocle P., Ramakrishnan T.S., Schwartz L., Wilkinson D., Fordham E., Hammond P., Williams R. (1991).** Invasion revisited // Oilfield Rev., v. 3 (3), p. 10–23.
- Епов М.И., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V., Petrov A.M., Rabinovich M., Weston H., Tyurin E., Wang G.L., Abubakar A., Claverie M. (2020).** Comparison of the Russian and Western resistivity logs in typical Western Siberian reservoir environments: A Numerical Study // Petrophysics, v. 61 (1), p. 38–71, DOI: [10.30632/PJV61N1-2020a1](https://doi.org/10.30632/PJV61N1-2020a1).
- Petrov A.M., Leonenko A.R., Danilovskiy K.N., Nechaev O.V. (2025).** Fast 2D forward modeling of electromagnetic propagation well logs using finite element method and data-driven deep learning // Artif. Intell. Geosci., v. 6 (1), 100112, DOI: [10.1016/j.aiig.2025.100112](https://doi.org/10.1016/j.aiig.2025.100112).