



АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ РАССТАНОВКИ ГРАНИЦ ПЛАСТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДВУМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА НЕФТЕГАЗОВЫХ СКВАЖИН

А. М. Петров, К. Н. Даниловский, О. О. Асанов, И. А. Москаев, С. А. Примаков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики (ИНГГ) им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

Инверсия данных электрокаротажа на базе двумерных осесимметричных моделей среды является надежным способом определения удельного электрического сопротивления пластов-коллекторов – характеристики, тесно связанной с их флюидонасыщением. Возможности широкого применения такого подхода сегодня ограничены прежде всего трудоемкостью создания начального приближения геоэлектрической модели среды, ключевой этап построения которого – расчленение исследуемого разреза на относительно однородные по вертикали пласты. Представлен новый алгоритм расстановки границ пластов, ориентированный на решение задачи создания стартовой модели среды для двумерной инверсии данных электрокаротажа. Алгоритм представляет собой вариацию градиентного подхода и характеризуется производительностью, достаточной для обработки протяженных интервалов каротажа в интерактивном режиме. Возможности алгоритма демонстрируются путем сравнения с результатами применения алгоритмов, реализованных в распространенных пакетах обработки и интерпретации данных ГИС, а также на результатах двумерной инверсии практических данных с количественными оценками точности определения положения границ.

Ключевые слова: геофизические исследования в скважинах, автоматизированная обработка данных, расстановка границ пластов, пластовая разбивка, двумерная инверсия данных электрокаротажа, терригенные отложения, баженовская свита.

AUTOMATING THE BED BOUNDARIES DETECTION PROCEDURE FOR 2D INVERSION OF OIL AND GAS WELL RESISTIVITY LOGS

A. M. Petrov, K. N. Danilovskiy, O. O. Asanov, I. A. Moskaev, S. A. Primakov

A.A.Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Inversion of resistivity logs based on two-dimensional axisymmetric models of the medium is a reliable way to determine the electrical resistivity of reservoir beds – a characteristic closely related to their fluid saturation. Possibilities of wide application of such approach are limited today, first of all, by the laboriousness of creating an initial approximation of the geoelectric model of the medium, the key stage in the construction of which is the splitting of the studied section into relatively vertically homogeneous beds. The paper presents a new algorithm for bed boundaries detection, which is focused on solving the problem of creating an initial geoelectric model of the medium for two-dimensional inversion of resistivity logging data. The developed algorithm is a variation of the gradient approach and, its software implementation is characterized by performance sufficient to process extended logging intervals in an interactive mode. Capabilities of the algorithm are demonstrated by comparing with the results obtained by algorithms implemented in common well log data processing and interpretation packages, as well as on the results of two-dimensional inversion of practical data with quantitative estimates of the bed boundaries positioning accuracy.

Keywords: geophysical well logging, automated data processing, bed boundaries detection, sectional layering, two-dimensional inversion of resistivity logs, terrigenous deposits, Bazhenov Formation.

DOI 10.20403/2078-0575-2022-11c-87-95

Инверсия данных электрокаротажа на базе двумерных осесимметричных моделей околоскважинного пространства (далее – двумерная инверсия) – надежный способ оценки удельного электрического сопротивления (УЭС) не измененных фильтрацией бурового раствора частей пластов-коллекторов, вскрытых субвертикальными скважинами [7]. Оценка УЭС важна, поскольку эта характеристика напрямую связана с нефтенасыщением породы и является неотъемлемым этапом интерпретации данных геофизических исследований в скважинах (ГИС). Однако широкое применение двумерной инверсии ограничивается ее высокой ресурсоемкостью, сложностью автоматизации некоторых этапов, а также необходимостью тщательного контроля за

результатом. На Западе для подобных способов интерпретации данных электрокаротажа применяют термин «продвинутая обработка» (англ. advanced processing) [10], подчеркивающий их отличие от традиционных упрощенных и менее эффективных подходов.

Ресурсоемкость решения обратных задач в первую очередь связана с производительностью алгоритмов моделирования каротажных сигналов. Для повышения производительности в двумерной постановке применяют параллельные вычисления [12], в том числе с использованием графических ускорителей [2]. В последние годы широкое распространение получают приближенные алгоритмы моделирования, основанные на применении методов

машинного обучения [5]. Такие алгоритмы характеризуются многократным ускорением по сравнению с численными аналогами при незначительной потере в точности вычислений.

Появление эффективных способов расчета сигналов в детальных двумерных моделях среды способствует распространению двумерной инверсии как инструмента решения практических задач. Нерешенной остается проблема автоматизации этапа подготовки набора данных, необходимого для выполнения численной инверсии. Этот этап прежде всего включает создание стартовой модели околоскважинного пространства, качество которой напрямую влияет как на скорость инверсии, так и на точность оценки электрофизических характеристик изучаемого разреза.

Ключевой этап построения стартовой модели – так называемая пластовая разбивка, т. е. расчленение исследуемого разреза на относительно однородные по вертикали пласты. Задача автоматизации данного процесса не нова, однако известные решения большей частью ориентированы на расчленение разреза по комплексу методов в рамках традиционного попластового подхода к интерпретации данных ГИС. При этом следует различать задачи литологического расчленения разреза по группе методов и выделение в разрезе пластов с условно однородными по вертикали свойствами.

Поскольку двумерный подход к интерпретации данных электрокаротажа не предполагает снятия пластовых отсчетов и введения коррекций за неоднородность выделенных пластов, для выполнения инверсии критически важно расчленение разреза на пласты, условно однородные именно по электрофизическим свойствам. Избыточная детальность расчленения приводит к неоправданному возрастанию числа параметров геоэлектрической модели и, как следствие, к расширению области эквивалентности, а недостаточная детальность, с другой стороны, – к невозможности подбора практических данных. Пропуск отдельных пластов, оказывающих явное влияние на участвующие в инверсии данные, может привести к недостоверной оценке свойств среды на целом интервале глубин выше и ниже неучтенного пласта.

Традиционные подходы к автоматической расстановке границ – дисперсионный и градиентный. Дисперсионный подход основывается на вычислении дисперсий сигнала в окрестности каждой точки измерения по глубине. Считается, что вероятность существования границы тем выше, чем сильнее отличается общая дисперсия в окрестности рассматриваемой точки от дисперсий на полуинтервалах относительно нее. Градиентный подход основывается на анализе производной каротажного сигнала по глубине. Положения границ пластов относят к экстремумам производной, т. е. к областям, характеризующимся наибольшей скоростью изменения сигналов. При этом среди найденных экстремумов

обычно отбирают наибольшие по амплитуде, исходя из предположения, что они соответствуют наиболее значимым в контексте интерпретации границам [8]. Однако на практике это не всегда верно. Кроме того, использование порогового отсека может приводить к пропуску границ при плавном изменении свойств с глубиной. Оба подхода подразумевают симметричность исследуемых каротажных сигналов, но могут применяться и для слабо асимметричных сигналов, например, данных несимметричных зондов индукционного или электромагнитного каротажей [1].

Для сильно асимметричных сигналов известны подходы, базирующиеся на применении искусственных нейронных сетей [4]. Отдельно следует выделить алгоритмы расчленения разреза, основанные на анализе не самих измеряемых каротажных сигналов, а результатов их трансформаций на основе, например, вейвлет-преобразования [9] или преобразования Уолша [11]. Такие алгоритмы эффективны для решения задачи литологического расчленения разреза, но не для создания стартового приближения геоэлектрической модели, так как ограничены в возможностях учета особенностей каротажных методов.

Общая черта большинства алгоритмов, реализованных в распространенных пакетах обработки и интерпретации данных ГИС, – определение значимости границ пластов через амплитуду экстремумов производной сигнала или некоторой индикаторной функции, что часто приводит к пропуску границ на интервалах плавного изменения свойств с глубиной. Также часть алгоритмов не позволяет выделять тонкие, но контрастные по свойствам пропластки без значительного увеличения общей детальности разбивки исследуемого интервала.

В работе представлен новый алгоритм расстановки границ пластов, отличительной особенностью которого является ориентированность на решение задачи создания стартовой модели среды для двумерной инверсии данных электрокаротажа. Разработанный алгоритм представляет собой вариацию градиентного подхода и характеризуется высоким быстродействием, обеспечивающим возможность его использования в интерактивном режиме.

Алгоритм расстановки границ пластов

Алгоритм принимает на вход каротажные данные на интервале скважины, который требуется расчленить на пласты. Поскольку он является вариацией градиентного подхода, для корректной работы в качестве входных данных могут использоваться только сигналы методов, характеризующиеся симметричными или слабо асимметричными формами при пересечении пластов в однородной вмещающей среде. Это, например, фокусированный боковой (БК) и низкочастотный индукционный (ИК) каротаж. Помимо загрузки данных, интерпретатор задает значения трех настроечных параметров

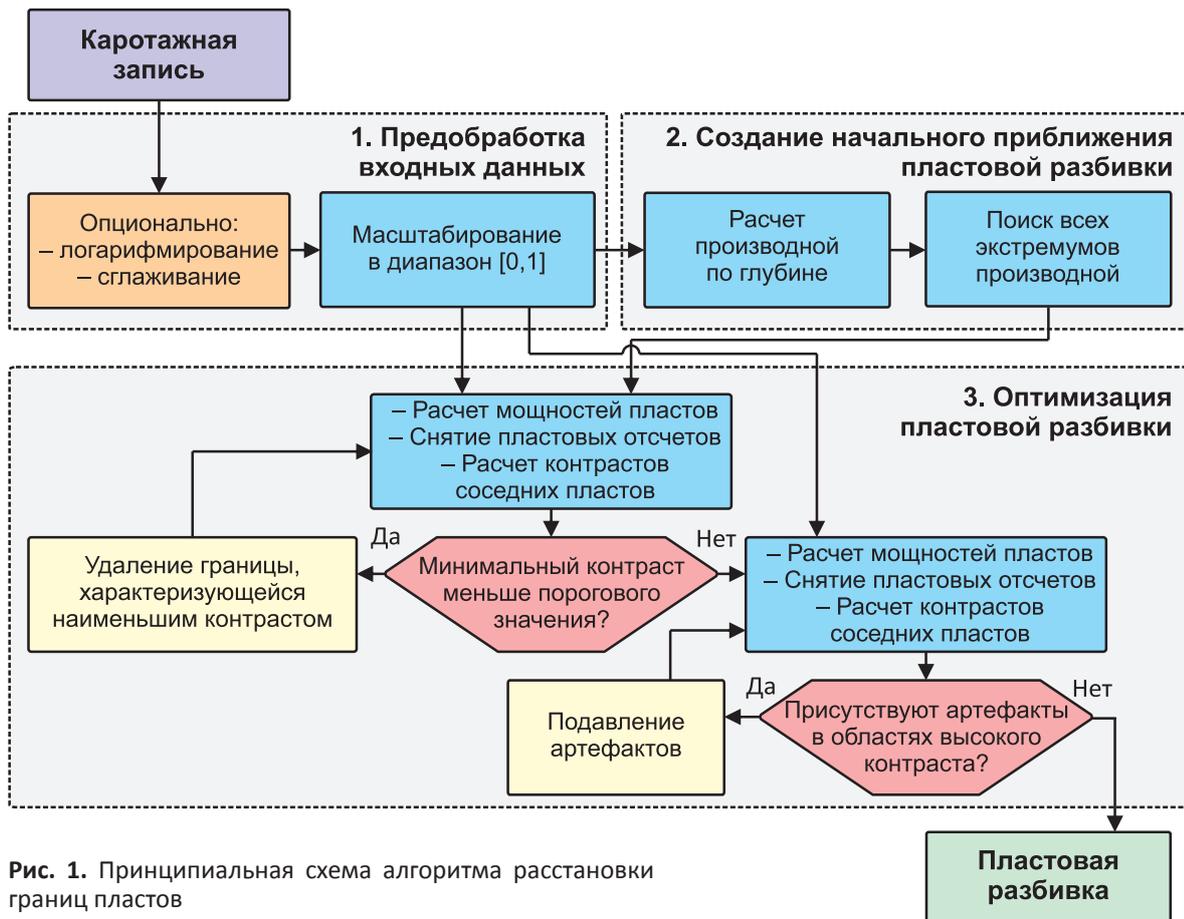


Рис. 1. Принципиальная схема алгоритма расстановки границ пластов

($contrast_threshold$, h_{min} и $resolution_penalty$), которые позволяют получать пластовые разбивки различной детальности с учетом специфики решаемой интерпретационной задачи, особенностей используемых электрокаротажных методов и геоэлектрических условий на исследуемом интервале.

Рассмотрим алгоритм на примере применения к единичной каротажной диаграмме. Концептуально процесс создания пластовой разбивки разделяется на три этапа. На первом этапе выполняется предобработка входных данных для учета особенностей сигналов и обеспечения единообразного влияния настроечных параметров при работе с данными различных методов каротажа. На втором этапе создается начальное приближение пластовой разбивки с выделением границ для каждой точки экстремума производной сигнала по глубине. На заключительном третьем этапе излишне детальное начальное приближение пластовой разбивки оптимизируется путем объединения наименее контрастных пластов, а также удаления пластов-артефактов в окрестностях границ наиболее контрастных пластов (рис. 1).

Предобработка данных проводится следующим образом. При использовании в качестве входных данных каротажных сигналов в виде кажущихся УЭС выполняется их логарифмирование. Шаг необходим, поскольку диапазон изменения УЭС горных пород очень широк, при этом часто более важной информацией является относительное изменение

УЭС, а не его абсолютное значение: мануальное выделение границ интерпретаторами также производится при отображении данных в логарифмическом масштабе. Опциональный шаг – сглаживание данных, позволяющее ускорить работу алгоритма при работе с зашумленными входными каротажными сигналами за счет устранения избыточной детальности начального приближения пластовой разбивки. Далее каротажные данные приводятся к диапазону значений от 0 до 1, за счет чего достигается единообразие влияния настроечных параметров алгоритма при работе с данными различных геофизических методов.

Для создания начального приближения пластовой разбивки на втором этапе работы алгоритма рассчитывается производная анализируемого сигнала с применением классической пятиточечной аппроксимационной схемы:

$$\frac{ds(z_0)}{dz} \approx \frac{s(z_0 - 2\Delta) - 8s(z_0 - \Delta) - s(z_0 + 2\Delta)}{12\Delta},$$

где s – предобработанный каротажный сигнал; z – глубина по стволу скважины; z_0 – глубина, на которой рассчитывается производная; Δ – шаг дискретизации каротажных данных.

Далее выполняется поиск всех экстремумов производной каротажного сигнала. Их положения соответствуют точкам перегиба каротажной кривой (в логарифмическом масштабе, если сигнал представлен в виде кажущегося УЭС), что для сигналов

симметричных зондов традиционно считается свидетельством наличия границы на данной глубине или в ее ближайшей окрестности [3]. В действительности на интервалах переслаивания пластов малой мощности положения границ даже при обработке симметричных и локальных каротажных сигналов могут отличаться от положений экстремумов производной. Однако это различие обычно невелико и положения границ быстро уточняются в процессе инверсии. При этом смещение границ от положений экстремумов производной индивидуально для различных каротажных зондов и существенно зависит от геоэлектрических условий измерений. Таким образом, целесообразным решением представляется создание универсального алгоритма, не учитывающего такие смещения, но имеющего более широкую область применимости.

Полученная в результате анализа производной каротажного сигнала пластовая разбивка обычно является чрезмерно детальной: количество точек перегиба на каротажных диаграммах чаще всего значительно превышает число пластов, требуемое для построения качественной стартовой модели для инверсии. Традиционный градиентный подход к выделению границ подразумевает введение отсечки по пороговому значению амплитуды найденных экстремумов. Однако на практике величина производной не всегда отражает значимость геоэлектрической границы: на интервалах с плавным изменением свойств разреза по глубине границы характеризуются низкими значениями экстремумов производной сигнала и могут быть пропущены. Поэтому предлагаемым алгоритмом выделяются границы, соответствующие всем экстремумам вне зависимости от их амплитуды, а проблема чрезмерной детальности решается дальнейшей оптимизацией полученной разбивки для лучшего соответствия требованиям конкретной решаемой задачи.

В рамках разработанного алгоритма наиболее комплексная процедура – оптимизация начального приближения пластовой разбивки. При оптимизации целесообразно работать не только с самими границами пластов, но также и с величинами, характеризующими значимость этих границ в контексте интерпретации. Наиболее естественной характеристикой является контраст значений физических параметров на границах пластов. Для оценки таких контрастов реализован вспомогательный алгоритм снятия пластовых значений, учитывающий толщину рассматриваемого пласта, количество экстремумов каротажного сигнала на интервале пласта, их положение относительно границ пласта и др. В зависимости от значений анализируемых характеристик такой алгоритм возвращает в качестве пластового значения в экстремальной точке, среднее значение либо их линейную комбинацию (рис. 2).

Для границ, разделяющих мощные пласты, величина контрастности $contrast$ определяется как

$$contrast = \left| reading_{top} - reading_{bot} \right|,$$

где $reading_{top}$ и $reading_{bot}$ – пластовые значения измеряемой характеристики в выше- и нижележащем пластах соответственно.

В случае, если толщина прилегающего к границе пласта меньше значения h_{min} , в значение контрастности границы дополнительно вносится штраф $contrast_penalty$ в виде мультипликативного коэффициента, возрастающего с уменьшением толщины пласта. Если под этот критерий попадают оба пласта вокруг границы, то штраф вводится дважды:

$$contrast_penalty = \frac{h_{top} h_{bot}}{h_{min}^2},$$

где h_{top} и h_{bot} – толщины выше- и нижележащего пласта соответственно.

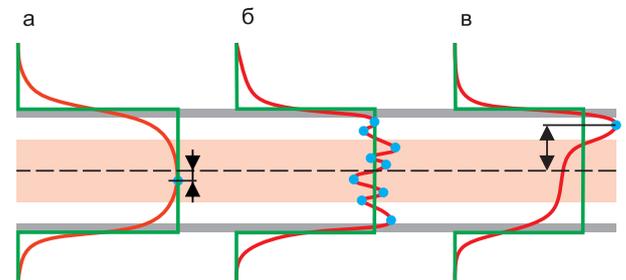


Рис. 2. Принцип снятия пластовых значений в различных случаях: а – экстремальное значение сигнала, когда на интервале пласта только один экстремум, находящийся вблизи его центра (область выделена розовым цветом); б – среднее значение сигнала при наличии на интервале пласта двух и более экстремумов; в – линейная комбинация экстремального и среднего значений сигнала, когда на интервале пласта только один экстремум, при этом находящийся далеко от центра; серым цветом отмечены области перехода на границах пласта, исключаемые из анализа

Значения контрастности рассчитываются для всех границ начального приближения пластовой разбивки. Затем граница, характеризующаяся наименьшим значением $contrast$, удаляется из разбивки, после чего снимается пластовое значение измеряемой характеристики в пределах нового слоя, образовавшегося при слиянии двух пластов выше и ниже удаленной границы. Также обновляются значения контрастов границ, прилегающих к новому слою. Процесс повторяется итерационно, пока минимальный контраст границ в разбивке не станет выше порогового значения $contrast_threshold$. Таким образом, алгоритм позволяет управлять детальностью создаваемой разбивки без жесткого ограничения минимальной толщины выделяемых пластов. Тем самым обеспечивается как корректность выделения в разрезе контрастных пропластков малой толщины, так и возможность адаптации результата под конкретную интерпретационную задачу путем варьирования значений двух настроечных параметров.

Заключительным шагом оптимизации пластовой разбивки является удаление пластов-артефактов, образующихся в областях переходных зон между контрастными пластами. Рассмотрим пример расстановки границ по данным метода потенциала самополяризации (ПС). В области плавного изменения сигнала ПС на интервале $\times \times 12,5 - \times \times 13,5$ м наблюдается несколько экстремумов его производной, связанных с геологическим или технологическим шумом. Вследствие этого начальное приближение разбивки содержит лишние границы (рис. 3). Процедура слияния пластов по признаку наименьшего контраста не позволяет полностью избавиться от таких артефактов, так как снимаемые пластовые отсчеты искажаются вследствие низкой разрешенности сигнала ПС по глубине.

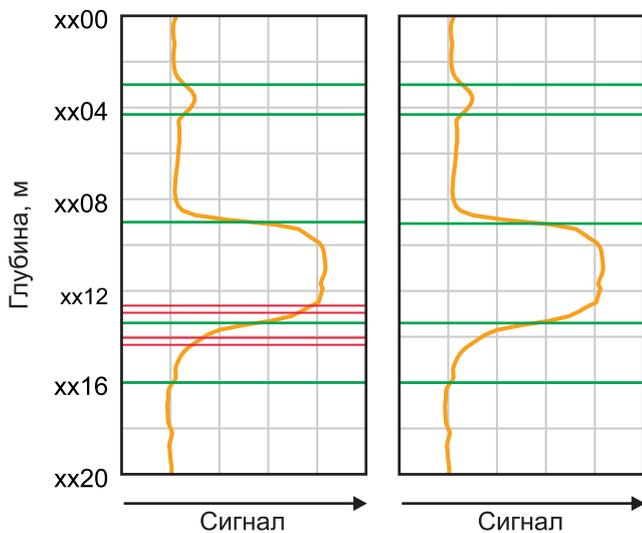


Рис. 3. Результат применения процедуры удаления пластов-артефактов в областях переходных зон между контрастными пластами; красными линиями показаны границы, исключенные из итоговой пластовой разбивки

Однако подобного рода артефакты также имеют характерные признаки, на основании анализа которых могут быть идентифицированы в автоматическом режиме. В случае если на интервале пласта каротажный сигнал монотонен, анализируется отношение величины изменения сигнала в пределах пласта к его толщине:

$$\frac{s_{\max} - s_{\min}}{h} \geq \text{resolution_penalty},$$

где s_{\max} и s_{\min} – наибольшее и наименьшее значения каротажного сигнала в пределах рассматриваемого пласта; h – толщина пласта.

При соблюдении данного условия границы, являющиеся кровлей и подошвой пласта-артефакта, заменяются на одну, при этом ее положение определяется отношением амплитуд производной на глубинах удаленных границ. Как и в предыдущем случае, в слоях, измененных оптимизацией разбивки, заново снимаются пластовые значения, обновляются значения контрастности прилегающих

границ. Процесс повторяется до тех пор, пока в итоговой разбивке не останется пластов-артефактов.

Аналогичным образом автоматизируется процедура выделения пластов по двум и более каротажным диаграммам. Для применения алгоритма к группе диаграмм достаточно объединить наборы границ, выделенные на этапе создания начального приближения пластовой разбивки по каждой из них, на этапе оптимизации разбивки рассчитывать значения контрастности границ на основе взвешенной суммы пластовых отсчетов и рассматривать как потенциальные артефакты только те пласты, на интервалах которых монотонны все каротажные сигналы.

Результаты и обсуждение

Качественно оценить корректность работы разработанного алгоритма можно экспертно путем сравнения результатов его применения с результатами применения других аналогичных алгоритмов на типовых данных.

Рассмотрим пример расстановки границ разработанным алгоритмом и двумя алгоритмами-аналогами, реализованными в широко распространенных пакетах обработки и интерпретации данных ГИС (далее – алгоритмы «Х» и «У»). Тестирование проводится на данных БК, измеренных на интервале терригенных юрских отложений Широтного Приобья. На рис. 4 представлены два типа пластовых разбивок: детальные (слева) для построения высоко разрешенных геоэлектрических моделей целевых интервалов и более грубые (справа) для решения задачи оценки интегральных свойств пачек пластов и построения моделей отложений, перекрывающих и подстилающих целевые интервалы. Разбивки содержат по 35 и 16 границ соответственно; их фиксированное количество позволяет напрямую сравнить результаты, полученные различными алгоритмами. При запуске всех алгоритмов подбирались такие значения настроечных параметров, которые позволяли для заданного количества границ получить результат, наиболее близкий к оптимальному, по мнению интерпретатора.

Анализ данных на рис. 4 показывает, что в случае детальной разбивки результат работы разработанного алгоритма достаточно близок к пластовой разбивке, полученной алгоритмом Х. Однако данный алгоритм не выявляет границ в окрестностях глубин $\times \times 57,3$ и $\times \times 86,8$ м, где наблюдается значительная неоднородность отложений. Выделение этих границ необходимо для построения корректной геоэлектрической модели. Снижение детальности разбивки приводит к пропуску алгоритмом Х одной из наиболее контрастных границ в верхней части интервала в окрестностях глубины $\times \times 61$ м при излишней детальности расчленения на интервале $\times \times 82 - \times \times 83$ м.

Применение алгоритма У в обоих случаях приводит к не вполне корректной расстановке границ,

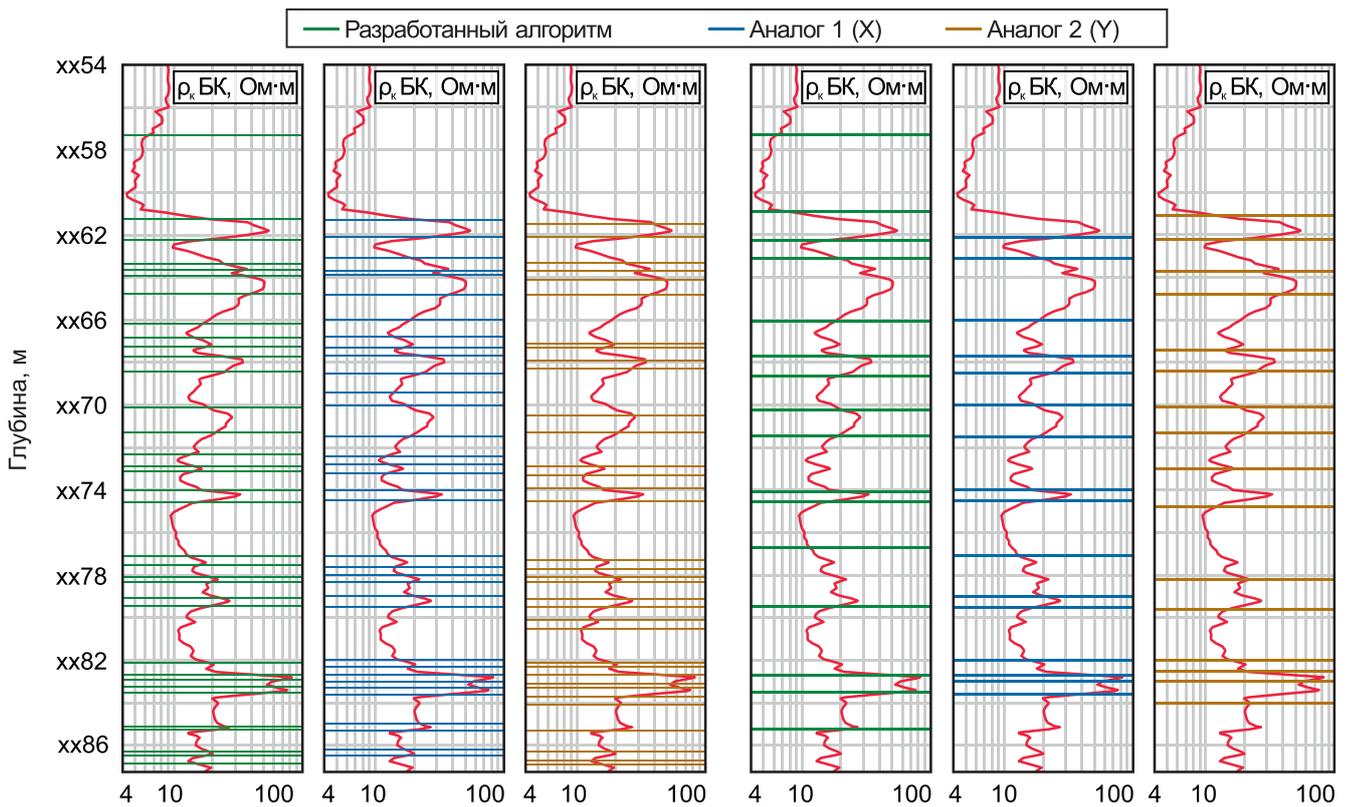


Рис. 4. Примеры расстановки границ пластов по данным БК на интервале юрских отложений с применением разработанного алгоритма и реализованных в популярных программных пакетах алгоритмов-аналогов

в том числе к появлению границ в точках экстремумов сигнала и выделению менее значимых границ при пропуске более значимых, соответствующих большему изменению сигнала и большей толщине пластов.

Несмотря на небольшое смещение части границ относительно положений, оптимальных, по мнению специалиста-интерпретатора, пластовые разбивки, полученные разработанным алгоритмом, представляются наиболее подходящими для решения означенных задач. Алгоритм позволяет оценить положения всех наиболее значимых границ, корректно ранжируя их по важности в зависимости от детальности разбиения. Уточнение положений выделенных границ целесообразно проводить уже в процессе численной инверсии данных с учетом особенностей анализируемых каротажных данных.

Количественно оценить точность расстановки границ можно средствами двумерной инверсии. Будем считать детальность разбивки оптимальной, если созданная на ее основе геоэлектрическая модель характеризуется минимальным количеством пластов, достаточным для объяснения измеренных сигналов электрокаротажа с заданной точностью. Выполнив инверсию данных сначала с фиксированными положениями границ, а затем добавив их в список подбираемых параметров модели, можно оценить точность позиционирования каждой границы относительно оптимального в терминах наименьшей невязки практических и рассчитанных в итоговой модели данных.

Рассмотрим пример инверсии измеренных на интервале терригенных меловых отложений данных высокочастотного индукционного каротажного изо-параметрического зондирования (ВИКИЗ) (рис. 5), выполненной с применением программного комплекса AlondraWL [6]. Пластовая разбивка, сгенерированная разработанным алгоритмом по данным зонда DF07, используется при создании стартовой геоэлектрической модели среды. В интервалах распространения проницаемых пород, выделенных по данным гамма-каротажа (ГК), ПС, а также по расхождению уровней сигналов зондов ВИКИЗ, в каждый выделенный алгоритмом пласт добавлена вертикальная граница, разделяющая пласт на зону проникновения фильтрата бурового раствора (ЗП) и неизменную часть. Значения УЭС всех блоков среды, за исключением скважины, в стартовой модели заданы равными 10 Ом·м, относительной диэлектрической проницаемости (ДП) для всех блоков модели – равными 10. Радиус скважины 0,108 м, ее УЭС – 2 Ом·м.

Инверсия данных ВИКИЗ осуществлялась в два этапа. На первом этапе подбирались значения УЭС блоков среды, ДП непроницаемых пластов и ширины ЗП. На втором этапе в список варьируемых параметров добавлялись положения горизонтальных границ. ДП пластов-коллекторов и параметры скважины были фиксированы на обоих этапах. Таким образом, были получены две геоэлектрические модели исследуемого интервала. Первая модель (модель 1) соответствует наименьшей достигнутой

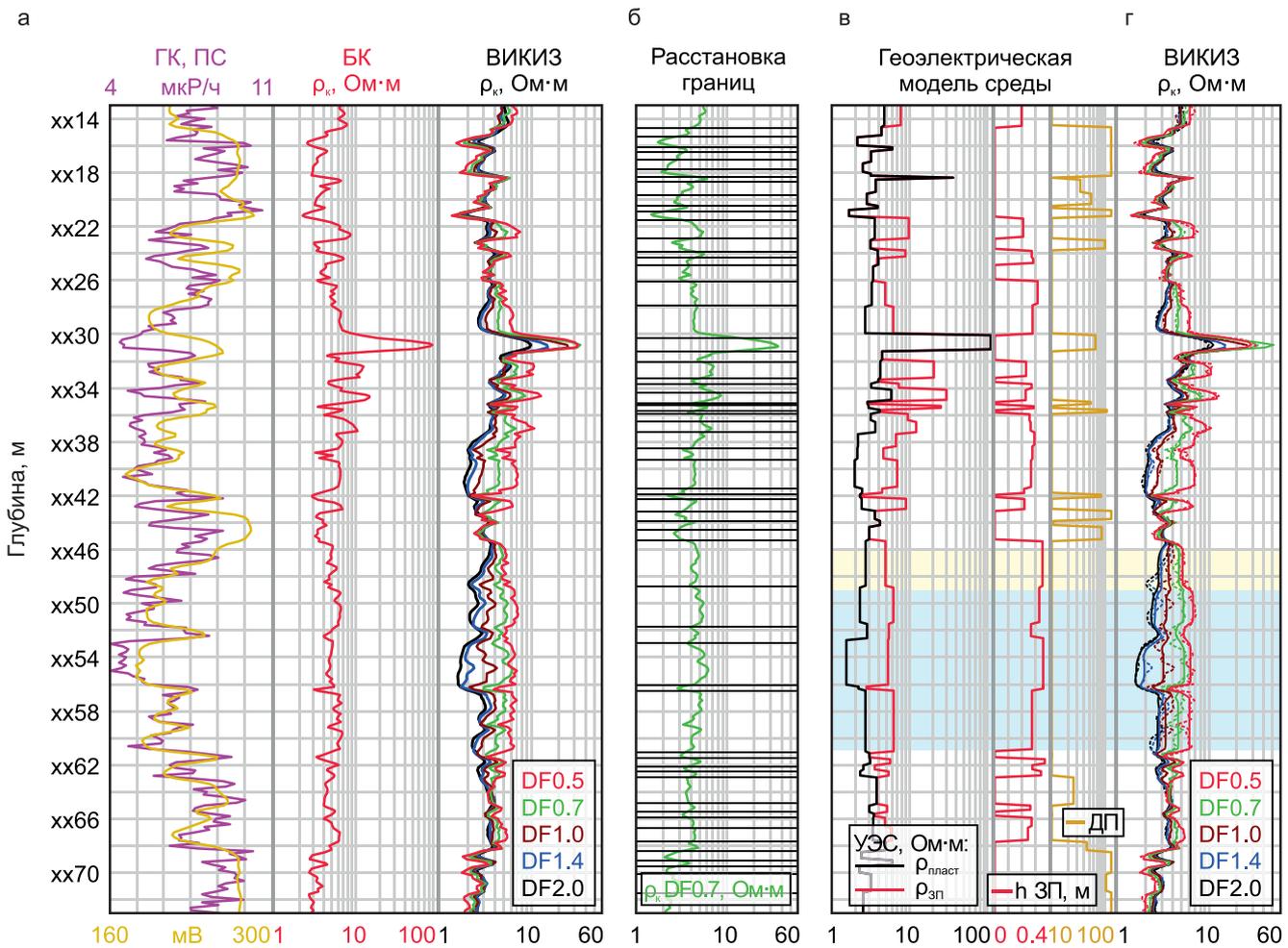


Рис. 5. Пример двумерной инверсии данных ВИКИЗ на интервале терригенных меловых отложений: а – практические данные ГК, ПС, БК и ВИКИЗ; б – границы, полученные разработанным алгоритмом по данным зонда DF07 ВИКИЗ; в – итоговая геоэлектрическая модель, полученная инверсией с уточнением положений горизонтальных границ; г – измеренные (пунктир) и рассчитанные в модели (сплошные линии) сигналы ВИКИЗ

невязке практических и синтетических данных при зафиксированных положениях горизонтальных границ, определенных разработанным алгоритмом; вторая – наименьшей достигнутой невязке при уточненных положениях границ (модель 2, см. рис. 5).

В целом, наблюдается хорошее совпадение измеренных и рассчитанных в модели данных ВИКИЗ. Отдельного внимания заслуживает интервал xx46–xx61 м, сложенный переслаиванием маломощных проницаемых отложений (на рис. 5 выделен голубым и желтым). Сложность его строения приводит к необходимости оценки интегральных свойств пачек пластов, при этом алгоритму удается корректно выделить границы пачек: свойства выделенных пластов, определенные при инверсии, являются корректным осреднением свойств отложений, лишь на глубинах xx46–xx49 м (на рис. 5 выделены желтым) наблюдается значимое отклонение рассчитанных сигналов низкочастотных зондов ВИКИЗ от практических, что является свидетельством недостаточной детальности разбивки. За исключением указанных глубин детальность разбивки на всем исследуемом интервале близка к оптимальной.

На рис. 6, а приведены гистограммы средних невязок практических и синтетических данных (в значениях измеряемых сигналов ВИКИЗ – разностей фаз), рассчитанных в полученных инверсией моделях. Значение средней абсолютной невязки сигналов для модели 1 на всем интервале составляет $0,89^\circ$, что с практической точки зрения уже является достаточным результатом. Тем не менее уточнение положения границ позволяет снизить это значение до $0,63^\circ$.

Гистограмма смещений положений границ в модели 2 относительно модели 1 приведена на рис. 6, б. Следует отметить асимметричность гистограммы смещений. Разработанный алгоритм в среднем позиционирует границы на 0,07 м ниже оптимальных положений, определенных при инверсии. Это объясняется конструктивными особенностями трехкатушечных зондов ВИКИЗ: формы сигналов зондов метода несимметричны при пересечении пласта в симметричных вмещающих породах, а положения точек максимальной производной не всегда соответствуют положениям границ (см. рис. 5, в). Тем не менее даже при этом с применением разработанного алгоритма в большин-

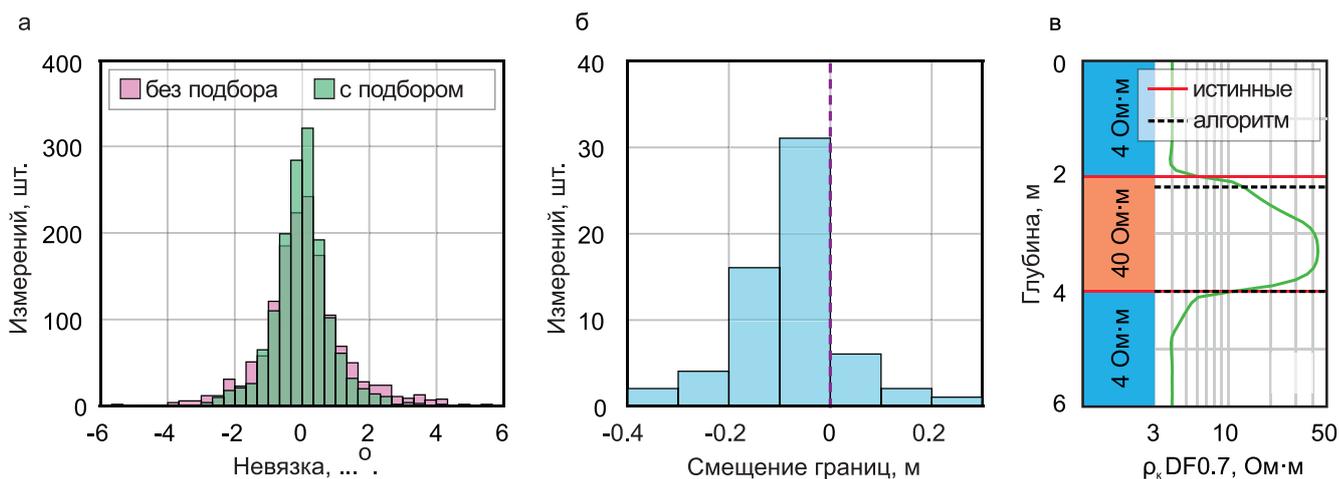


Рис. 6. Анализ точности расстановки границ средствами двумерной инверсии: а – гистограммы невязок измеренных и синтетических сигналов, рассчитанных в моделях 1 и 2; б – гистограмма смещений положений границ в модели 2 относительно модели 1; в – сигнал зонда ВИКИЗ DF0.7 в трехслойной модели и результат расстановки границ

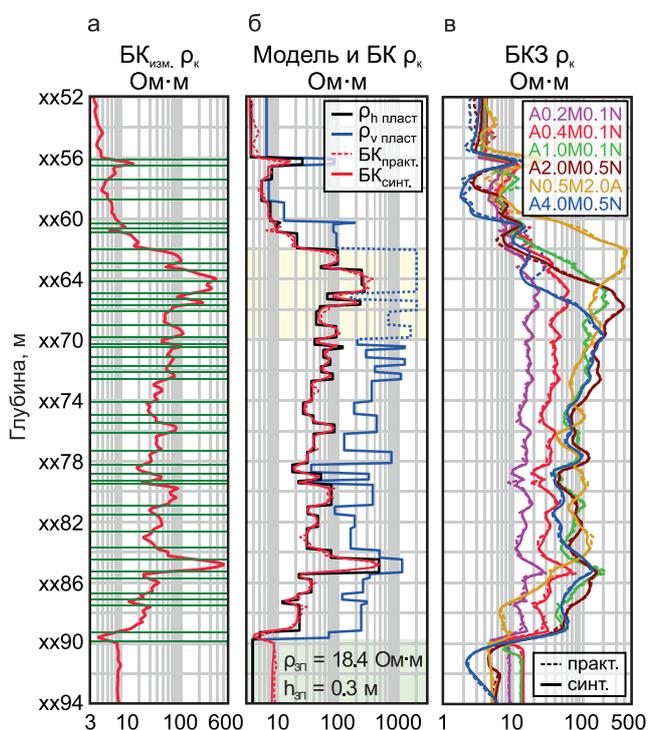


Рис. 7. Пример совместной двумерной инверсии данных БК и БКЗ на интервале баженовской свиты: а – практические данные БК и расставленные алгоритмом границы; б – данные БК и геоэлектрическая модель, полученная инверсией (зеленым цветом выделен пласт-коллектор, желтым – интервал, на котором чувствительности сигналов недостаточно для получения достоверной оценки вертикального УЭС); в – практические и рассчитанные в модели данные БКЗ

стве случаев удастся найти хорошие приближения их положений: из 59 границ в модели смещение 50 не превышает 0,15 м, а максимальное составляет 0,32 м.

Рассмотрим также пример (рис. 7) применения алгоритма при совместной инверсии данных БК и бокового каротажного зондирования (БКЗ) в скважине на месторождении Широного Приобья в интервале баженовской свиты – главной нефтематеринской толщи Западной Сибири.

Практические данные электрокаротажа измерены аппаратурой СКЛ-76. Пластовая разбивка, сгенерированная разработанным алгоритмом по данным БК, используется при создании стартовой модели среды. Баженовские отложения на рассматриваемой площади являются непроницаемыми. При этом известно, что для них характерна выраженная анизотропия электрофизических свойств [13]. В качестве стартовых значений горизонтального и вертикального УЭС во всех пластах задается 10 Ом·м. В подстилающем песчаном коллекторе по аналогии с предыдущим примером добавлена вертикальная граница, разделяющая ЗП и неизменную часть пласта.

Как и в предыдущем примере, инверсия осуществлялась в два этапа: с фиксированными и подбираемыми положениями горизонтальных границ. Сигналы трехэлектродного зонда БК симметричны, а положения их точек перегиба близки к положениям границ. Поэтому границы пластов позиционируются алгоритмом без систематического смещения и с высокой точностью: среднее смещение границ по результатам второго этапа инверсии составляет 0,07 м. При этом уточнение положений границ приводит лишь к незначительному улучшению невязок (см. таблицу).

Средние невязки практических и синтетических данных электрокаротажа и паспортные погрешности измерений

Каротажный метод	Средняя невязка, %		Погрешность измерения, %
	Модель 1	Модель 2	
БК	9,9	9,6	± 8,0
БКЗ	7,6	7,0	± 7,0*

*Среднее значение для измерений на исследуемом интервале.

Таким образом, с применением разработанного алгоритма и инструментария численной инверсии удастся в автоматическом режиме получить



детальную модель баженовской свиты, объясняющую измеренные сигналы с высокой точностью, что открывает новые возможности для исследования ее электрофизических свойств.

Выводы

Разработан алгоритм автоматической расстановки границ пластов по данным каротажа, ориентированный на создание стартовой модели для двумерной инверсии сигналов электрометрических методов. Алгоритм представляет собой вариацию градиентного подхода и характеризуется высоким быстродействием, обеспечивающим возможность обрабатывать протяженные интервалы каротажа в интерактивном режиме с визуализацией пластовой разбивки на каротажном планшете.

Управление алгоритмом осуществляется путем изменения трех настроечных параметров, позволяющих получать пластовую разбивку исследуемого интервала с требуемой для решения конкретных интерпретационных задач детальностью, учетом особенностей используемых геофизических методов и исследуемого геологического разреза.

Применение алгоритма позволяет как значительно упростить процесс подготовки стартовой модели в рамках интерпретации данных электрокаротажа на базе двумерных геоэлектрических моделей среды, так и решать другие задачи, требующие расчленения разреза: выделение коллекторов, межскважинная корреляция и др.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № FWZZ20220026 «Инновационные аспекты электродинамики в задачах разведочной и промысловой геофизики».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бердов В. А., Власов А. А., Лапковский В. В.** Выделение пластов межскважинного пространства по данным каротажа в программном комплексе Petrel // VIII Междунар. науч. конгр. «ГЕОСибирь-2012». Новосибирск, 10–20 апреля 2012 г.: сб. матер. Т. 2. – Новосибирск, 2012. – С. 76–80.
- Глинских В. Н., Дудаев А. Р., Нечаев О. В.** Высокопроизводительные гетерогенные вычисления CPU-GPU в задаче электрического каротажа нефтяных скважин // Вычислительные технологии. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 16–31.
- Латышова М. Г., Мартынов В. Г., Соколова Т. Ф.** Практическое руководство по интерпретации данных ГИС: учеб. пособие для вузов. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. – 327 с.
- Логинов Г. Н., Петров А. М.** Автоматическое выделение геоэлектрических границ по данным бокового каротажного зондирования с помощью глубокой сверточной нейронной сети // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60, № 11. – С. 1650–1657.
- Нейросетевой** подход к экспресс-моделированию сигналов электрокаротажа в реалистичных моделях сложнопостроенных терригенных отложений / А. М. Петров, К. Н. Даниловский, К. В. Сухорукова и др. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – № 4 (48). – С. 70–78.
- Современное** программно-методическое обеспечение интерпретации комплекса данных скважинной электрометрии / М. И. Эпов, В. Н. Глинских, М. Н. Никитенко и др. // Геодинамика и тектонофизика: электронный журнал. – 2021. – Т. 12, № 3S. – С. 35–38. – URL: <https://www.gt-crust.ru/jour/article/view/1254>.
- Сухорукова К. В., Петров А. М., Нечаев О. В.** Геоэлектрические модели меловых коллекторов Западной Сибири по результатам комплексной интерпретации данных электрокаротажа // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2020. – № 3 (41). – С. 77–86.
- Эпов М. И., Ельцов И. Н., Соболев А. Ю.** Выделение пластов в терригенном разрезе по данным ВИКИЗ // Каротажник. – 1999. – № 57. – С. 58–69.
- Cooper G. R. J., Cowan D.** Blocking geophysical borehole log data using the continuous wavelet transform // Exploration Geophysics – 2009. – Vol. 40, no. 2. – P. 233–236.
- Comparison** of the Russian and Western Resistivity Logs in Typical Western Siberian Reservoir Environments: A Numerical Study / М. И. Эпов, К. В. Сухорукова, О. В. Нечаев, et al. // Petrophysics. – 2020. – Vol. 61, no. 1. – P. 38–71.
- Maiti S., Tiwari R. K.** Automatic detection of lithologic boundaries using the Wash transform. A case study from the KTB borehole // Computers Geosciences. – 2005. – Vol. 31, no. 8. – P. 949–955.
- 2D Modeling** and 2D Inversion for Induction Logging Data Processing / P. Domnikov, Y. Koshkina, M. Persova, Y. Soloveichik // EAGE Fifth Science and Applied Research Workshop «Far East Hydrocarbons 2019»: conference proceedings. Yuzhno-Sakhalinsk, 2019. – P. 1–3.
- Petrov A.** Determining the resistivity anisotropy of high-resistivity sediments, based on lateral logging sounding data from vertical wells // SPE Annual Technical Conference and Exhibition 2017: conference proceedings. – San Antonio, USA, 2017. – P. 1–7.

© А. М. Петров, К. Н. Даниловский, О. О. Асанов, И. А. Москаев, С. А. Примаков, 2022