



ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ ПРИ ДВУМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ СИГНАЛОВ РОССИЙСКОГО ЭЛЕКТРОКАРОТАЖА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.М. Петров, К.В. Сухорукова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,

630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

На основе системы инверсии сигналов российского электрокаротажа AlondraWL разработан алгоритм для оценки погрешности определения параметров среды при одномерной и двумерной инверсии данных гальванических и индукционных зондирований. Алгоритм основан на решении статистически значимого количества обратных задач от различных стартовых моделей в автоматическом режиме. Его программная реализация тестировалась на синтетических и практических данных высокочастотного электромагнитного и бокового каротажных зондирований. На примерах применения показано преимущество алгоритма по сравнению с подходом на основе анализа функций чувствительности.

Боковое каротажное зондирование; высокочастотное электромагнитное каротажное зондирование; двумерная численная инверсия; геоэлектрическая модель; эквивалентные модели; погрешность определения параметров

EVALUATION OF THE UNCERTAINTIES IN TWO-DIMENSIONAL INVERSION OF THE RUSSIAN ELECTRIC LOGGING SIGNALS USING STATISTICAL MODELING

A.M. Petrov, K.V. Sukhorukova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia

e-mail: PetrovAM@ipgg.sbras.ru

Based on previously presented Russian electric logging measurements inversion system AlondraWL, we developed software prototype for estimating one- and two-dimensional inversion results uncertainties suitable for galvanic and induction sounding measurements. The algorithm is based on solving a statistically significant number of inverse problems from various initial models in the automatic mode. The software was tested on synthetic and practical high-frequency electromagnetic and galvanic practical logs. The test results show a significant advantage of the developed algorithm over the approach based on the analysis of sensitivity functions.

Lateral logging; electromagnetic logging; 2D inversion; geoelectrical model; equivalent models; inversion results uncertainties

ВВЕДЕНИЕ

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) – одна из важнейших характеристик коллектора, напрямую связанная с нефтенасыщенностью. Оценка пластовых значений УЭС по данным российских зондирующих электрокаротажных методов традиционно производится с использованием одномерной

радиально-слоистой модели. Такой подход полностью оправдан при исследовании мощных коллекторов, толщина которых в 2–3 раза больше длины используемых для каротажа зондов, однако в последнее время есть необходимость изучать и более тонкие коллекторы. Также при строительстве скважины сокращается время между вскрытием коллектора и каротажем. Небольшая толщина коллектора и тонкая измененная фильтрацией бурового раствора зона, строение которой помогает оценить насыщение пласта, обуславливают необходимость интерпретации электрокаротажных сигналов с учетом сильного влияния вмещающих пород, а также комплексирования данных разных методов.

Решением этой проблемы является применение для обработки данных электрокаротажа инверсии сигналов на базе двумерных осесимметричных геоэлектрических моделей. Двумерное моделирование учитывает влияние вмещающих пород на измерения, что позволяет гораздо более точно оценивать свойства тонких пластов, чем при использовании традиционного подхода. При этом подбирается не средний уровень сигналов на интервале пласта, а их изменение вдоль ствола скважины.

В последние годы было разработано достаточно большое количество алгоритмов двумерной инверсии и методических рекомендаций по двумерной интерпретации сигналов высокочастотного электромагнитного (ВЭМКЗ) [Глинских и др., 2013] и бокового каротажного (БКЗ) [Кнеллер, Потапов, 2010; Нечаев, Глинских, 2017; Сухорукова и др., 2017] зондирований, в том числе совместной [Михайлов и др., 2017; Петров и др., 2018]. Тем не менее, не все возможности применения этого подхода пока достаточно изучены.

Одной из основных проблем является сложность оценки погрешности определения параметров геоэлектрической модели окружающей прибор среды. Наиболее актуальна эта проблема для метода БКЗ с не фокусирующими ток зондами, вследствие чего их сигналы очень нелокальные и сложны для анализа. На интервалах переслаивания на каждое измерение может влиять большое количество параметров, поэтому на основе функций чувствительности сигналов к параметрам среды [Аржанцев и др., 2012; Сухорукова и др., 2017] можно лишь качественно оценить результат инверсии, но нельзя построить обоснованные оценки погрешности для полученных значений. В то же время постоянно растущее быстроедействие алгоритмов численного моделирования и инверсии сигналов уже сегодня позволяет применить статистическое моделирование для исследования погрешности определения модельных параметров.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

На основе системы двумерного моделирования и инверсии данных российского электрокаротажа AlondraWL [Петров и др., 2018] разработан алгоритм для оценки погрешности определения модельных параметров при одномерной и двумерной инверсии данных. Алгоритм основан на решении большого количества обратных задач от различных стартовых моделей с последующей статистической оценкой результатов. Алгоритм полностью автоматический за счет интеграции с инструментами инверсии AlondraWL и не требует участия интерпретатора, за исключением этапа стартовой настройки. Алгоритм не привязан к конкретному каротажному методу, и его применением можно анализировать данные произвольного набора зондов БКЗ и ВЭМКЗ. При инверсии поддерживаются все ключевые возможности AlondraWL: параллельные вычисления, интервальные ограничители модельных параметров, оконная инверсия и т. д. Помимо очевидного преимущества – возможности учета одновременного влияния нескольких параметров на сигналы в каждой точке измерения – при таком подходе учитывается влияние

на точность определения модельных параметров априорной информации, заданной с помощью фиксации или интервальных ограничителей параметров. На рис. 1 представлена принципиальная схема алгоритма.

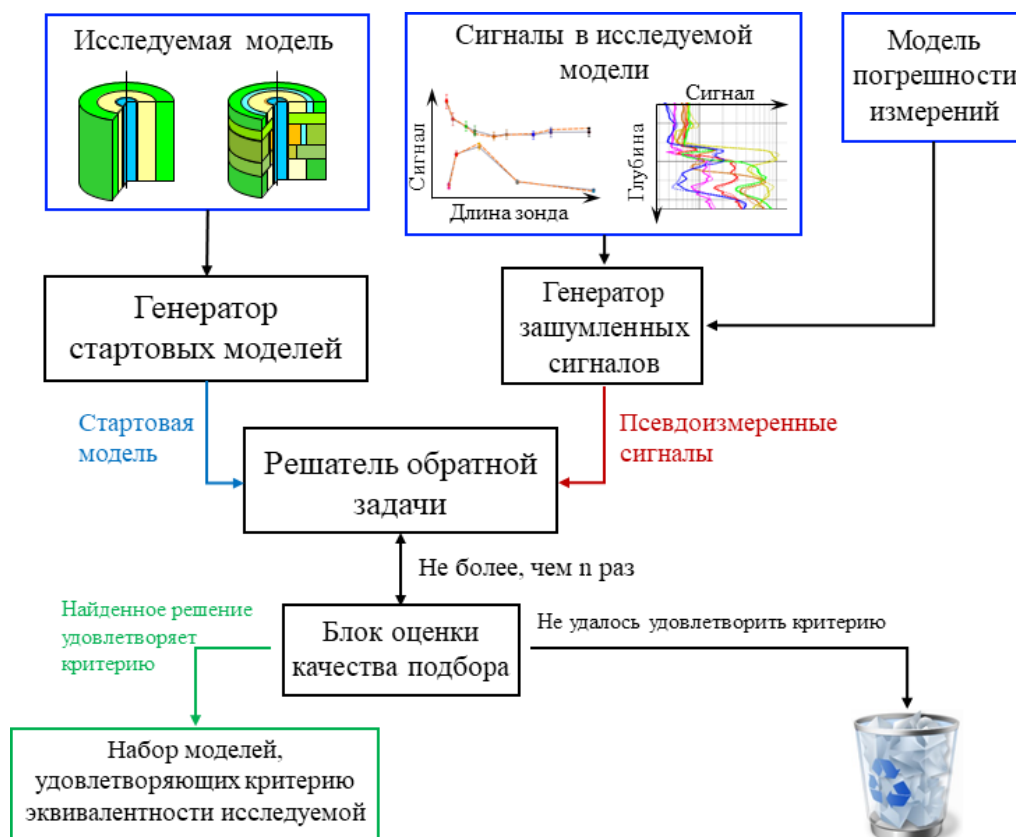


Рис. 1. Принципиальная схема алгоритма для оценки точности восстановления параметров среды при двумерной инверсии с помощью статистического моделирования

На вход алгоритма подается исследуемая модель, рассчитанные в ней сигналы каротажа, а также модель погрешности измерения.

Исследуемая модель может быть получена в результате инверсии практических данных, если необходимо оценить точность оценки параметров конкретных отложений, или может представлять собой типичную модель целевого интервала, если необходимо оценить целесообразность использования методов БКЗ и ВЭМКЗ в каких-либо условиях.

Сигналы каротажа – набор сигналов БКЗ и/или ВЭМКЗ, рассчитанных в исследуемой модели. Инверсия данных может быть как совместной, так и каждого метода по отдельности.

Модель погрешности измерения для каждого зонда используется в алгоритме для зашумления подбираемых сигналов.

При запуске алгоритма для создания каждой стартовой модели значение каждого из параметров (положения горизонтальных и цилиндрических границ и УЭС блоков) варьируется в заданных пределах от истинного значения в исследуемой модели (ИМ). При этом параметры, которые не планируется подбирать при инверсии, считаются известными априорно, их значение задается равным значению в ИМ и не варьируется (фиксируется). При анализе синтетических моделей в качестве практических сигналов берутся сигналы, рассчитанные в ИМ. В подбираемые сигналы добавляется шум, сгенерированный по модели погрешности измерений.

Полученные стартовая модель и сигналы отправляются в решатель обратной задачи комплекса AlondraWL. Для оптимизации функционала невязки используется метод DFO-LS [Cartis et al., 2018]. Априорная информация (если есть) учитывается в виде интервальных ограничителей на возможные значения параметров. Производится несколько последовательных итераций минимизации, в качестве стартовой модели на следующей итерации берется полученная на предыдущем шаге модель. После каждой итерации минимизации проверяется качество подбора сигналов. Если точность подбора удовлетворительна, минимизация прерывается, стартовая и финальная модели сохраняются для последующего анализа. Если за максимальное количество итераций удовлетворительное качество подбора не достигается, результат отбраковывается.

Оценка качества инверсии. В случае одномерной инверсии (инверсии кривой зондирования) для зондов каждого метода оценивается максимальное отклонение рассчитанных на текущем шаге сигналов от подбираемых и среднее отклонение по всем зондам. При двумерной инверсии для зондов каждого метода оценивается максимальное отклонение сигналов, смещение уровней рассчитанных сигналов относительно измеренных и их среднеквадратическая невязка. Результат инверсии считается удовлетворительным, если каждое из этих значений меньше либо равно значению, рассчитанному по подбираемым и рассчитанным в ИМ сигналам.

Эти шаги повторяются необходимое количество раз, формируя выборку моделей – результатов инверсии, в практическом смысле эквивалентных исследуемой. В конце анализируется распределение каждого из параметров.

ИНВЕРСИЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Рассмотрим пример применения алгоритма на одномерной радиально-слоистой модели, демонстрирующий преимущество алгоритма перед подходом на основе линейного приближения. На рис. 2 приведены результаты оценки точности восстановления параметров модели нефтеводонасыщенного пласта при инверсии данных БКЗ СКЛ-76.

Для построения гистограмм распределения параметров использовалась выборка из 200 моделей, эквивалентных исследуемой модели по сигналам БКЗ с точностью до погрешности измерений. В расчетах использовалась модель нормально распределенного шума с $3\sigma = 2.5 + 0.004 * (5000/\rho_{ik} - 1) \%$, где ρ_{ik} – кажущееся УЭС i -того зонда БКЗ. Такая модель погрешности соответствует паспортным характеристикам прибора [Комплекс геофизический..., 2013]. При генерации стартовых моделей все параметры (ρ_{zp} , ρ_{oz} , $\rho_{пласт}$) выбирались случайно из равномерного распределения в пределах $\pm 70 \%$ от истинного значения. Полученная в результате инверсии модель считалась эквивалентной исследуемой, если максимальное относительное отклонение рассчитанного ρ_k каждого зонда от псевдоизмеренного не превышало 3%, а среднее отклонение по всем зондам – 1%. Ворота погрешности по линейному приближению соответствуют максимальному изменению одного параметра исследуемой модели, при котором выполняется критерий эквивалентности.

Как видно из данных, приведенных на рис. 2, оценка погрешности, полученная по линейному приближению, оказывается существенно заниженной. Некоторые комбинации параметров измененных зон и пласта (эквивалентные модели) находятся за пределами линейного приближения, так как влияние на сигналы изменения одного параметра может быть частично компенсировано изменением других параметров. В приведенном примере оценку на основе линейного приближения можно применить лишь

для УЭС пласта, так как чувствительность сигналов к этому параметру максимальна. В то же время, оценка погрешности на основе статистического моделирования позволяет получить не только пределы, но и вероятностное распределение значений всех восстанавливаемых параметров.

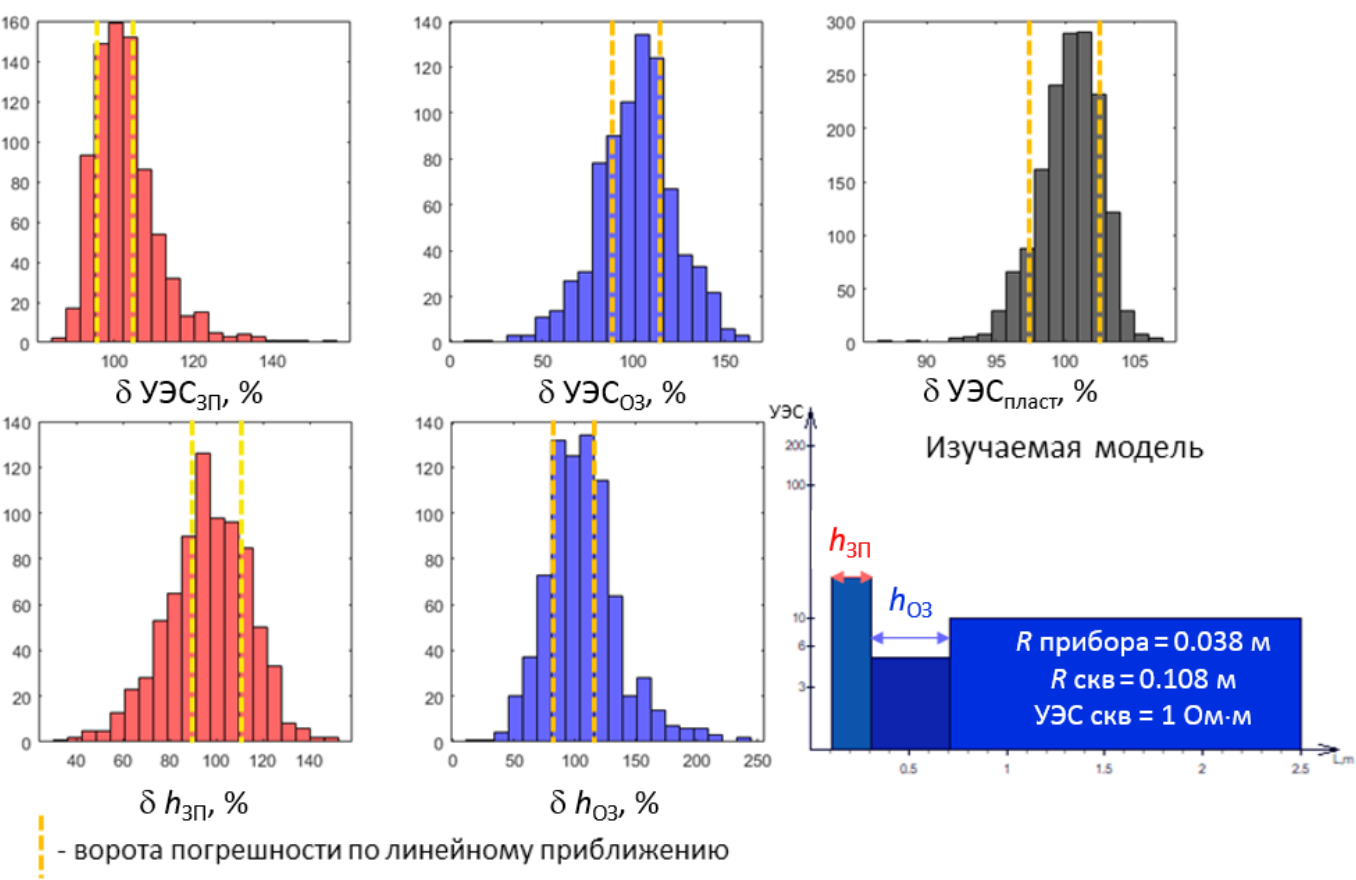


Рис. 2. Результаты статистической оценки точности восстановления параметров модели мощного нефтеводонасыщенного пласта, вскрытого на глинистом буровом растворе при инверсии данных БКЗ СКЛ-76. $\delta=100 \cdot p_{\text{inv}}/p_{\text{true}}$, где p_{inv} – восстановленное значение параметра, а p_{true} – истинное. ОЗ – окаймляющая зона, ЗП – зона проникновения

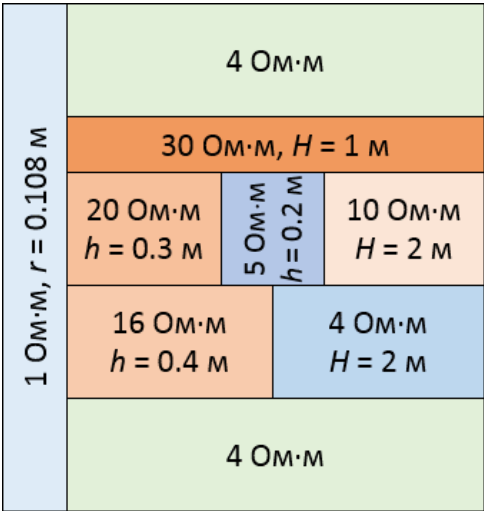


Рис. 3. Модель осложненного карбонизацией коллектора смешанного насыщения в глинистых вмещающих отложениях

Второй пример – модель коллектора смешанного насыщения, осложненного карбонатизацией в кровельной части и расположенного в мощных глинистых отложениях, предложенная в работе [Еров et al., 2020] (рис. 3).

В примере анализируется точность восстановления параметров модели при совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ СКЛ-76 (6 зондов БКЗ, 5 зондов основной изопараметрической группы ВЭМКЗ, 51 точка измерений с шагом 0.2 м). Модели погрешности измерения сигналов БКЗ и ВЭМКЗ выбраны согласно [Аппаратура высокочастотного..., 2005; Комплекс геофизический..., 2013].

Генератор стартовых моделей: все параметры выбирались случайно из равномерного распределения. Положения горизонтальных границ варьировались в пределах ± 0.2 м от истинного положения, остальные параметры ($h_{зп}$, $h_{оз}$, $\rho_{зп}$, $\rho_{оз}$, $\rho_{пласт}$) в пределах ± 70 % от истинного значения. Так как при инверсии истинная модель считается неизвестной, для всех блоков кроме карбонатизированного прослая и ОЗ при подборе независимо варьировались горизонтальное и вертикальное УЭС (ρ_h и ρ_v). Результаты оценки точности восстановления параметров приведены на рис. 4.

Максимумы распределения всех параметров, полученные при статистическом моделировании, с высокой точностью соответствуют истинным значениям. Характер распределений позволяет сделать следующие выводы.

1. При совместной инверсии сигналов БКЗ и ВЭМКЗ в геоэлектрических условиях, близких к рассмотренной модели, можно оценить вертикальное УЭС неизмененных частей пластов в коллекторах со сложным радиальным профилем УЭС.

2. Большая погрешность определения параметров измененных зон не позволяет оценить их вертикальное УЭС даже при совместной инверсии БКЗ и ВЭМКЗ.

В подавляющем большинстве случаев естественный процесс осадконакопления приводит к тому, что в песчано-глинистых отложениях вертикальное УЭС больше или равно горизонтальному. Поэтому при обработке практических данных, измеренных в терригенных отложениях, целесообразно использовать ограничитель на отношение $\frac{\rho_v}{\rho_h} \geq 1$. Такой ограничитель является примером простейшей априорной информации, которая может использоваться в инверсии. Помимо этого, для описания свойств окаймляющей зоны целесообразно использовать одно значение УЭС, так как чувствительность сигналов БКЗ к вертикальной компоненте УЭС этой зоны низка. Опыт интерпретации данных в подобных разрезах позволяет установить интервальный ограничитель на ширину и УЭС ОЗ ($3 \text{ Ом}\cdot\text{м} \leq \rho_{оз} \leq 7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $0.1 \text{ м} \leq h_{оз} \leq 0.4 \text{ м}$) [Еров et al., 2020]. Добавление в инверсию этих условий значительно меняет картину распределения восстанавливаемых параметров (рис. 5).

Таким образом, добавление ограничителей приводит к уменьшению дисперсии определяемых значений некоторых параметров и обеспечивает возможность исключения заведомо не отвечающих геологии моделей, что крайне важно при практическом использовании инверсии. Добавляющаяся при этом в определяемые значения ρ_v неизмененных частей пластов систематическая погрешность пренебрежимо мала.

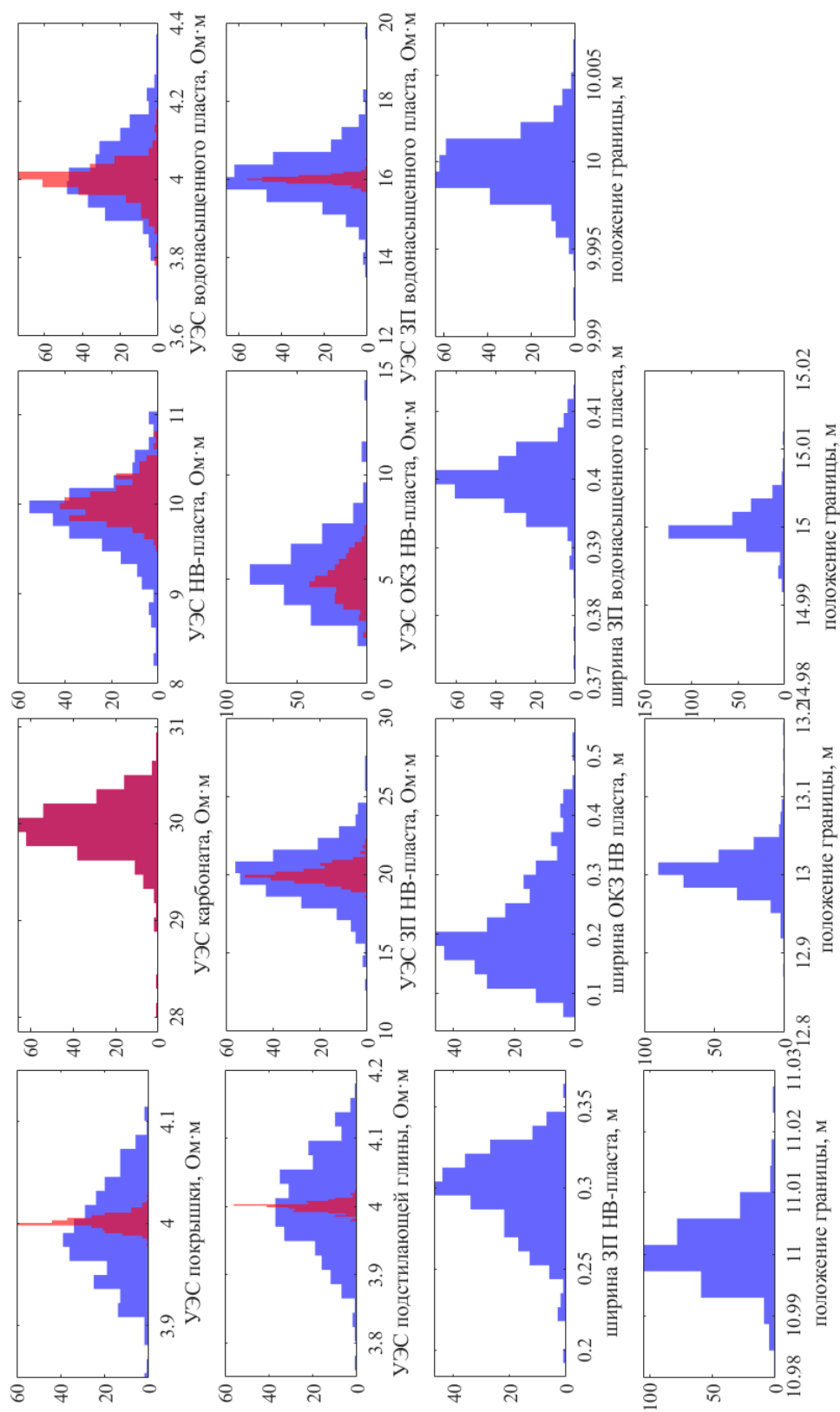


Рис. 4. Результаты статистической оценки точности восстановления параметров модели коллектора смешанного насыщения в мощных глинистых отложениях. На гистограммах УЭС красным цветом – r_v , синим – r_h . НВ – нефтеводонасыщенный.

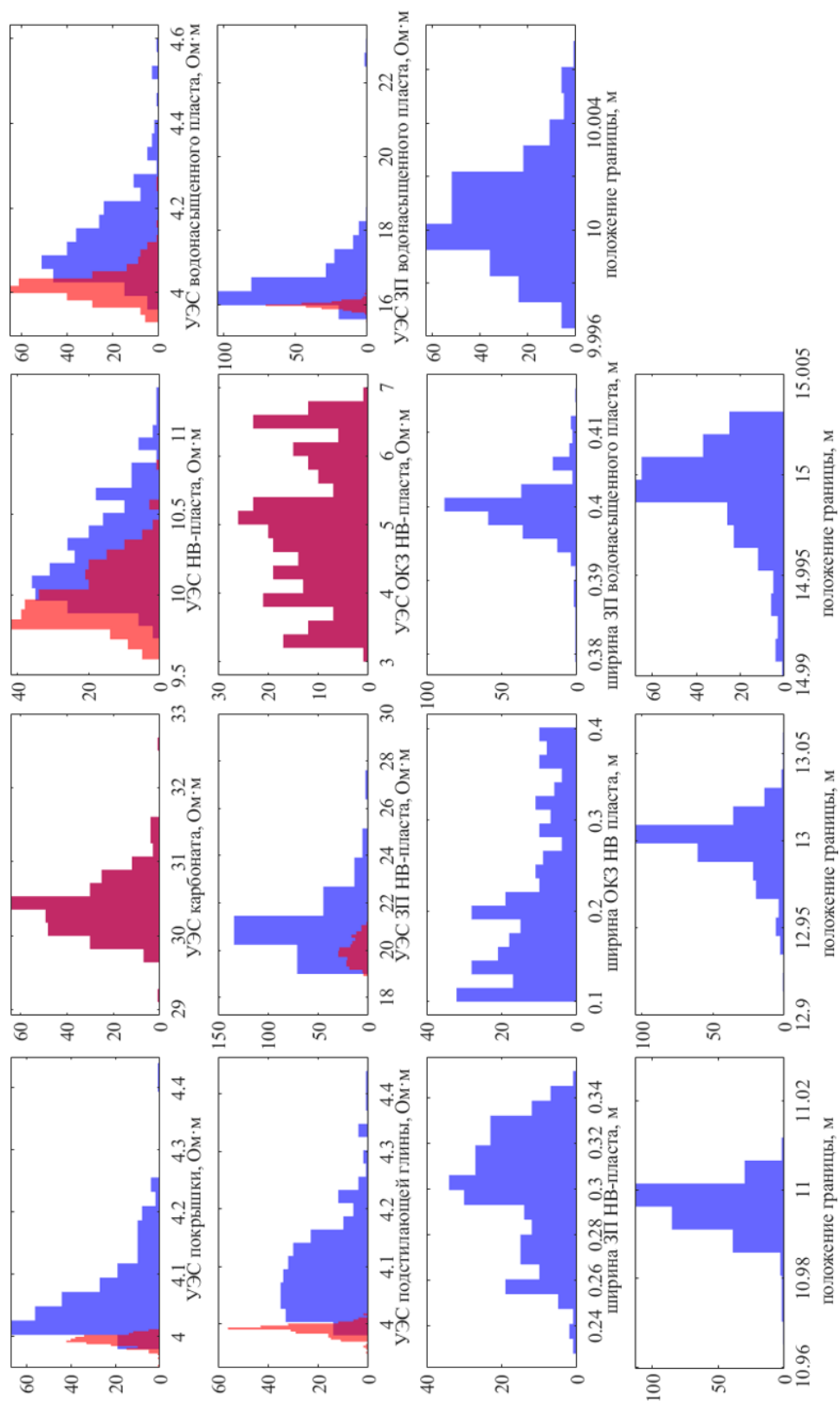


Рис. 5. Результаты статистической оценки точности восстановления параметров модели коллектора смешанного насыщения в мощных глинистых отложениях с использованием априорной информации. На гистограммах УЭС красным цветом – p_l , синим – p_v .

ИНВЕРСИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Рассмотрим пример инверсии практических данных БКЗ, измеренных на интервале песчано-глинистого нефтеводонасыщенного коллектора юрского возраста в скважине широтного Приобья (рис. 6). Выраженная дисперсия диэлектрической проницаемости вмещающих коллектор глинистых отложений не позволяет применить инструменты совместной инверсии данных БКЗ и ВЭМКЗ. Тем не менее, согласно выводам, полученным в работе [Петров и др., 2017], относительно простое строение интервала позволяет оценить вертикальное УЭС отложений, используя в инверсии только данные БКЗ.

По результатам двумерной инверсии данных БКЗ (рис. 7), вмещающие коллектор глинистые отложения характеризуются сильной анизотропией: среднее значение $\frac{\rho_v}{\rho_h} \sim 12$. По данным гамма-каротажа (ГК) коллектор заглинизирован, что подтверждается результатами обработки данных БКЗ: в изотропной модели невозможно подобрать сигналы длинных зондов. В то же время добавление вертикального УЭС в пласты коллектора позволяет добиться хорошего совпадения рассчитанных и измеренных сигналов: среднее значение относительной невязки сигналов δ в рассматриваемой модели составляет 3.8 %.

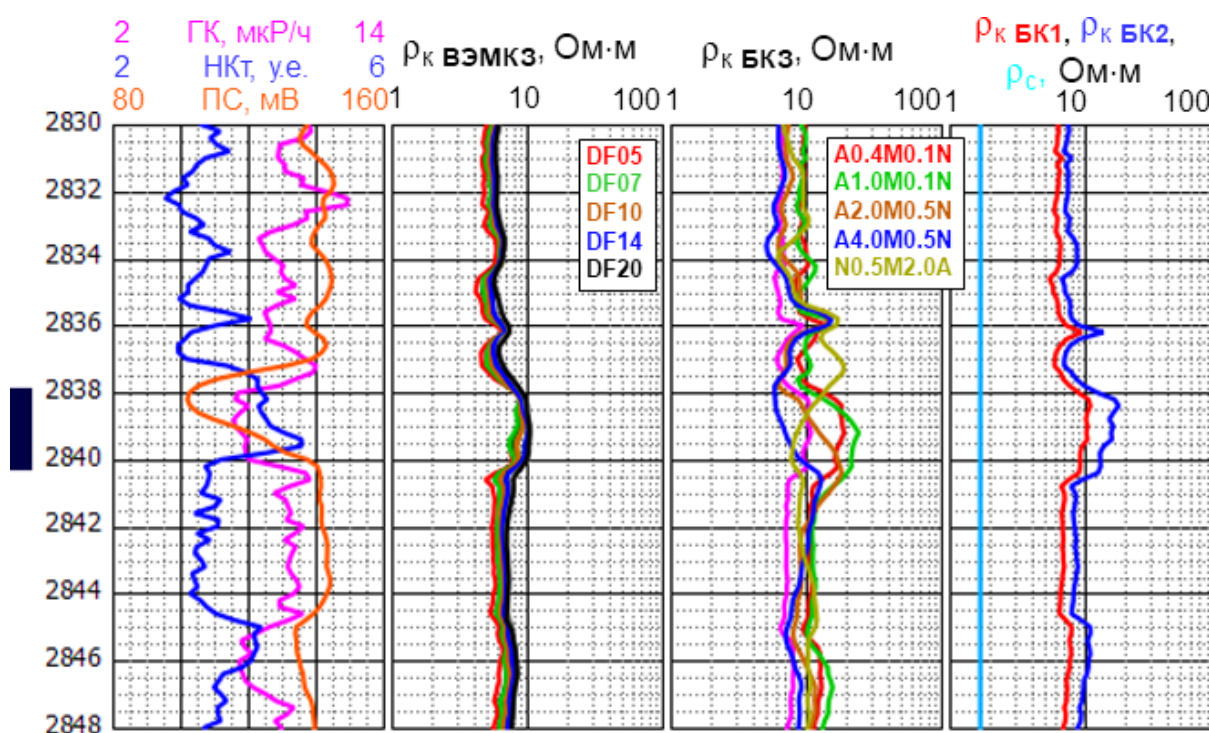


Рис. 6. Данные ГИС, измеренные на интервале песчано-глинистого коллектора юрского возраста и вмещающих его отложений: ГК – гамма-каротаж, НКТ – нейтронный каротаж, ПС – потенциал самополяризации, кажущееся УЭС ВЭМКЗ, БКЗ, БК и УЭС бурового раствора. Синим прямоугольником отмечен интервал коллектора

Анализ устойчивости, проведенный с использованием разработанного алгоритма, показывает, что медианные значения и максимумы полученных распределений всех параметров не соответствуют значениям модели, использованной для анализа (при работе алгоритма варьировались параметры всех пластов). Это несоответствие демонстрирует важность оценки погрешностей и недостаточную представительность единичного результата инверсии.

Наименее устойчивым параметром в обоих пластах коллектора является ширина зоны проникновения. Это отражает эквивалентность параметров ЗП: практически идентичные сигналы можно

получить при разном соотношении ее УЭС и ширины. УЭС верхнего пласта коллектора с вероятностью 95 % определяется в пределах $12 \text{ Ом}\cdot\text{м} \leq \rho_h \leq 15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $20 \text{ Ом}\cdot\text{м} \leq \rho_v \leq 23.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ с медианными значениями $\rho_h=13.7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 23.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. УЭС нижнего – $7.7 \leq \rho_h \leq 9.4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $23.5 \text{ Ом}\cdot\text{м} \leq \rho_v \leq 26.6 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ с медианными значениями $\rho_h=8.3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\rho_v = 24.7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

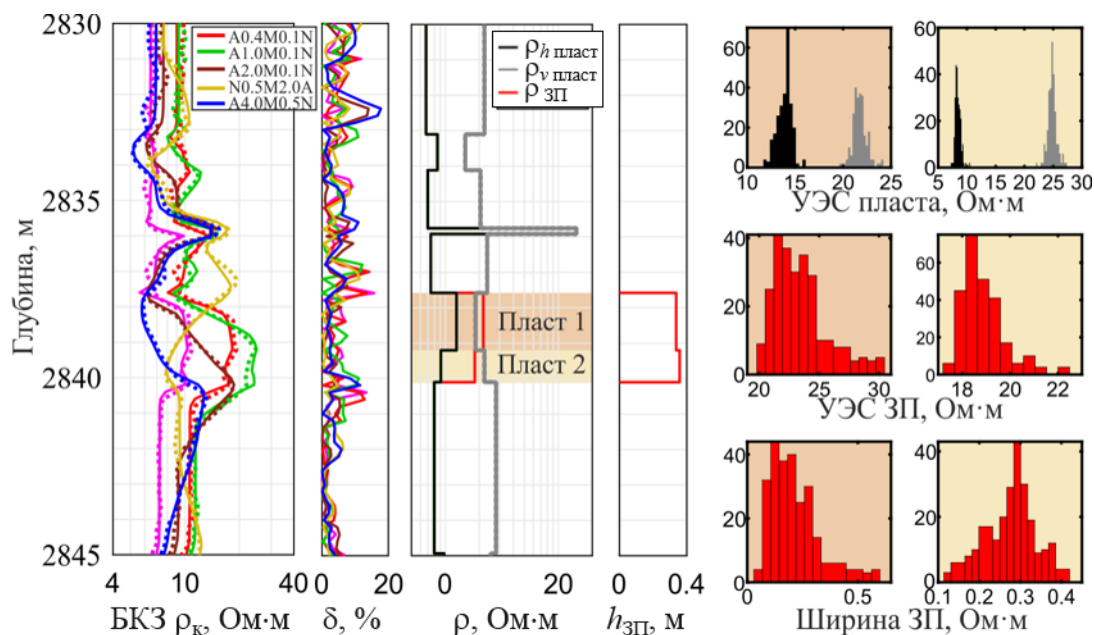


Рис. 7. Слева – результат двумерной инверсии практических данных БКЗ. Справа – оценка погрешности восстанавливаемых параметров коллектора с применением разработанного алгоритма

Полученные медианные значения ρ_h и ρ_v в верхнем пласте коллектора соответствуют переслаиванию анизотропных глин, аналогичных по электрическим свойствам вмещающим глинистым отложениям, и изотропного песчаника с УЭС 19 Ом·м при доле глинистых прослоев $\approx 25 \%$, что не противоречит уровню ГК. Соотношение УЭС в нижнем пласте коллектора несколько выше, что может быть вызвано уплотнением песчаника или его карбонатизацией, чему отвечает увеличение значений нейтронного каротажа. Для более точного анализа необходимо привлечение дополнительной информации о разрезе.

ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм для оценки погрешности определения параметров среды при одномерной и двумерной инверсиях данных гальванических и индукционных зондирований. Результаты тестирования на синтетических данных показывают значительное преимущество разработанного алгоритма перед подходом на основе анализа функций чувствительности. На примере реалистичной модели терригенного коллектора:

- показана возможность определения вертикального УЭС проницаемых отложений по данным совместной инверсии БКЗ и ВЭМКЗ;
- оценена погрешность восстановления параметров с учетом их одновременного влияния на измеряемые сигналы;
- рассмотрено влияние интервального ограничителя $\frac{\rho_v}{\rho_h} \geq 1$ на определяемые параметры.

Алгоритм опробован на результатах инверсии практических сигналов БКЗ, измеренных на интервале песчано-глинистого коллектора юрского возраста и вмещающих его отложений. Полученные результаты демонстрируют важность оценки погрешностей и недостаточную представительность единичного результата инверсии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00240.

ЛИТЕРАТУРА

Аппаратура высокочастотного индукционного каротажного изопараметрического зондирования: Руководство по эксплуатации. ЛУЧ. 6.00.00.00 РЭ. – Новосибирск: НПП ГА «Луч», 2005. – 16 с.

Аржанцев В.С., Сухорукова К.В., Нечаев О.В. Чувствительность к геоэлектрическим параметрам и двумерная инверсия сигналов бокового каротажного зондирования // Каротажник. – 2012. – № 10 (220). – С. 105–115.

Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Эпов М.И. Линеаризованные решения прямых и обратных двумерных задач высокочастотного электромагнитного каротажа в проводящих средах с учетом токов смещения // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 12. – С. 1942–1951.

Кнеллер Л.Е., Потапов А.П. Определение удельного электрического сопротивления пластов при радиальной и вертикальной неоднородности разреза скважин // Геофизика. – 2010. – № 1. – С. 52–64.

Комплекс геофизический скважинный автономный СКЛ-А: Руководство по эксплуатации. ЛУЧ. 452.00.00.00 РЭ. – Новосибирск: НПП ГА «Луч», 2013. – 65 с.

Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродина И.В. Совместная численная инверсия данных индукционных и гальванических каротажных зондирований в моделях геологических сред с осевой симметрией // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58, № 6. – С. 935–947.

Нечаев О.В., Глинских В.Н. Быстрый прямой метод решения обратной задачи электрического каротажа в нефтегазовых скважинах // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2017. – Т. 15, № 4. – С. 53–63.

Петров А.М., Сухорукова К.В., Нечаев О.В. Возможности и ограничения восстановления параметров анизотропных осесимметричных моделей среды путем инверсии данных БКЗ // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017: Сб. материалов XIII Междунар. науч. конгр. в 4 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2017. – Т. 3. – С. 181–186.

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-2018: Сб. материалов XIV Междунар. науч. конгр. в 6 т. – Новосибирск: СГУГиТ, 2018. – Т. 4. – С. 90–97.

Сухорукова К.В., Петров А.М., Нечаев О.В. Численная инверсия данных электрокаротажа в интервалах анизотропных глинистых отложений // Каротажник. – 2017. – № 4 (274). – С. 34–48.

Cartis C., Fiala J., Marteau B., Roberts L.C. Improving the flexibility and robustness of model-based derivative-free optimization solvers. arXiv:1804.00154 [math.OC]. Cornell University, 2018.

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. Comparison of the Russian and Western resistivity logs in typical Western Siberian reservoir environments: a numerical study // Petrophysics. – 2020. – Vol. 61, No.1. – P. 38–71.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ПЕТРОВ Алексей Михайлович – младший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН; аспирант ГГФ НГУ. Область научных интересов: количественная интерпретация данных зондирующих методов скважинной электрометрии

СУХОРУКОВА Карина Владимировна – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики ИНГГ СО РАН. Область научных интересов: количественная интерпретация комплекса данных скважинной электрометрии в вертикальных и субгоризонтальных скважинах; e-mail: SuhorukovaKV@ipgg.sbras.ru.