



## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДВУМЕРНОЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЧИСЛЕННОЙ ИНВЕРСИЕЙ СИГНАЛОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО И ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖА

**А.А. Лапковская, К.В. Сухорукова, О.В. Нечаев, А.М. Петров**

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,  
e-mail: lapkovskayaanya@gmail.com*

Практика применения методики двумерной инверсии данных скважинной электрометрии приводит к выводу о том, что получаемые результаты в достаточно большой степени зависят от набора вовлекаемых в инверсию сигналов зондов. На примере синтетических сигналов наиболее распространенных в геофизических компаниях приборов – бокового каротажного зондирования, бокового каротажа, высокочастотного электромагнитного зондирования и низкочастотного индукционного каротажа, в том числе и многозондового – рассмотрены возможности восстановления параметров проницаемых пластов в модели отложений нижнего мела Западной Сибири. Модель включает проницаемые пласты с зонами проникновения, разное стартовое значение глубины которого определяет возможность восстановления параметров зоны проникновения при инверсии данных разных комплексов методов.

*Двумерная инверсия, геоэлектрическая модель, зона проникновения, боковое каротажное зондирование, боковой каротаж, индукционный каротаж, высокочастотный индукционный каротаж, синтетические сигналы*

## RECONSTRUCTION OF A 2D GEOELECTRIC MODEL BY NUMERICAL INVERSION OF GALVANIC AND INDUCTION LOGGING SIGNALS

**A.A. Lapkovskaya, K.V. Sukhorukova, O.V. Nechaev, A.M. Petrov**

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptuyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,  
e-mail: lapkovskayaanya@gmail.com*

The practice of two-dimensional inversion of electrolog signals leads to the conclusion that the results obtained to a large extent depend on the set of devices. Russian geophysical companies mainly use lateral logging (measuring by a set of gradient sondes), focusing lateral logging, high-frequency electromagnetic sounding and low-frequency induction logging, including multi-sonde tool. The article considers the possibilities of determining the parameters of permeable formations by two-dimensional inversion of synthetic signals for these tools, on the example of a geoelectric model of the Lower Cretaceous deposits in Western Siberia. The model includes permeable formations with mud filtrate invasion zones. The different starting value of the invasion depth determines the accuracy of estimating the parameters of the invaded zone by inverting the data of various sets of sonde signals.

*Two-dimensional inversion, geoelectrical model, invaded zone, lateral logging, induction logging, high-frequency induction logging, simulated signals*

## ВВЕДЕНИЕ

Возможности определения электрофизических свойств геологической среды по данным каротажа ограничиваются прежде всего тем, что пространственное распределение физических параметров

восстанавливается по данным, измеренным на одной линии – в скважине. Некорректность задачи усиливается дискретностью представления данных и погрешностью их измерения, которые приводят к экспериментально обусловленной эквивалентности, увеличивающей неопределенность определяемых параметров дополнительно к характерной для каждого метода модельной эквивалентности [Табаровский и др., 1985; Табаровский, Эпов, 2006].

В большинстве случаев практики электрокаротажного зондирования численный анализ данных основывается на раздельном проведении одномерной инверсии (инверсии кривой зондирования) для выбранных методов, после чего полученные результаты обобщаются [Гурленов и др., 1997]. В связи с разными механизмами распространения полей и разными особенностями областей эквивалентности, процесс инверсии данных постоянного электрического (боквое каротажное зондирование – БКЗ) и переменного электромагнитного (индукционный каротаж – ИК, высокочастотного индукционного каротажное изопараметрическое зондирование – ВИКИЗ) методов может приводить к плохо сопоставимым между собой моделям. Для того чтобы исключить такое кажущееся противоречие, необходима совместная инверсия данных комплекса выбранных методов в рамках единой интерпретационной модели. Комплексирование разных методов электрокаротажа признано одним из способов получения более достоверных геоэлектрических моделей сложнопостроенных отложений [Кнеллер, Потапов, 1992; Mezzatesta et al., 1994; Rabinovich, Tabarovsky, 2001; Yang, 2001; Li et al., 2007].

Повышение достоверности количественной интерпретации в классе одномерной цилиндрически-слоистой модели на основе совместной инверсии сигналов гальванических и индукционных зондирующих методов – БКЗ и ВИКИЗ – также показано в работе [Ельцов и др., 2005]. В этом случае более точно восстанавливается радиальное распределение УЭС, формирующееся при фильтрации бурового раствора в проницаемую породу во время и после бурения скважины, особенно при практически одновременном измерении сигналов зондирующих методов. Однако применимость такого подхода – совместной инверсии кривых зондирования – ограничивается при небольших толщинах коллекторов и/или изменении их свойств от кровли к подошве. Более обоснованным в этом случае является подход количественной интерпретации в классе двумерных моделей, например, с применением разработанного в ИНГГ СО РАН программного пакета Alondra WL численного моделирования сигналов электрокаротажных приборов и их инверсии. При расчете в двумерной модели учитывается влияние на сигналы неоднородности свойств вмещающих пород, а также изменение насыщения коллекторов от кровли к подошве и их слоистое строение, при этом подбирается не средний уровень сигнала в пласте, а изменение сигналов при профилировании отложений вдоль скважины [Петров и др., 2019]. Кроме этого, модель содержит скважину с буровым раствором, при этом диаметр скважины и значение УЭС раствора в ней задаются индивидуально для каждого пласта. В каждом проницаемом пласте модели можно задать необходимое количество радиальных зон, описывающих изменение электрических свойств, обусловленное фильтрацией бурового раствора в момент и после вскрытия. При инверсии варьируются значения УЭС и диэлектрической проницаемости, положения горизонтальных границ пластов и радиальных границ измененных зон [Сухорукова и др., 2020].

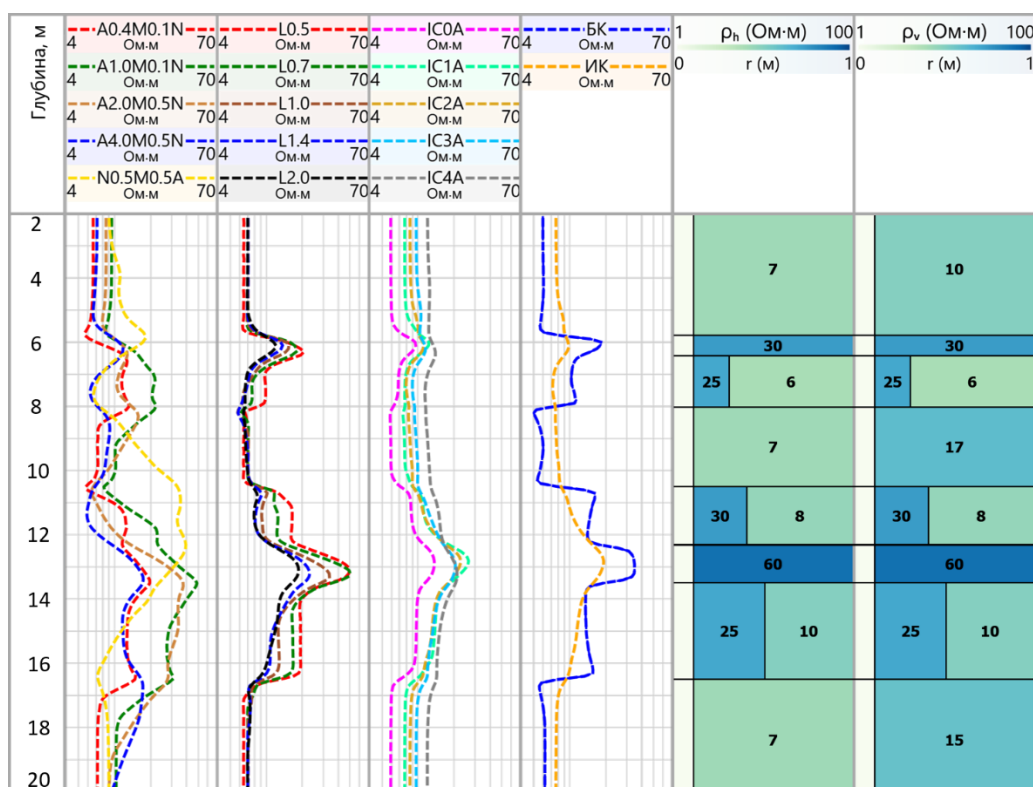
Основой системы инверсии сигналов в классе двумерных моделей (2D инверсия, 2D модель) являются представленные в работах [Нечаев, Глинских, 2017; Петров и др., 2018] конечно-элементные алгоритмы для моделирования сигналов ВИКИЗ, БКЗ, БК и ИК (включая многозондовый). Тем не менее, при 2D инверсии больших интервалов с контрастными тонкими пластами встает вопрос о достоверности определяемых параметров модели, а также о возможности восстановления параметров зоны, измененной

фильтрацией бурового раствора в пластах-коллекторах, в зависимости от набора используемых методов [Петров, Сухорукова, 2020].

Чтобы оценить возможность восстановления параметров 2D геоэлектрической модели по данным различных комплексов методов электрокаротажа проведен следующий численный эксперимент.

На основе анализа практических данных из нескольких скважин Имилорского месторождения выявлены типичные электрофизические свойства разреза, и для наиболее сложного сочетания проницаемых и непроницаемых пластов создана обобщенная синтетическая модель мелового коллектора. Для этой модели рассчитаны сигналы зондов различных методов, которые в разных комбинациях подвергались совместной численной инверсии в классе 2D геоэлектрических моделей для анализа возможностей восстановления параметров исходной модели.

Геоэлектрическая модель включает три проницаемых песчаных пласта, с понижением УЭС неизменной части от нижнего пласта к верхнему: 10, 8 и 6 Ом·м, толщина зон проникновения также уменьшается снизу вверх: 0.4, 0.3, 0.2 м при значениях УЭС 25, 30 и 25 Ом·м соответственно (рис.1). Толщины пластов 1.6, 1.8, 3.0 м от нижнего к верхнему.



**Рис. 1.** Синтетическая модель и рассчитанные сигналы (слева направо): горизонтальное и вертикальное УЭС пласта ( $\rho_h$  и  $\rho_v$ , цвет и числа на блоках модели, Ом·м), отметки глубины (м), кажущееся УЭС: БКЗ, ВИКИЗ, БК и ИК, БИК

Такое изменение УЭС коллекторов соответствует реально встречающемуся и может быть обусловлено влиянием электропроводности глинистого компонента твердой матрицы. Вмещающие пласты сложены электрически анизотропными глинистыми породами, их горизонтальное УЭС  $\rho_h = 7$  Ом·м, вертикальное –  $\rho_v = 10$  Ом·м в верхнем пласте и 15 Ом·м – в нижнем. Параметры глинистого пласта между коллекторами:  $\rho_h = 7$  Ом·м,  $\rho_v = 17$  Ом·м, толщина 2.5 м. Значения УЭС пластов изотропного карбонизированного песчаника над коллектором и над нижним проницаемым пластом 30 и 60 Ом·м, толщины 0.6 и 1.2 м. Диаметр скважины 0.216 м, УЭС глинистого бурового раствора 0.9 Ом·м.

Рассчитанные сигналы зондов БКЗ, БК, ВИКИЗ, ИК, 5ИК приведены на рис. 1. Эти сигналы в разных комбинациях далее подавались как "экспериментальные" на вход алгоритма инверсии для построения геоэлектрической модели, с разных стартовых значений параметров блоков. Параметры полученных моделей приведены на рисунках 2–11 в виде графиков, рассчитанные в них сигналы – подобранные – показаны сплошными линиями вместе с исходными "экспериментальными", нанесенными пунктиром.

Восстановление параметров модели при 2D инверсии анализировалось для трех комплексов сигналов: БКЗ + БК + ВИКИЗ; БКЗ + БК + ИК; БКЗ + БК + 5ИК. При этом исследовалось, как на точность восстановления параметров влияет стартовое значение толщины зоны проникновения. Значения толщины ЗП в стартовой модели задавались равными 0.1, 0.2 и 0.5 м. Минимальное значение – 0.1 м – взято потому, что целесообразно проверить работу быстрых нейросетевых аналогов точных решений прямых задач, обученных на расчетных выборках сигналов в моделях с минимальной толщиной ЗП, равной 0.1 м. Для исследования возможностей программного комплекса при подборе сигналов с однородной по УЭС модели стартовые значения УЭС всех пластов брались равными 10 Ом·м.

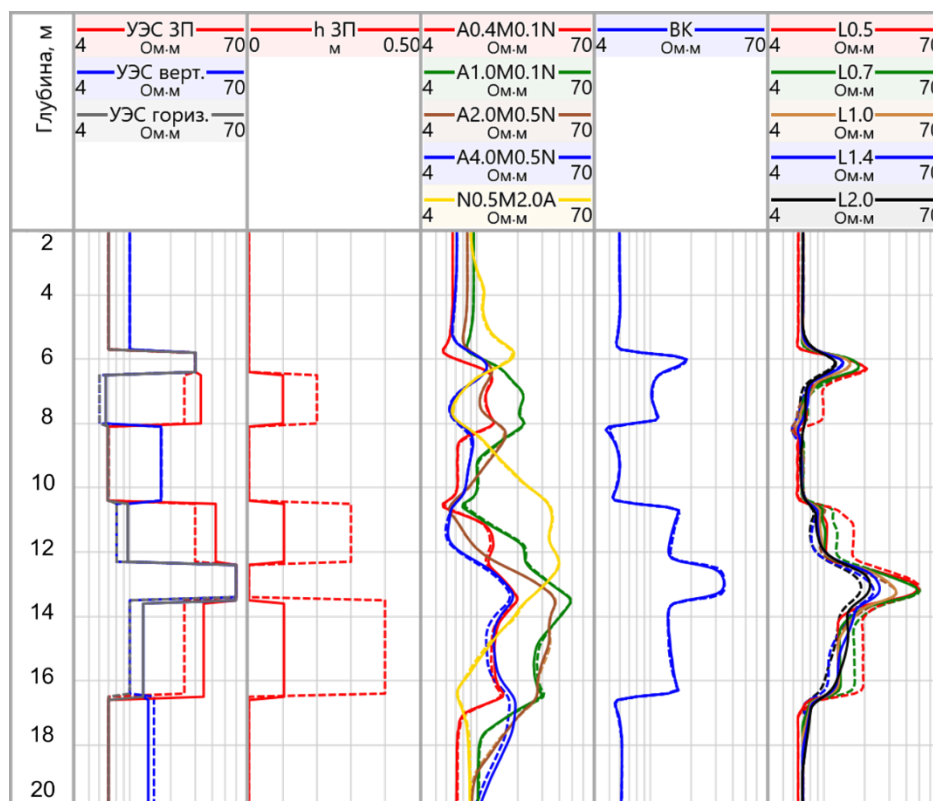
### **ИНВЕРСИЯ КОМПЛЕКСА ДАННЫХ БКЗ + БК + ВИКИЗ**

Достоверное определение параметров ЗП по данным отдельных методов каротажа практически невозможно из-за недостаточной чувствительности зондов к отдельным блокам модели. В комплексе ГИС, применяемом в Западной Сибири, наилучшим радиальным разрешением обладает метод высокочастотного индукционного изопараметрического зондирования (ВИКИЗ), сигналы которого наиболее чувствительны к геоэлектрическим параметрам измененной зоны [Ульянов, Эпов, 1998; Эпов и др., 2001], но и для этого метода характерна значительная эквивалентность определяемых значений толщины и УЭС ЗП. В работах по комплексной электрофизической и гидродинамической интерпретации уточнение параметров ЗП достигалось совместной численной инверсией кривых зондирования данных ВИКИЗ и БКЗ [Ельцов и др., 2005]. Недостаточная чувствительность сигналов ВИКИЗ к УЭС ЗП, большому по сравнению с УЭС коллектора со смешанным насыщением, компенсируется большей зависимостью сигналов градиент-зондов именно от высокоомных частей пласта, и диапазоны возможных значений УЭС и толщины становятся значительно уже, чем для каждого метода в отдельности. Более точное определение параметров ЗП, в свою очередь, ограничивает диапазон возможных значений УЭС неизменной части пласта.

Тем не менее, зонды ВИКИЗ сконструированы таким образом, чтобы исключать влияние на сигнал токов, индуцируемых в скважине с буровым раствором.

Установленное в программе инверсии ограничение на минимальную возможную толщину зоны проникновения, равное 0.1 м, а также небольшая чувствительность сигналов ВИКИЗ к параметрам тонкой прискважинной зоны, приводят к тому, что подбор сигналов при стартовом значении толщины ЗП, равном 0.1 м, определяется чувствительностью гальванических сигналов и идет преимущественно за счет варьирования значением УЭС ЗП (рис. 2). Алгоритм подбирает завышенное значение УЭС ЗП, оставляя определяемую ширину зоны, приближенной к стартовому значению. При этом значения УЭС проницаемых пластов также оказываются завышенными относительно исходных: на 0.5 Ом·м в верхнем пласте, на 1.5 Ом·м – в среднем и на 2.0 Ом·м – в нижнем. То есть, превышение УЭС пласта над модельным достигает 20 %. В анизотропных пластах горизонтальное УЭС определяется практически равным исходным значениям, а вертикальное – равным или немного заниженным (в нижнем пласте).

Следует отметить очень хорошее качество подбора сигналов зондов постоянного тока, небольшие расхождения подбираемого и подобранного сигналов заметны только для градиент-зонда длиной 4 м в нижней половине расчетного интервала и не превышают 10 %. При этом исходные сигналы всех зондов ВИКИЗ оказываются подобранными только на интервалах непроницаемых пластов. В проницаемых пластах подбирается средний уровень наиболее близких сигналов длинных зондов (верхний и средний пласты) или примерно средний для всех зондов уровень (нижний пласт), что говорит о необходимости дополнительной инверсии в интервалах коллекторов с увеличением веса сигналов ВИКИЗ в суммарной невязке и уменьшением набора подбираемых параметров за счет запрета варьирования параметрами пластов, находящихся в хорошо подобранных интервалах.



**Рис. 2.** Результат инверсии данных БКЗ, ВИКИЗ, БК (стартовая толщина зоны проникновения 0.1 м). Слева направо: УЭС ЗП, горизонтальное (УЭС гориз.) и вертикальное (УЭС верт.) пласта; толщина ЗП ( $h$  ЗП); кажущееся сопротивление по данным: БКЗ (A0.4M0.1N, ..., N0.5M2.0A), БК, ВИКИЗ (L0.5, ..., L2.0). Пунктир – значения параметров и сигналов в исходной модели, сплошная линия – то же в подобранной модели

При стартовом значении ширины зоны проникновения 0.2 м (рис. 3) качество подбора исходных сигналов ВИКИЗ повышается по сравнению с подбором при стартовом значении ширины ЗП 0.1 м. Сигналы зондов постоянного тока практически совпадают с исходными "экспериментальными", в том числе и четырехметрового градиент-зонда. Значения УЭС проницаемых пластов становятся ближе к исходным: превышают на 0.03 Ом·м в верхнем пласте, на 0.09 Ом·м – в среднем и на 0.8 Ом·м – в нижнем. Определяемая алгоритмом толщина зоны проникновения в верхнем проницаемом пласте соответствует модельному значению, УЭС ЗП занижено на 0.08 Ом·м, в среднем пласте значение толщины ЗП занижено на 0.015 м, УЭС ЗП занижено на 0.3 Ом·м, в нижнем толщина ЗП занижена на 0.064 м, а ее УЭС завышено на 1.4 Ом·м. То есть в нижнем пласте, при вполне удовлетворительном качестве подбора сигналов, определяется эквивалентная модельной зона проникновения: толщина меньше, а УЭС больше.

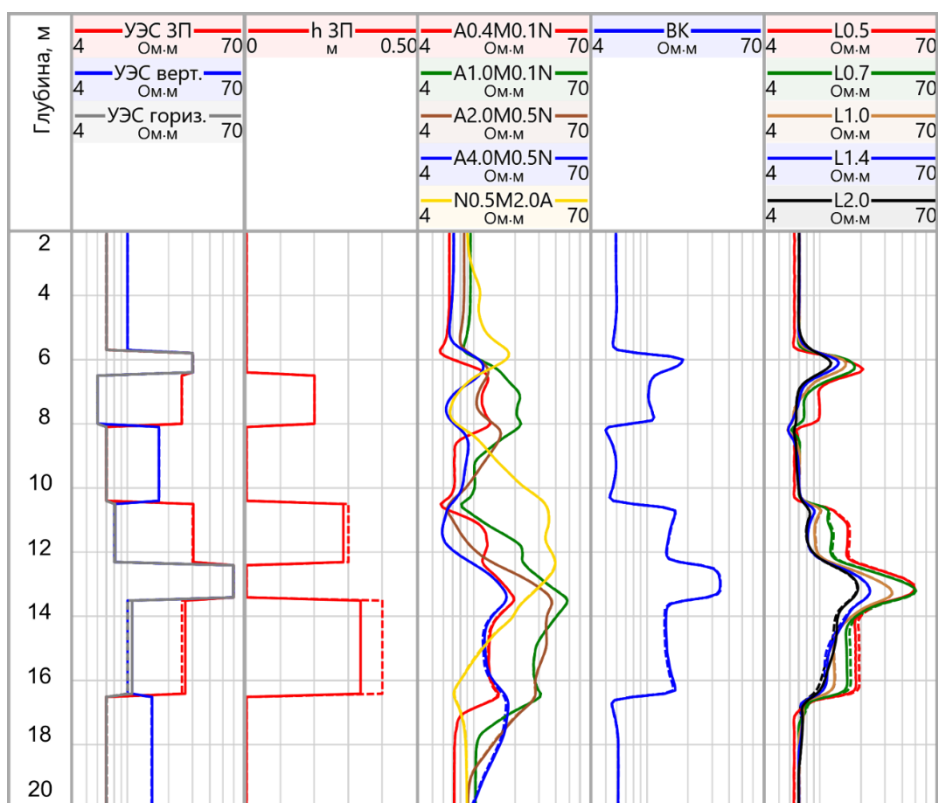


Рис. 3. Результат инверсии данных БКЗ, ВИКИЗ, БК со стартовой шириной зоны проникновения 0.2 м. Обозначения см. рис. 2

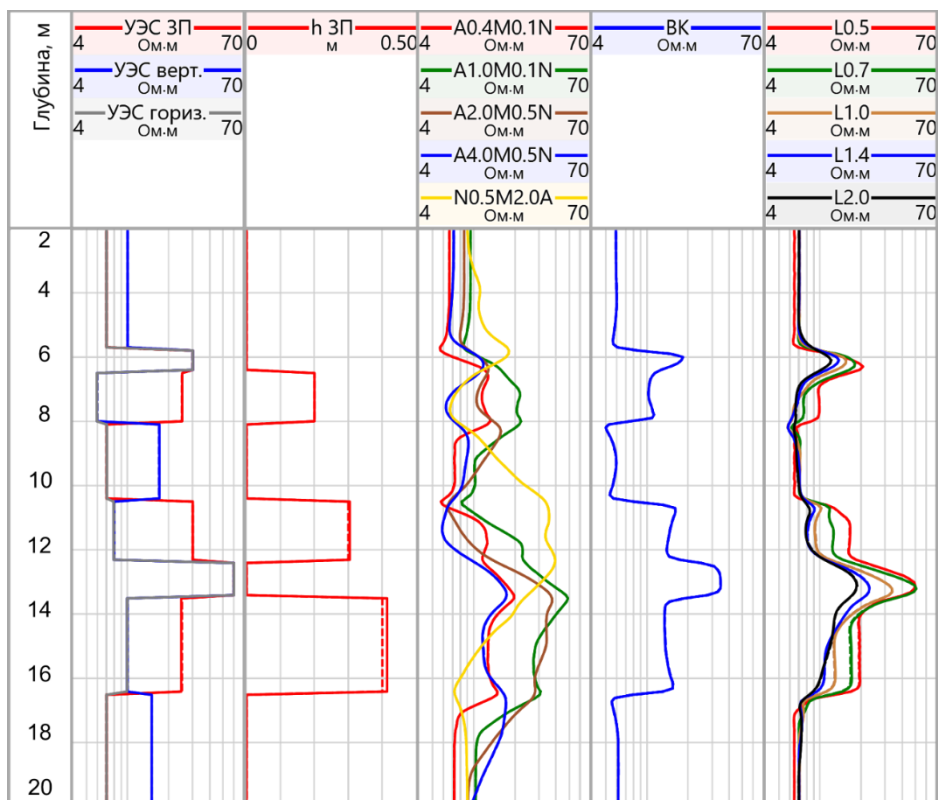


Рис. 4. Результат инверсии данных БКЗ, ВИКИЗ, БК со стартовой шириной зоны проникновения 0.5 м. Обозначения см. рис. 2.

В результате подбора сигналов при стартовом значении ширины ЗП 0.5 м (рис. 4) значения УЭС пронизаемых пластов отличаются от исходных не более чем на толщину линии, т. е. не более чем на 0.1 Ом·м. Параметры зоны проникновения также соответствуют модельным: погрешность в верхнем и среднем пластах не более 0.1 Ом·м, в нижнем пласте около 1 Ом·м, ширина совпадает с модельным значением с точностью до ширины линии в двух верхних пластах и определяется больше на 0.01–0.02 м – в нижнем. При визуальной оценке исходных и полученных сигналов всех представленных методов интервалы расхождений сигналов постоянного тока не выявляются, сигналы коротких зондов ВИКИЗ немного различаются в нижнем пронизаемом пласте (не более чем на 0.5 Ом·м).

Полученные при совместной инверсии данных БКЗ, ВИКИЗ и БК результаты – основание для вывода о том, что при выборе стартовой модели большее внимание следует уделять не столько значениям УЭС, которые подбираются даже с однородного приближения, сколько значениям глубины измененной зоны: если стартовая толщина ЗП слишком мала, чувствительности к ней сигналов ВИКИЗ не хватает, поэтому варьируется прежде всего УЭС ЗП, что обеспечивает хороший подбор сигналов БКЗ и БК, малые значения суммарной невязки и завершение инверсии с плохим качеством подбора сигналов ВИКИЗ.

### **ИНВЕРСИЯ КОМПЛЕКСА ДАННЫХ БКЗ + БК + ИК**

В некоторых случаях совместная инверсия данных БКЗ и ВИКИЗ невозможна, даже если при измерениях соблюдалась технология и известны условия измерения. Основные причины – это разное время каротажа этими методами относительно бурения, в течение которого изменялась прискважинная зона, влияние эксцентриситета прибора в скважине, а также влияние поляризационных (диэлектрических) эффектов, из-за которого в отложениях определяется совершенно разное кажущееся сопротивление по методам постоянного и высокочастотного переменного тока в классе резистивных моделей. При несоблюдении технологии измерения, требований к калибровке приборов, при проведении неуказанной заказчиком предобработки могут оказаться измененными сигналы нескольких зондов, что также приводит к несогласованности данных. Кроме того, в архивных материалах данные ВИКИЗ не содержатся, т. к. метод еще не был разработан. Как альтернативный вариант, в таких скважинах для повышения качества подбираемой при двумерной инверсии геоэлектрической модели можно использовать комплекс данных БКЗ, БК и ИК.

Для глубинного индукционного каротажа максимальна чувствительность к УЭС неизменной части пласта. Кажущееся сопротивление пласта по данным одного зонда ИК будет искажено влиянием зоны проникновения фильтра промывочной жидкости в пласт и тем больше, чем глубже проникновение. Поэтому традиционно сигналы ИК используют в основном для выявления относительно проводящих пластов разреза, к УЭС, которых велика чувствительность даже при наличии повышающей ЗП. Для уменьшения области эквивалентности по параметрам зоны проникновения в этом случае могут быть привлечены приборы, глубинность зондов которых меньше по сравнению с индукционным методом [Антонов и др., 2008].

Данные БК, с другой стороны, при наличии повышающего проникновения фильтра бурового раствора в значительной степени определяются сопротивлением именно повышающей зоны проникновения, поэтому метод не дает надежной информации об УЭС неизменной части пласта. Тем не менее для зонда БК характерна высокая чувствительность к тонким высокоомным пластам в

непроницаемых частях разреза, неправильная оценка параметров которых может привести к ошибкам при учете зон экранирования в сигналах БКЗ.

При совместной инверсии комплекса данных БКЗ, БК и ИК в проницаемых пластах рассматриваемой модели алгоритм подбирает сигналы за счет варьирования значениями УЭС, и практически не изменяет ширину зоны при всех трех заданных стартовых значениях (рис. 5–7).

При стартовом значении ширины ЗП 0.1 м (рис. 5) УЭС проницаемых пластов завышено на 0.2 Ом·м в верхнем пласте, на 0.6 Ом·м в среднем и на 0.95 Ом·м в нижнем. Значения УЭС ЗП значительно завышены в каждом проницаемом пласте: в верхнем на  $\approx 8$  Ом·м, в среднем и нижнем – на  $\approx 16$  Ом·м. Таким образом алгоритм инверсии скомпенсировал влияние небольшой толщины зоны проникновения, чувствительность к которой низка.

Значение сигнала ИК в подобранной модели незначительно завышено относительно исходного сигнала на двух интервалах между проницаемыми пластами, завышение составляет не более 1 Ом·м в наиболее высокоомном пласте. Немного занижены подобранные сигналы БК в интервале среднего проницаемого пласта (не более чем на 0.5 Ом·м). Наибольшие расхождения подобранных и исходных сигналов наблюдаются для зондов A0.4M0.1N и A2.0M0.5N на интервале нижнего проницаемого пласта, зонда A0.4M0.1N – в среднем и A4.0M0.5N ниже среднего проницаемого пласта. Эти расхождения не превышают 1 Ом·м, притом подобранные сигналы короткого зонда больше "экспериментальных", а зонда A2.0M0.5N – меньше, A4.0M0.5N – расхождение подобранных и исходных сигналов не превышает 0.5 на интервале высокоомного пласта и нижнего проницаемого интервала, и не превышают 1 Ом·м в нижнем непроницаемом пласте.

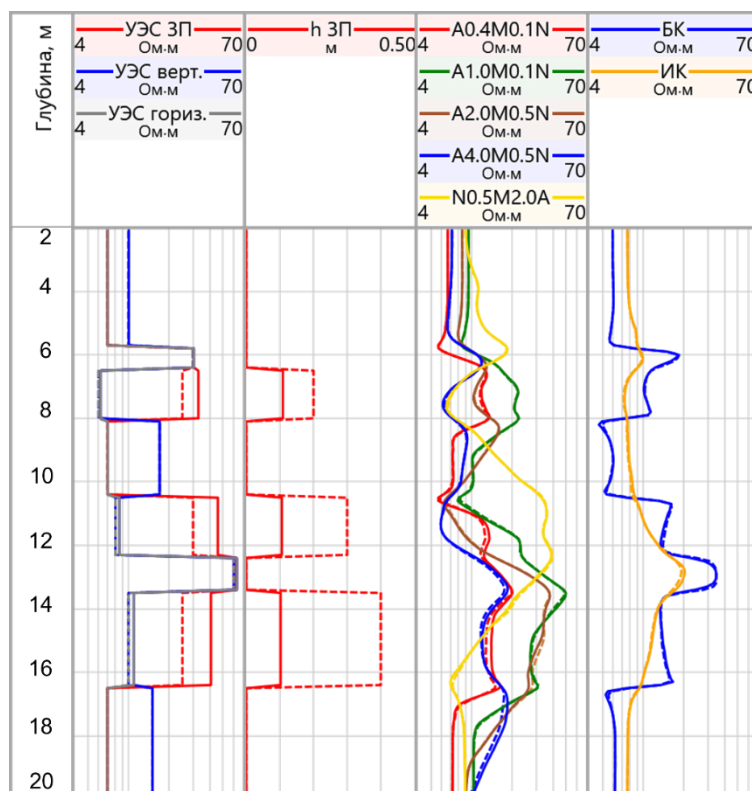
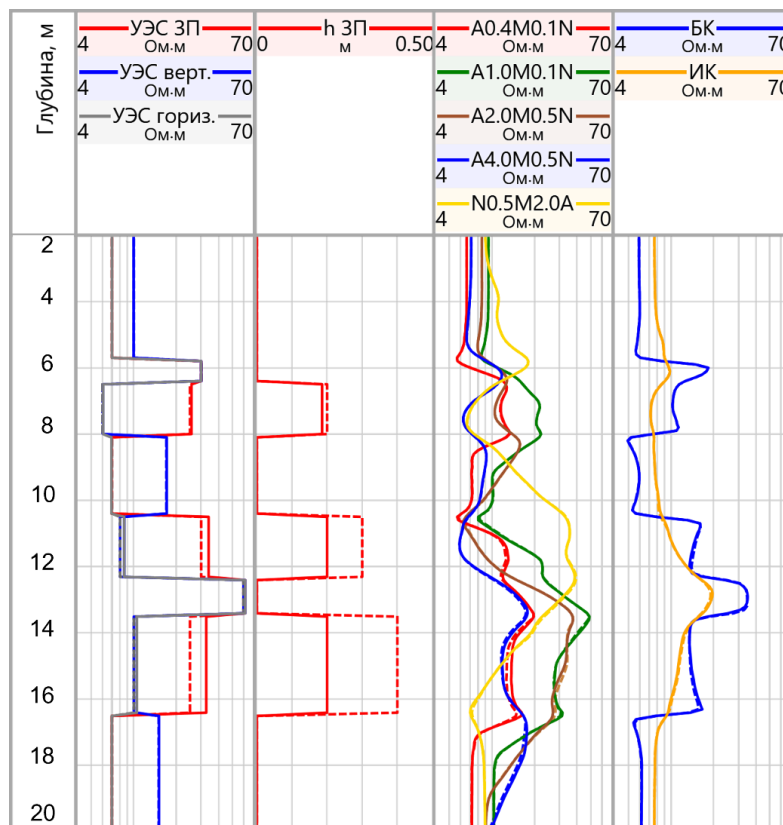


Рис. 5. Результат инверсии данных БКЗ, БК, ИК со стартовой шириной зоны проникновения 0.1 м. Обозначения см. рис. 2

При стартовом значении ширины ЗП 0.2 м (рис. 6) УЭС проницаемых пластов завышено на 0.1 Ом·м в верхнем пласте, на 0.6 Ом·м в среднем и на 0.5 Ом·м в нижнем. Значения УЭС ЗП завышены, как и в предыдущем случае, но не так сильно: в верхнем проницаемом пласте на 0.6 Ом·м, в среднем – на 3.8 Ом·м и нижнем – на 7.6 Ом·м. То есть, при вдвое большей, чем на рис. 5, толщине ЗП превышение УЭС над исходным становится много меньше.



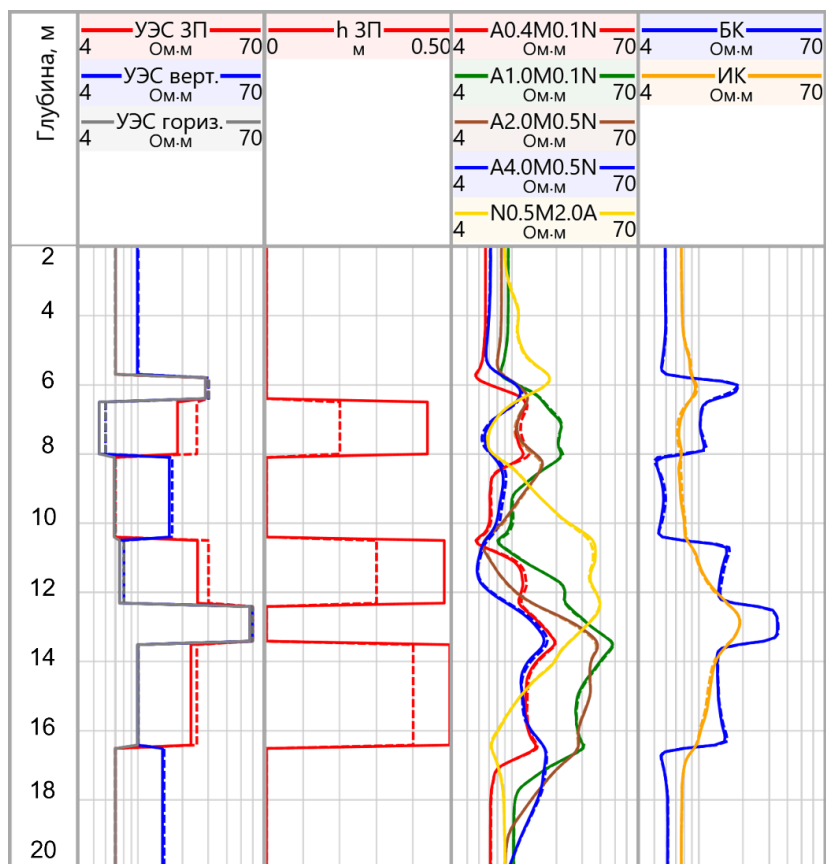
**Рис. 6.** Результат инверсии данных БКЗ, БК, ИК со стартовой шириной зоны проникновения 0.2 м. Обозначения см. рис. 2

Значение сигнала ИК в подобранной модели практически совпадает с исходным сигналом, занижение сигналов БК такое же небольшое и в тех же интервалах. Расхождения подобранных и исходных сигналов заметны для тех же градиент-зондов A0.4M0.1N, A2.0M0.5N и A4.0M0.5N на тех же интервалах, но на меньшие величины.

Увеличение стартового значения толщины ЗП до 0.5 м (рис. 7) приводит к лучшему подбору сопротивлений в среднем и нижнем проницаемых пластах, в которых это значение близко к значению в исходной модели (два нижних пласта). В верхнем пласте намечается некоторое изменение параметра в сторону модельного значения: толщина ЗП уменьшается с 0.50 до 0.43 м. УЭС проницаемых пластов занижено в верхнем и среднем пласте на 0.6 Ом·м, в нижнем на 0.1 Ом·м, т. е. не более чем на 10%. Значения УЭС ЗП занижаются относительно исходных: в верхнем проницаемом слое на 6.6 Ом·м, в среднем на 4.8 Ом·м, а в нижнем на 2.3 Ом·м. То есть для большей, чем исходная, толщине ЗП подбираются меньшие значения УЭС как пластов, так и зон проникновения. Наилучший подбор значений УЭС обеспечивается только при толщине ЗП, близкой к толщине в исходной модели.

Значение сигналов в подобранной модели практически совпадает с исходными сигналами для всех зондов кроме A0.4M0.1N и A4.0M0.5N. Наибольшее расхождение для зонда A0.4M0.1N около

1.5 Ом·м заметно на интервале верхнего проницаемого пласта, для зонда А4.0М0.5N – около 0.5 Ом·м на интервале под верхним проницаемым пластом.



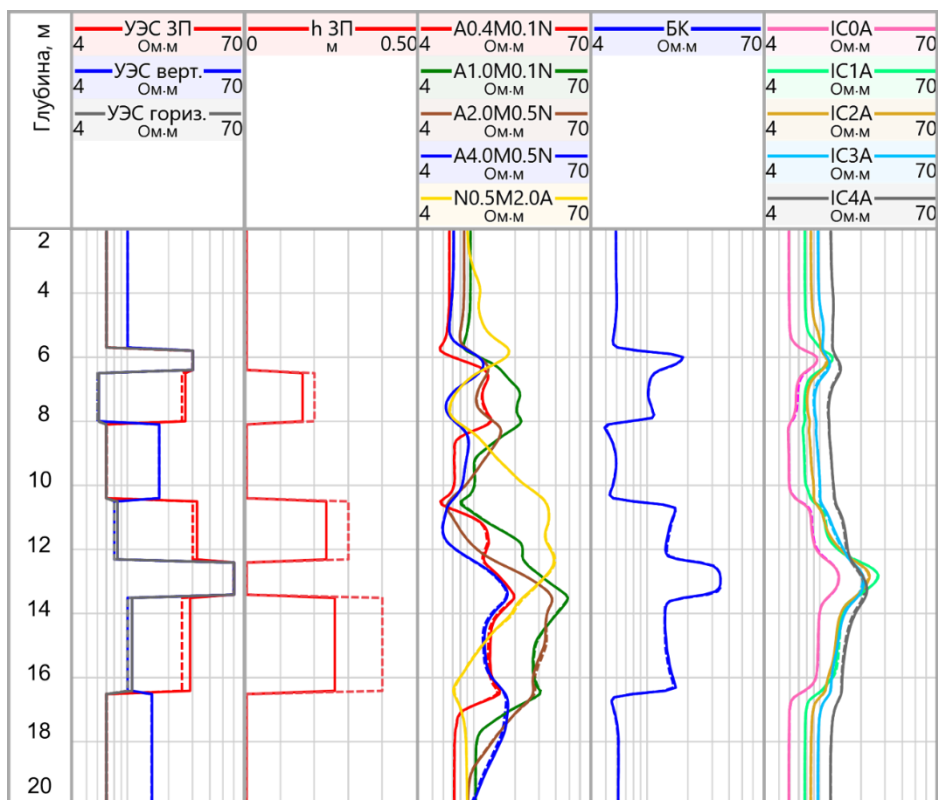
**Рис. 7.** Результат инверсии данных БКЗ, БК, ИК со стартовой шириной зоны проникновения 0.5 м. Обозначения см. рис. 2

Таким образом, для комплекса БКЗ, БК и ИК характерна эквивалентность параметров зоны проникновения, а именно ее толщины и УЭС. Сигналы зондов БКЗ и БК в большей степени чувствительны к УЭС неглубокой прискважинной зоны, чем к ее толщине, и алгоритм инверсии варьирует прежде всего УЭС и подбирает его более высокое значение при меньшей толщине зоны или наоборот.

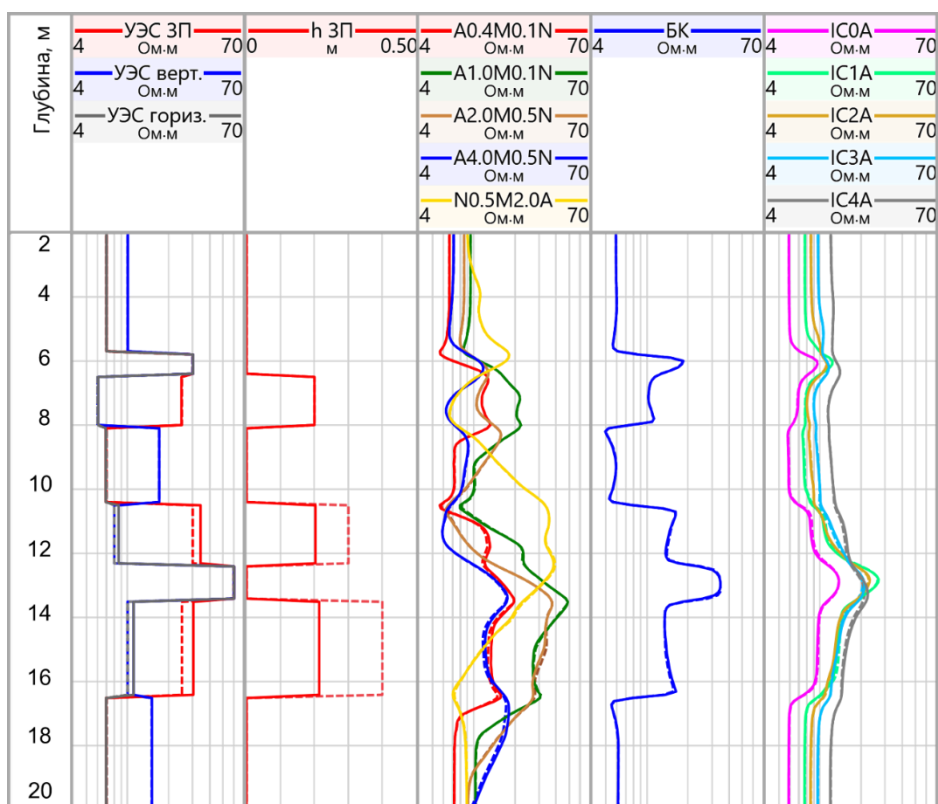
### ИНВЕРСИЯ КОМПЛЕКСА ДАННЫХ БКЗ + БК + 5ИК

В некоторых скважинах проводится каротаж методом многозондового низкочастотного индукционного каротажа (4ИК или 5ИК).

По результатам инверсии данных БКЗ, БК, 5ИК со стартовой толщиной зоны проникновения 0.1 м видна тенденция увеличения этого параметра от верхнего к нижнему проницаемому пласту, что соответствует модели (рис. 8). Тем не менее, значения толщины занижены относительно модельных: в верхнем пласте 0.17 вместо 0.20 м, в среднем – 0.24 вместо 0.30 м, в нижнем 0.26 вместо 0.40 м. Значение УЭС зон проникновения завышено на 1.4, 2.3 и 3.7 Ом·м соответственно. Значение УЭС проницаемых пластов завышено в верхнем пласте на 0.2 Ом·м, в среднем на 0.4 Ом·м, в нижнем на 0.7 Ом·м. Точность подбора сигналов лучше, чем обычно допускается при инверсии практических данных, однако видны систематические расхождения на интервалах проницаемых пластов.



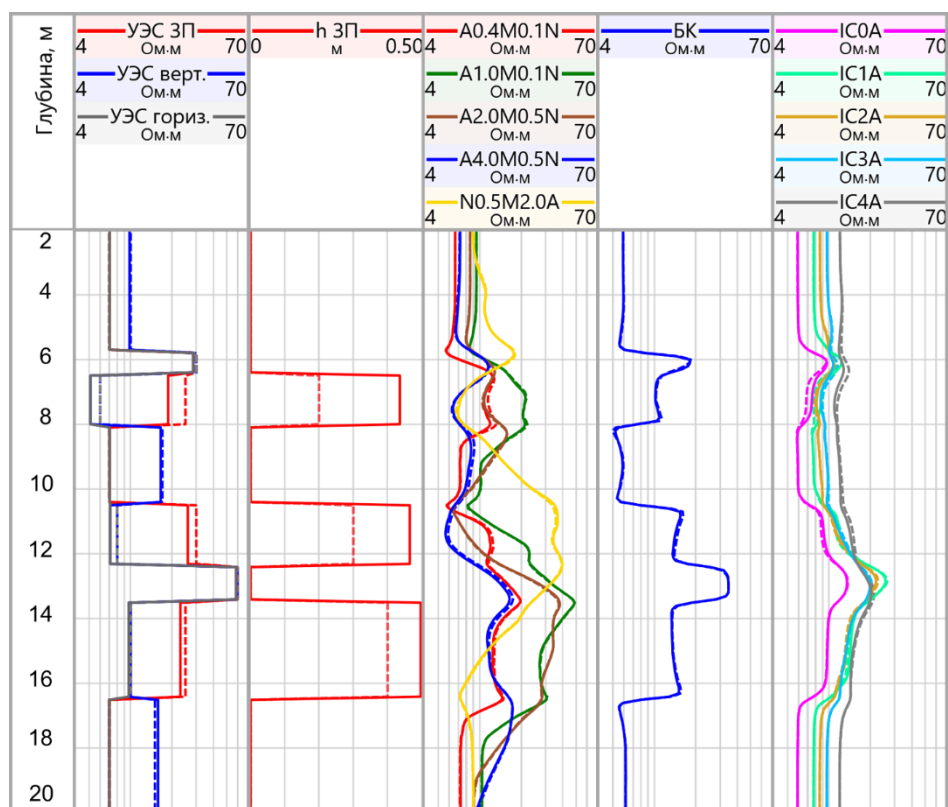
**Рис. 8.** Результат инверсии данных БКЗ, БК, 5ИК со стартовой шириной зоны проникновения 0.1 м. Обозначения см. рис. 2.



**Рис. 9.** Результат инверсии данных БКЗ, БК, 5ИК со стартовой шириной зоны проникновения 0.2 м. Обозначения см. рис. 2.

При других стартовых значениях толщина ЗП почти не отклоняется от них. При стартовом значении толщины ЗП 0.2 м УЭС ЗП в верхнем пласте занижено на 0.3 Ом·м, в среднем – завышено на 4.1 Ом·м, а в нижнем на 5.3 Ом·м; УЭС проницаемых пластов завышено на 0.03, 0.59 и 1.0 Ом·м соответственно (рис. 9), т. е. менее чем на 10 %. Точность подбора сигналов увеличилась только в верхнем проницаемом пласте, в котором ширина ЗП равнялась стартовому значению. В остальных пластах заметны практически не значимые расхождения.

При стартовом значении 0.5 м УЭС ЗП в верхнем пласте занижено на 6.0 Ом·м, в среднем на 3.4 Ом·м, а в нижнем на 2.1 Ом·м; УЭС проницаемых пластов занижено на 1.0 (17 %), 1.0, 0.5 Ом·м соответственно (рис. 10). Сигналы лучше всего подобраны на интервале нижнего проницаемого пласта, поскольку толщина ЗП близка к модельному значению. Наихудшее качество подбора наблюдается для зондов А0.4М0.1N, IC0A, IC1A и IC4A на интервале верхнего проницаемого пласта, что связано, скорее всего, с наибольшим несоответствием значения толщины ЗП значению в исходной модели. Погрешность подбора сигналов в остальных интервалах не превышает значений, допустимых при инверсии практических сигналов.



**Рис. 10.** Результат инверсии данных БКЗ, БК, 5ИК со стартовой шириной зоны проникновения 0.5 м. Обозначения см. рис. 2

Несмотря на увеличение количества зондов и наличие зондирующего параметра – разной длины зондов – нет достаточных оснований однозначно сказать о преимуществах многозондового индукционного каротажа по сравнению с однозондовым ИК в рассмотренной модели отложений.

Добавление к комплексу зондов постоянного тока данных низкочастотного индукционного каротажа не приводит к улучшению определения параметров зоны проникновения.

## ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенного численного эксперимента исследованы возможности совместной численной инверсии данных разных комплексов скважинной электрометрии в классе двумерных геоэлектрических моделей. Значения УЭС и толщин проницаемых и непроницаемых пластов и зон проникновения взяты соответствующими нижнемеловым отложениям Широтного Приобья (Имилорское месторождение).

Для трех встречающихся в материалах ГИС комплексов методов электрокаротажа получены следующие результаты:

- комплексы БКЗ, БК, ИК и БКЗ, БК, 5ИК: корректно определяется пластовое УЭС при широкой области эквивалентности параметров зоны проникновения;
- комплекс БКЗ, БК, ВИКИЗ: корректно определяется пластовое УЭС, при достаточной ширине повышающей зоны проникновения ее параметры определяются корректно, но возможно отсутствие чувствительности при ее толщине около 0.1 м.

Для повышения достоверности определяемых при двумерной инверсии параметров геоэлектрической модели можно предложить следующие методические приемы.

- При построении стартовой модели желательно заранее оценить толщину зоны проникновения, особенно при комплексировании сигналов зондов БКЗ с сигналами низкочастотного ИК. В общем случае не рекомендуется использовать в стартовой модели толщины зоны проникновения менее 0.2 м.
- После инверсии большого многопластового интервала следует анализировать качество подбора в целевых проницаемых пластах и при необходимости уточнять их параметры повторной инверсией в ограниченной области с варьированием стартового значения толщины зоны проникновения.

Во всех случаях сигналы постоянного тока подбираются с небольшой невязкой, что говорит об их слабой чувствительности к толщине ЗП в рассмотренном диапазоне ее значений, которая компенсируется за счет подбора УЭС ЗП и пласта. То есть для любого значения толщины будет найдено такое УЭС, что рассчитанные сигналы совпадут с измеренными в пределах погрешности измерения. При этом если в стартовой модели толщина ЗП занижена, то УЭС неизменной части коллекторов может завышаться, но не более чем на 10 %, а при условии отсутствия чувствительности сигналов ВИКИЗ к тонкой зоне проникновения, т. е. при ее толщине около 0.1 м, – в пределах 20 %.

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

## ЛИТЕРАТУРА

- Антонов Ю.Е., Кашеваров А.А., Ельцов И.Н.** Совместная инверсия данных индукционного и электрического микрокаротажа // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2008. – Т. 5. – С. 121–126.
- Гурленов Е.М., Данилов В.Н., Зубарев А.П.** Комплексирование геолого-технологических, геофизических, геохимических и петрофизических исследований // Каротажник. – 1997. – № 34. – С. 49–54.
- Ельцов И.Н., Эпов М.И., Кашеваров А.А.** Новый системный подход к интерпретации данных ГИС и ГТИ на основе комплексных геофизических и гидродинамических моделей // Технологии ТЭК. – 2005 – № 2 (21) – С. 12–18.

- Кнеллер Л.Е., Потапов А.П.** Определение удельного электрического сопротивления пластов при радиальной и вертикальной неоднородности разреза скважин // Геофизика. – 2010. – № 1. – С. 52–64.
- Нечаев О.В., Глинских В.Н.** Быстрый прямой метод решения обратной задачи электрического каротажа в нефтегазовых скважинах // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. – 2017. – № 15 (4). – С. 53–63, doi: 10.25205/1818-7900-2017-15-4-53-63.
- Петров А.М., Нечаев О.В., Сухорукова К.В.** Быстрая совместная двумерная инверсия данных электромагнитных и гальванических каротажных зондирований с определением вертикального сопротивления // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XIV Международный научный конгресс (г. Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.): Междунар. науч. конф. "Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология": Сборник материалов в 6 т., СГУГиТ, Новосибирск. – 2018. – Т. 4. – С. 90–98.
- Петров А.М., Сухорукова К.В.** Оценка погрешности определения параметров среды при двумерной инверсии сигналов российского электрокаротажа с использованием статического моделирования // Геофизические технологии. – 2020. – № 1. – С. 4–15, doi: 10.18303/2619-1563-2020-1-4.
- Петров А.М., Сухорукова К.В., Нечаев О.В.** Совместная двумерная инверсия данных электрического и электромагнитного каротажных зондирований в анизотропных моделях песчано-глинистых отложений // Каротажник. – 2019. – № 3 (297). – С. 85–103.
- 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.
- Табаровский Л.А., Эпов М.И.** Оценка разрешающей способности электромагнитных методов // Геология и геофизика. – 2006. – № 47 (5). – С. 568–578.
- Табаровский Л.А., Эпов М.И., Сосунов О.Г.** Оценка разрешающей способности электромагнитных методов и подавление помех в системах многократного наблюдения (теория, алгоритмы, программы). (Препринт / ИГиГ СО АН СССР; № 7). – Новосибирск. – 1985. – 48 с.
- Ульянов В.Н., Эпов М.И.** Характеристики пространственного разрешения зондов ВИКИЗ // Электрические и электромагнитные методы исследования в нефтегазовых скважинах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН. – 1998. – С. 196–211.
- Эпов М.И., Глинских В.Н., Ульянов В.Н.** Оценка характеристик пространственного разрешения систем индукционного и высокочастотного электромагнитного каротажа в терригенных разрезах Западной Сибири // Каротажник. – 2001. – № 81. – С. 19–57.
- Li Sh., Liu R.C., Navarro D., Li Ch., Zhou C.** Joint inversion of SP and dual laterlog/ dual induction data in 2D formation // Transactions of the SPWLA 48th Annual Logging Symposium (Austin, Texas, United States, 3–6 June 2007). – 2007. – SPWLA-2007-ZZ, <https://onepetro.org/SPWLAALS/proceedings-abstract/SPWLA07/All-SPWLA07/SPWLA-2007-ZZ/27822>.
- Mezzatesta A.G., Payton C.C., Strack K.M., Tabarovsky L.A.** Simultaneous inversion of galvanic and induction logging measurements to improve resolution // SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference. – Buenos Aires, 1994. – SPE-26976-MS, doi: 10.2118/26976-MS.
- Rabinovich M., Tabarovsky L.** Enhanced anisotropy from joint processing of multicomponent and multiarray induction tools // 42nd Annual Logging Symposium (Houston, Texas, United States, 17–20 June 2001). – Houston, 2001. – SPWLA-2001-HH.

**Yang W.** Determining resistivity anisotropy by joint lateral and induction logs // SPWLA 42nd Annual Logging Symposium. – Houston, 2001. – SPWLA-2001-CC.

## REFERENCES

**Antonov Yu.E., Kashevarov A.A., Yeltsov I.N.** Joint inversion of induction and microresistivity data // Proceedings of International congress GEO-Sibir-2008. – SGUGiT, Novosibirsk, 2008. – Vol. 5. – P. 121–126.

**Epov M.I., Glinskikh V.N., Uljanov V.N.** Evaluation of spatial resolution characteristics of induction and high-frequency electromagnetic logging systems in terrigenous sections of Western Siberia // *Karotazhnik*. – 2001. – Vol. 81. – P. 19–57.

**Gurlenov E.M., Danilov V.N., Zubarev A.P.** Integration of geological and technological, geophysical, geochemical and petrophysical studies // *Karotazhnik*. – 1997. – Vol. 34. – P. 49–54.

**Kneller L.E., Potapov A.P.** Reservoir rock resistivity studies while lateral and vertical heterogeneity // *Geofizika*. – 2010. – Vol. 1. – P. 52–64.

**Li Sh., Liu R.C., Navarro D., Li Ch., Zhou C.** Joint inversion of SP and dual laterlog/ dual induction data in 2D formation // Transactions of the SPWLA 48th Annual Logging Symposium (Austin, Texas, United States, 3–6 June 2007). – 2007. – SPWLA-2007-ZZ, <https://onepetro.org/SPWLAALS/proceedings-abstract/SPWLA07/All-SPWLA07/SPWLA-2007-ZZ/27822>.

**Mezzatesta A.G., Payton C.C., Strack K.M., Tabarovsky L.A.** Simultaneous inversion of galvanic and induction logging measurements to improve resolution // SPE Latin America/Caribbean Petroleum Engineering Conference. – Buenos Aires, 1994. – SPE-26976-MS, doi: 10.2118/26976-MS.

**Nechaev O.V., Glinskikh V.N.** Fast direct method for solving inverse problems of electrical logging in oil and gas wells // *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. – 2017. – Vol. 15 (4). – P. 53–63, doi: 10.25205/1818-7900-2017-15-4-53-63.

**Petrov A.M., Nechaev O.V., Sukhorukova C.V.** Fast joint two-dimensional electromagnetic and galvanic logging data inversion with vertical resistivity evaluation data // Proceedings of XIV International congress GEO-Sibir-2018. – SGUGiT, Novosibirsk, 2018. – Vol. 4. – P. 90–98.

**Petrov A.M., Sukhorukova K.V.** Evaluation of the uncertainties in two-dimensional inversion of the Russian electric logging signals using statistical modeling // *Russian Journal of Geophysical Technologies*. – 2020. – Vol. 1. – P. 4–15, doi: 10.18303/2619–1563–2020–1–4.

**Petrov A.M., Sukhorukova K.V., Nechaev O.V.** A combined two-dimension inversion of electric and electromagnetic sounding logs in models of anisotropic sand-and-clay sediments // *Karotazhnik*. – 2019. – Vol. 3 (297). – P. 85–103.

**Rabinovich M., Tabarovsky L.** Enhanced anisotropy from joint processing of multicomponent and multiarray induction tools // 42nd Annual Logging Symposium (Houston, Texas, United States, 17–20 June 2001). – Houston, 2001. – SPWLA-2001-HH.

**Sukhorukova K.V., Petrov A.M., Nechaev O.V.** Geoelectric models of cretaceous reservoirs of West Siberia by the results of integrated interpretation of electric log data // *Geology and Mineral Resources of Siberia*. – 2020. – Vol. 3 (41). – P. 77–86 pp. [http://www.jourgimss.ru/SitePages/catalog/2020/03/abstract/2020\\_3\\_77.aspx](http://www.jourgimss.ru/SitePages/catalog/2020/03/abstract/2020_3_77.aspx).

**Tabarovsky L.A., Epov M.I.** Estimating resolution of electromagnetic logging // *Russian Geology and Geophysics*. – 2006. – Vol. 47 (5). – P. 563–573.

**Tabarovsky L.A., Eпов M.I., Sosunov O.G.** Evaluation of the Resolution of Electromagnetic Methods and Noise Suppression in Multiple Observation Systems (Theory, Algorithms, Programs): Preprint No.7, Institute of Geology and Geophysics SB of Academy of Sciences, USSR. – Novosibirsk. – 1985. – 48 p.

**Uljanov V.N., Eпов M.I.** Spatial resolution characteristics of VIKIZ probes. – Publishing House of the SB RAS, Novosibirsk, 1998. – P. 196–211.

**Yang W.** Determining resistivity anisotropy by joint lateral and induction logs // SPWLA 42nd Annual Logging Symposium. – Houston, 2001. – SPWLA-2001-CC.

**Yeltsov I.N., Eпов M.I., Kashevarov A.A.** A new systematic approach to the interpretation of geophysical and technological log data based on integrated geophysical and hydrodynamic models // TEK Technologies. – 2005. – № 2 (21) – P. 12–18.

### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*ЛАПКОВСКАЯ Анита Александровна* – инженер лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: количественная интерпретация комплекса данных скважинной электрометрии в вертикальных скважинах в классе двумерных анизотропных геоэлектрических моделей.

*СУХОРУКОВА Карина Владимировна* – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: количественная интерпретация комплекса данных скважинной электрометрии в вертикальных и субгоризонтальных скважинах.

*ПЕТРОВ Алексей Михайлович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Область научных интересов Основные научные интересы: методическое и программное обеспечение количественной интерпретации данных зондирующих методов скважинной электрометрии.

*НЕЧАЕВ Олег Валентинович* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: численное моделирование и инверсия данных разведочной и скважинной электрометрии.

*Статья поступила в редакцию 10 ноября 2022 г.,  
принята к публикации 7 декабря 2022 г.*