

УДК 550.832.75

Б. В. Рудяк, О. М. Снежко, Ю. Л. Шеин

ТЕХНОЛОГИЯ ИНДУКЦИОННОГО КАРОТАЖНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Технология индукционного каротажного зондирования высокого разрешения, реализованная на базе пятизондовой аппаратуры индукционного каротажа, предусматривает цифровую калибровку, цифровую регистрацию данных ИК, а также процедуру обработки результатов скважинных измерений, формирующую набор синтетических диаграмм, соответствующих зондам с заданными радиальными и вертикальными характеристиками. Приведены характеристики физических и синтетических зондов аппаратуры 5ИК. На расчетных и скважинных материалах продемонстрирована высокая эффективность разработанной технологии.

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление, индукционное каротажное зондирование, синтетические зонды.

В 2005 г. в ООО “Нефтегазгеофизика” была разработана пятизондовая скважинная аппаратура индукционного каротажа 5ИК. Она стала развитием хорошо зарекомендовавшей себя четырехзондовой аппаратуры ИКЗ-2 [1] и ее последующих модификаций (ИКЗ-2М, ИКЗ-2-О, 4ИК и др.), выпускавшихся серийно с 1998 г. в Твери и Киеве (КОЭЗГП). В аппаратуре 5ИК, так же как и в ее прототипе, реализована одновременная регистрация активных и реактивных компонент кажущейся проводимости по каждому из пяти индукционных зондов (ЗИ0,3; ЗИ0,5; ЗИ0,85; ЗИ1,26; ЗИ2,05). Дополнительно регистрируется кривая естественной поляризации (ПС). Основное отличие 5ИК от 4ИК состоит в дополнении комплекса коротким зондом ЗИ0,3 (база 30 см). Включение этого зонда в комплекс предполагало цель повышения информативности аппаратуры в ближней зоне исследования.

На рис. 1, 2 приведены радиальные и вертикальные характеристики зондов, а в табл. 1 – величины их вертикальных разрешений и радиусов исследований. Как видно из этих данных, радиусы исследования зондов аппаратуры 5ИК изменяются в достаточно широких пределах (от 40 см до 3 м), однако их вертикальное разрешение также имеет значительный диапазон, у длинных зондов оно составляет 1,5–2,5 м.

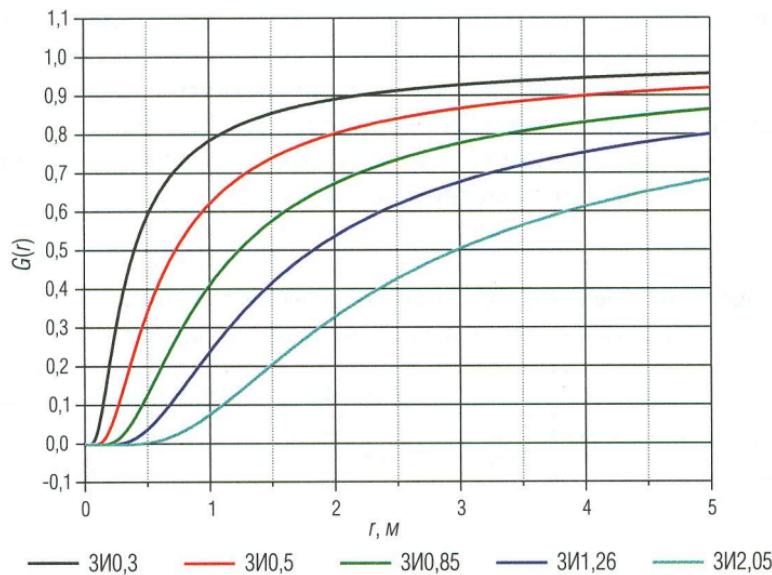


Рис. 1. Интегральные радиальные характеристики зондов аппаратуры 5ИК

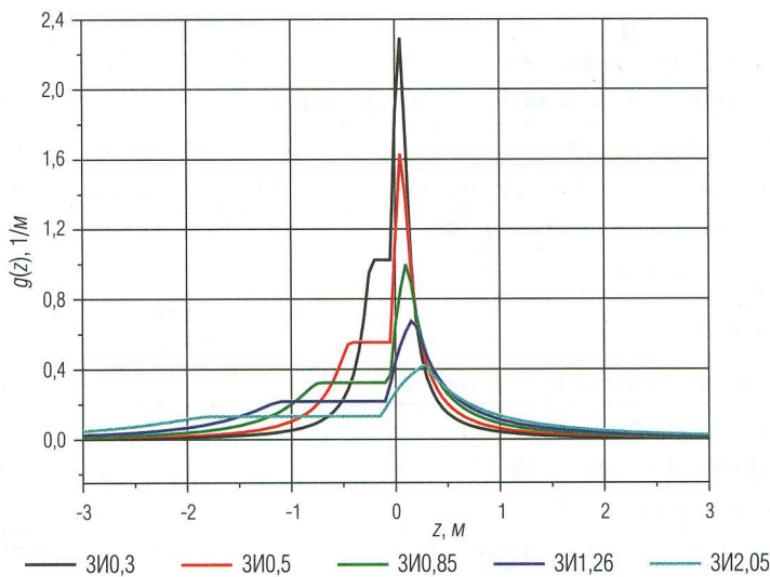


Рис. 2. Дифференциальные вертикальные характеристики зондов аппаратуры 5ИК

В табл. 2 приведены технические характеристики аппаратуры 5ИК для различных исполнений по термобаростойкости, в табл. 3 – диапазоны измерений зондов, входящих в состав комплекса. Габаритные размеры, масса, потребляемая мощность, условия эксплуатации по температуре и давлению скважинного прибора 5ИК не отличаются от соответствующих параметров прибора 4ИК.

Таблица 1
Пространственное разрешение зондов аппаратуры 5ИК
в приближении геометрического фактора

Зонд	ЗИ0,3	ЗИ0,5	ЗИ0,85	ЗИ1,26	ЗИ2,05
Вертикальное разрешение $H_{0,5}$, м	0,35	0,61	1,03	1,54	2,50
Радиус исследования $R_{0,5}$, м	0,4	0,72	1,23	1,82	2,97

Таблица 2
Технические характеристики аппаратуры

Параметр	Вариант исполнения	
	Кабельный	Автономный
Длина скважинного прибора, мм	3710 (120 °C)	5476
Максимальный диаметр скважинного прибора, мм	76	90
Масса скважинного прибора, кг	< 60	< 150
Максимальная рабочая температура, °C	120, 150, 175, 200	90, 120
Максимальное рабочее давление, МПа	80, 100, 120, 140	80, 100
Скорость каротажа, м/ч	1200–1500	400
Телеметрия	Манчестер-2, 22 кбод	–
Число регистрируемых цифровых каналов	20	26
Число регистрируемых аналоговых каналов	1 (ПС)	–
Число измеряемых параметров	25	26
Рабочая частота зондов, кГц	100	100
Диапазон диаметров исследуемых скважин, мм	90–350	120–400
Питание скважинной аппаратуры	~220 В, 50 Гц	Автономное
Потребляемая мощность, Вт	10	5

Таблица 3
Диапазоны измерений зондов аппаратуры 5ИК

Измеряемые параметры		Диапазон измерений		Основная погрешность $\pm(0,03 \times \sigma_k + 1 \text{ мСм}/\text{м})$
Зонд	Канал	$\sigma_k, \text{ мСм}/\text{м}$	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	
ЗИ0,3	Активный	3–2000	0,3–300	
	Реактивный	3–1500	0,3–15	
ЗИ0,5	Активный	3–1500	0,3–300	
	Реактивный	3–1500	0,3–20	
ЗИ0,85	Активный	3–1000	0,5–300	
	Реактивный	3–1000	0,3–30	
ЗИ1,26	Активный	3–500	0,8–300	
	Реактивный	3–1000	0,3–35	
ЗИ2,05	Активный	3–300	2,0–300	
	Реактивный	3–700	0,3–45	

Аппаратура выпускается в двух основных модификациях – для проведения работ на кабеле и на бурильных трубах (автономное исполнение). Обе модификации являются транзитными, что позволяет при работе в сборках размещать ниже прибора 5ИК другие скважинные приборы. В кабельном исполнении аппаратура работает с регистрирующим оборудованием, обеспечивающим прием и передачу информации в коде Манчестер-2, каротажной станцией с трехжильным грузонесущим кабелем длиной до 8000 м. В автономном исполнении аппаратура работает с регистрирующим оборудованием, обеспечивающим подготовку скважинного прибора к каротажу, считывание данных каротажа из модуля памяти скважинного прибора и редактирование этих данных с записью на цифровой носитель. В силу единства комплекса зондов кабельная и автономная модификации имеют единое программно-методическое обеспечение для обработки данных каротажа.

Для эксплуатации аппаратуры 5ИК с каротажным регистратором «Каскад» в ООО «Нефтегазгеофизика» разработано программное обеспечение:

- для настройки и тестирования прибора на базе (для ремонтных служб предприятия);
- базовой калибровки аппаратуры;

- тестирования прибора перед каротажом (операторским составом);
- регистрации данных (для кабельного исполнения), считывания и редактирования данных (для автономного исполнения).

При использовании регистраторов других типов для полноценного функционирования аппаратуры 5ИК необходимо наличие ПО, выполняющего перечисленные функции.

На базе аппаратуры 5ИК в ООО “Нефтегазгеофизика” завершена разработка технологии индукционного каротажного зондирования высокого разрешения. Технология, в частности, предусматривает процедуру цифровой базовой калибровки, цифровую регистрацию данных ИК, а также процедуру обработки результатов скважинных измерений, формирующую набор диаграмм синтетических зондов с заданными радиальными и вертикальными характеристиками. Для этого были разработаны алгоритмы построения диаграмм синтетических зондов аппаратуры 5ИК, впервые реализованные фирмой “Шлюмберже” в аппаратуре АИТ [3].

Показания синтетических зондов индукционного каротажа в каждой точке рассчитываются как взвешенная сумма комбинаций активных и реактивных компонент физических зондов в нескольких точках по вертикалам:

$$\sigma_a^{syn}(z) = \sum_{l=1}^L \sum_{z'=z_{\min}}^{z_{\max}} w_l(z') \sigma_a^{(l)}(z - z'), \quad (1)$$

где $\sigma_a^{syn}(z)$ — показания синтетического зонда в точке z ; $\sigma_a^{(l)}(z)$ — комбинация активной и реактивной компонент l -го физического зонда; $w(z)$ — набор весовых функций (фильтр). Фильтр каждого синтетического зонда строится так, чтобы этот зонд обладал необходимыми вертикальными и радиальными характеристиками.

Учет реактивных компонент кажущихся проводимостей физических зондов дает возможность заметно уменьшить влияние проводимости среды на пространственные характеристики синтетических зондов. Если радиусы исследований и вертикальное разрешение исходных физических зондов достаточно сильно зависят от проводимости среды, то использование реактивных компонент сигналов при построении синтетических зондов (1) существенно ослабляет эту зависимость.

Для зондов аппаратуры 5ИК построены два семейства синтетических зондов: с вертикальным разрешением 2 и 4 фута (при

90%-ном геометрическом факторе от пласта толщиной 2 или 4 фута соответственно). Каждое семейство имеет 5 синтетических зондов с глубинностью исследования в радиальном направлении 10, 20, 35, 60, 90 дюймов (под глубинностью подразумевается радиус цилиндра с геометрическим фактором, равным 1/2). На рис. 3 приведены радиальные интегральные характеристики синтетических зондов аппаратуры 5ИК (не зависящие от вертикального расчленения), а на рис. 4 – дифференциальные вертикальные характеристики зондов с разрешением 2 и 4 фута (практически не зависящие от радиальной глубинности). Примеры пространственных характеристик синтетических зондов аппаратуры 5ИК приведены на рис. 5. Обращает на себя внимание симметричность вертикальных характеристик синтетических зондов, в отличие от характеристик физических зондов.

Использование диаграмм синтетических зондов с одинаковым высоким вертикальным разрешением и симметричными вертикальными характеристиками позволяет устраниить проблему отмеченной выше значительной разницы в вертикальном разрешении разноглубинных физических зондов и повысить достоверность определения электрических параметров тонких пластов.

Модули обработки показаний зондов аппаратуры 5ИК, включая процедуры построения синтетических диаграмм, входят в состав программно-методических комплексов LogPWin [4] и LogWin-ЭК [2, 5]. Комплекс LogPWin обеспечивает выполнение первичной обработки данных аппаратуры 5ИК (получение исправленных за скин-эффект кривых кажущихся сопротивлений, введение поправок за влияние скважины, построение синтетических диаграмм сопротивлений и оценку электрических характеристик разреза). Комплекс LogWin-ЭК позволяет проводить полную интерпретацию данных 5ИК совместно с другими электрическими методами ГИС. Методические возможности и техническая работоспособность разработанного программного обеспечения тестировались на расчетных и скважинных материалах.

На рис. 6 представлены результаты обработки расчетных данных для модельного разреза. Разрез представляет собой чередование пластов толщиной 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 м, не имеющих проникновения фильтрата промывочной жидкости (ПЖ). В первом треке размещены активные компоненты кажущихся сопротивлений физических зондов, исправленные за скин-эффект и влияние скважины.

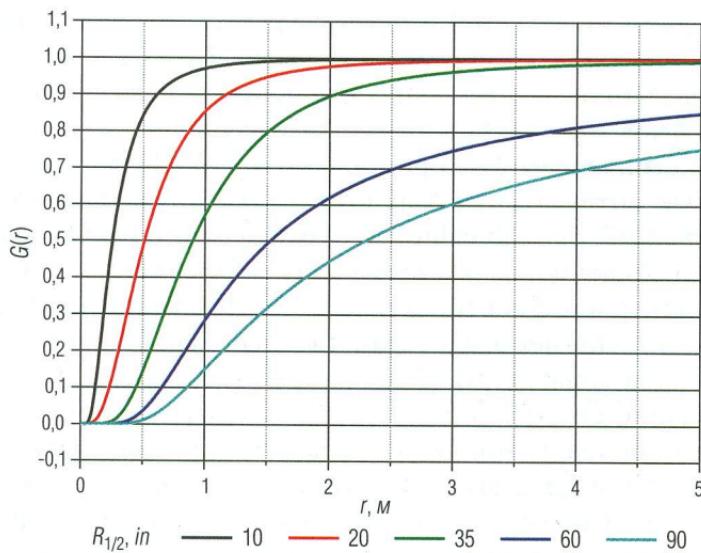


Рис. 3. Интегральные радиальные характеристики синтетических зондов аппаратуры 5ИК

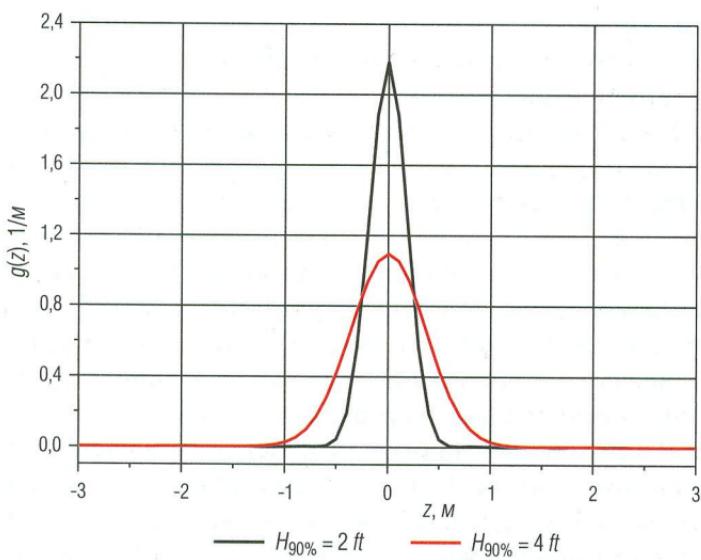


Рис. 4. Дифференциальные вертикальные характеристики двух семейств синтетических зондов аппарата 5ИК с разрешением 2 и 4 фута

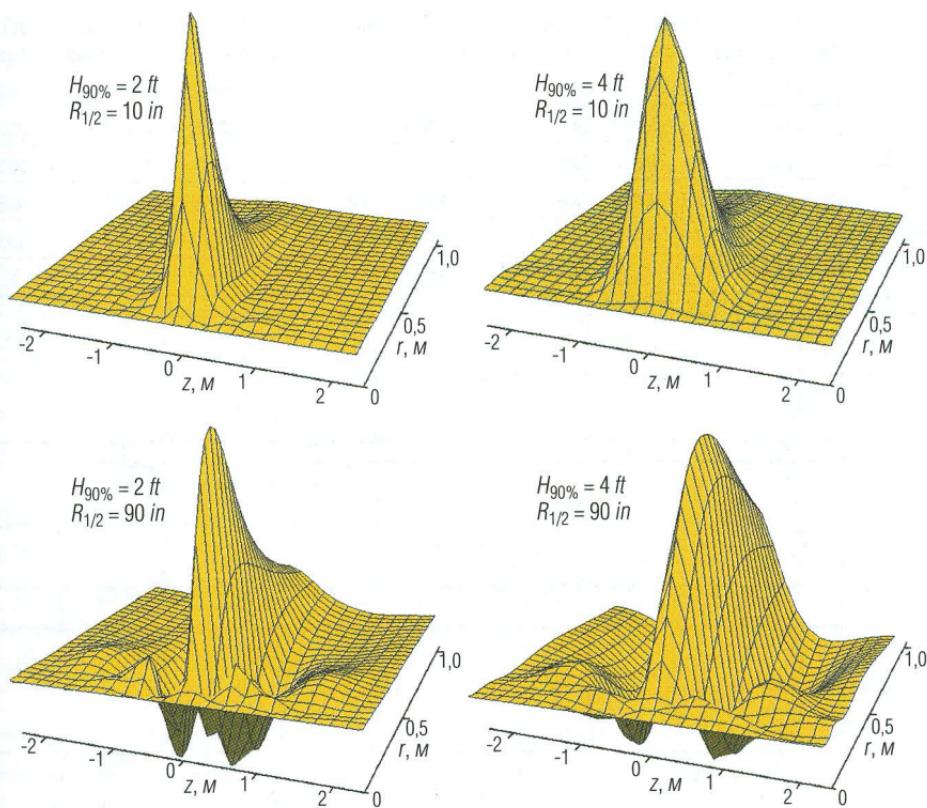


Рис. 5. Примеры пространственных характеристик $g(r, z)$ синтетических зондов аппарата 5ИК

Во втором и третьем треках – кажущиеся сопротивления синтетических зондов с вертикальным разрешением 4 и 2 фута соответственно. Первая цифра в названиях синтетических зондов соответствует вертикальному разрешению в футах (2 или 4), две последующие – радиальной глубинности в дюймах. Сопоставление диаграмм физических и синтетических зондов показывает, что диаграммы синтетических зондов гораздо лучше соответствуют профилю удельного электрического сопротивления (УЭС) разреза, чем диаграммы физических зондов, причем диаграммы разноглубинных синтетических зондов каждого из семейств (с разрешением в 2 или 4 фута) в разрезе без проникновения ПЖ практически совпадают.

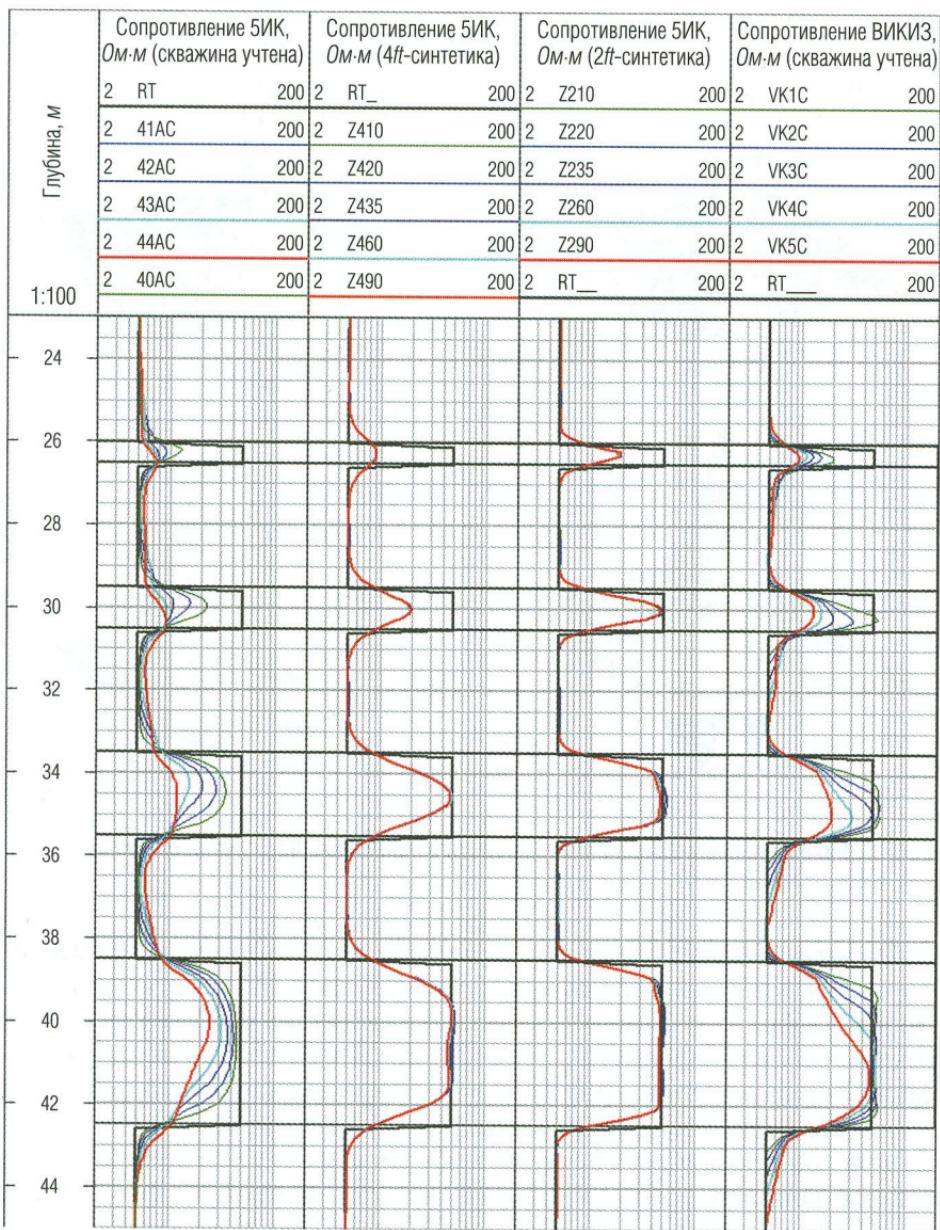


Рис. 6. Кривые КС зондов аппаратуры 5ИК и ВИКИЗ в модельном разрезе без проникновения ПЖ ($d_h = 216$ мм, УЭС ПЖ = 1,0 Ом·м)

Аномалии против пластов на диаграммах синтетических зондов практически симметричны, несмотря на то, что диаграммы физических трехкатушечных зондов ИК (как и диаграммы зондов ВИКИЗ, также являющихся трехкатушечными, приведенные для сравнения в четвертом треке) обладают заметной асимметрией, особенно в тонких пластиах. В результате анализа диаграмм синтетических зондов 5ИК в различных модельных разрезах было установлено, что надежные результаты могут быть получены при значении УЭС пластов более $2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, когда влияние скин-эффекта может быть корректиро учтено. Диаграммы синтетических зондов с разрешением 2 фута целесообразно использовать при относительно невысоких контрастностях УЭС разреза и применении пресных ПЖ ($\text{УЭС ПЖ} > 0,2 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). При высоких контрастностях УЭС разреза и наличии ПЖ с низким УЭС необходимо использовать синтетические зонды с разрешением 4 фута. Для расширения области применимости синтетических зондов 5ИК в низкоомной части диапазона УЭС разреза необходимы снижение рабочей частоты зондов комплекса (в первую очередь длинных зондов) либо переход на многочастотные системы измерений с включением рабочих частот порядка $20\text{--}40 \text{ кГц}$.

Процедура построения синтетических зондов предъявляет более высокие требования как к качеству обрабатываемых материалов ИК, так и к корректности процедуры учета влияния скважины, чем традиционные методы обработки. В частности, требуется информация о положении прибора в скважине (центрирован, отклонен, на стенке). Отсюда следует необходимость применения при каротаже центраторов или, как минимум, отклонителей.

Результаты обработки скважинных данных, полученных кабельным вариантом аппаратуры 5ИК с использованием отклонителей в вертикальной скважине, заполненной пресной ПЖ, представлены на рис. 7. Во втором треке размещены активные компоненты кажущихся сопротивлений физических зондов, исправленные за скин-эффект и влияние скважины. В третьем треке находятся кажущиеся сопротивления синтетических зондов с вертикальным разрешением 2 фута. Для удобства сопоставления во втором и третьем треках размещены идентичные кривые MLL (данные зонда бокового микрокаротажа). Обращают на себя внимание тонкие пласти высокого сопротивления, залегающие в интервалах $2671,3\text{--}2672,7$ и $2687,5\text{--}2689,7 \text{ м}$.

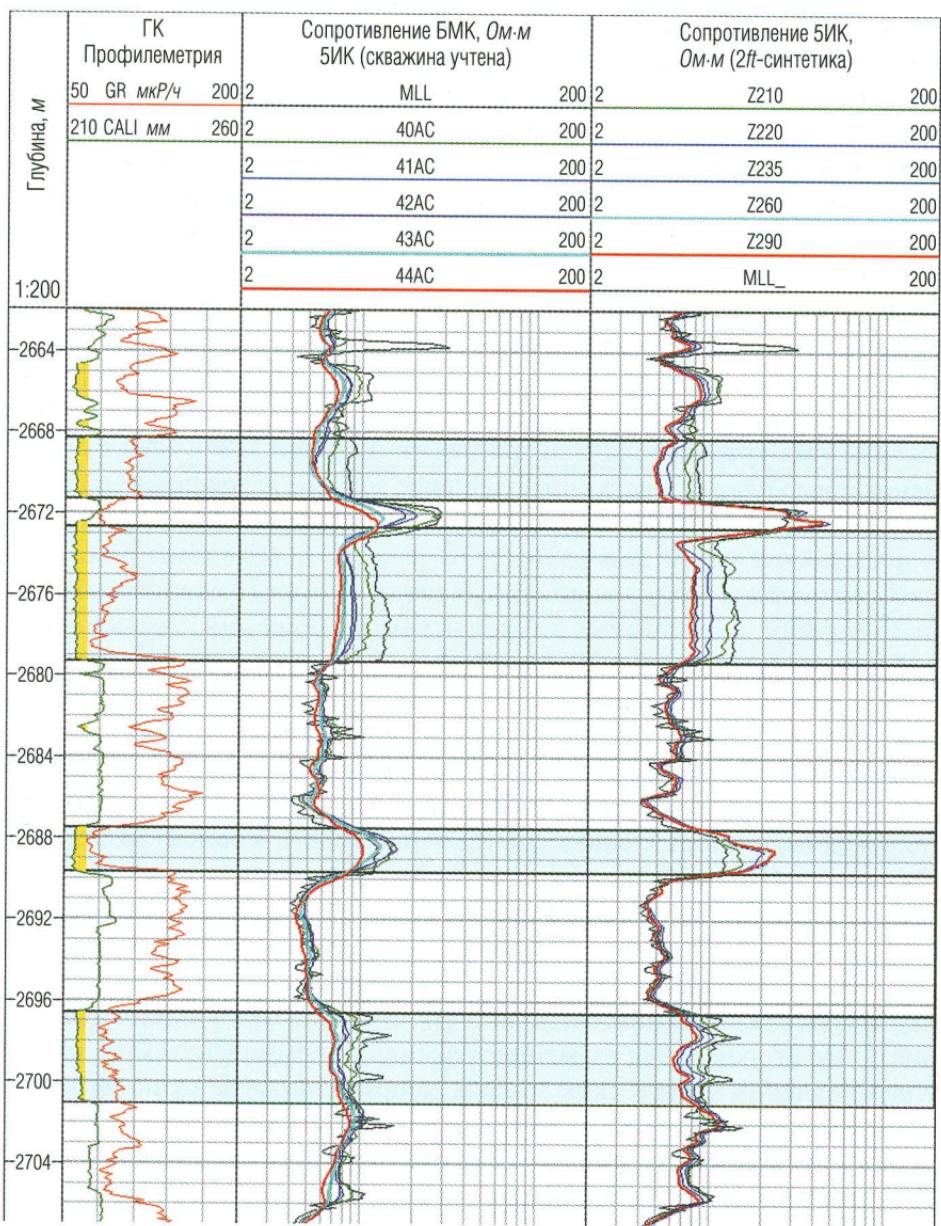


Рис. 7. Кривые КС зондов аппаратуры 5ИК, полученные в вертикальной скважине ($d_h = 216$ мм, УЭС ПЖ = 0,55 Ом·м)

В обоих пластиах амплитуды диаграмм физических зондов формально соответствуют повышающему проникновению ПЖ в пласти. Напротив, диаграммы синтетических зондов в верхнем пласте показывают отсутствие радиального градиента УЭС, а в нижнем пласте – наличие зоны понижающего проникновения. Именно такой характер проникновения ПЖ и его наличие подтверждаются данными зонда бокового микрокаротажа (кривая МЛЛ), а также данными профилеметрии, представленными в первом треке. Очевидно, что искажение диаграмм глубинных физических зондов в пластах высокого сопротивления вызвано их недостаточно большим вертикальным разрешением и, как следствие, значительным влиянием соседних низкоомных пород. Синтетические зонды, обладающие более высоким вертикальным разрешением, лишены этого недостатка, что приводит к более уверенному выделению высокоомных прослоев (особенно малой мощности) даже по данным глубинных зондов и к правильному определению характера проникновения.

На рис. 8 сопоставляются результаты обработки данных 5ИК, ВИКИЗ, БК и БМК в вертикальной скважине с УЭС ПЖ, равным $0,28 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, в которой пласти-коллекторы характеризуются зоной понижающего проникновения. Вмещающие породы и ПЖ имеют относительно низкое УЭС: 1–2 и $0,38 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ соответственно. Пласт-коллектор, являющийся песчаником, что подтверждается кривой ПС аппаратуры 5ИК, находится в интервале 1698,3–1704,0 м. Он неоднороден и состоит из прослоев толщиной 0,4–1,0 м с УЭС, равным 6–33 $\text{Ом}\cdot\text{м}$. Эти прослои уверенно выделяются на диаграммах синтетических зондов аппаратуры 5ИК, причем диаграммы КС двух наиболее глубинных синтетических зондов (Z260 и Z290) практически совпадают и близки к диаграмме КС зонда БК. Диаграммы малоглубинных синтетических зондов (особенно Z210) имеют заметно меньшие значения КС, что позволяет выделить зону понижающего проникновения. Из-за малой толщины прослоев и плохого вертикального разрешения длинных физических зондов аппаратуры 5ИК и ВИКИЗ происходит существенное сглаживание кривых КС этих зондов в тонкослоистом разрезе, что затрудняет определение УЭС разреза. Так, на кривых КС длинного зонда ВИКИЗ практически не отмечается высокоомный прослой, находящийся в кровле рассматриваемой пачки (интервал 1698,3–1699,0 м), на наличие которого указывают кривая КС зонда БК и диаграммы синтетических зондов 5ИК.

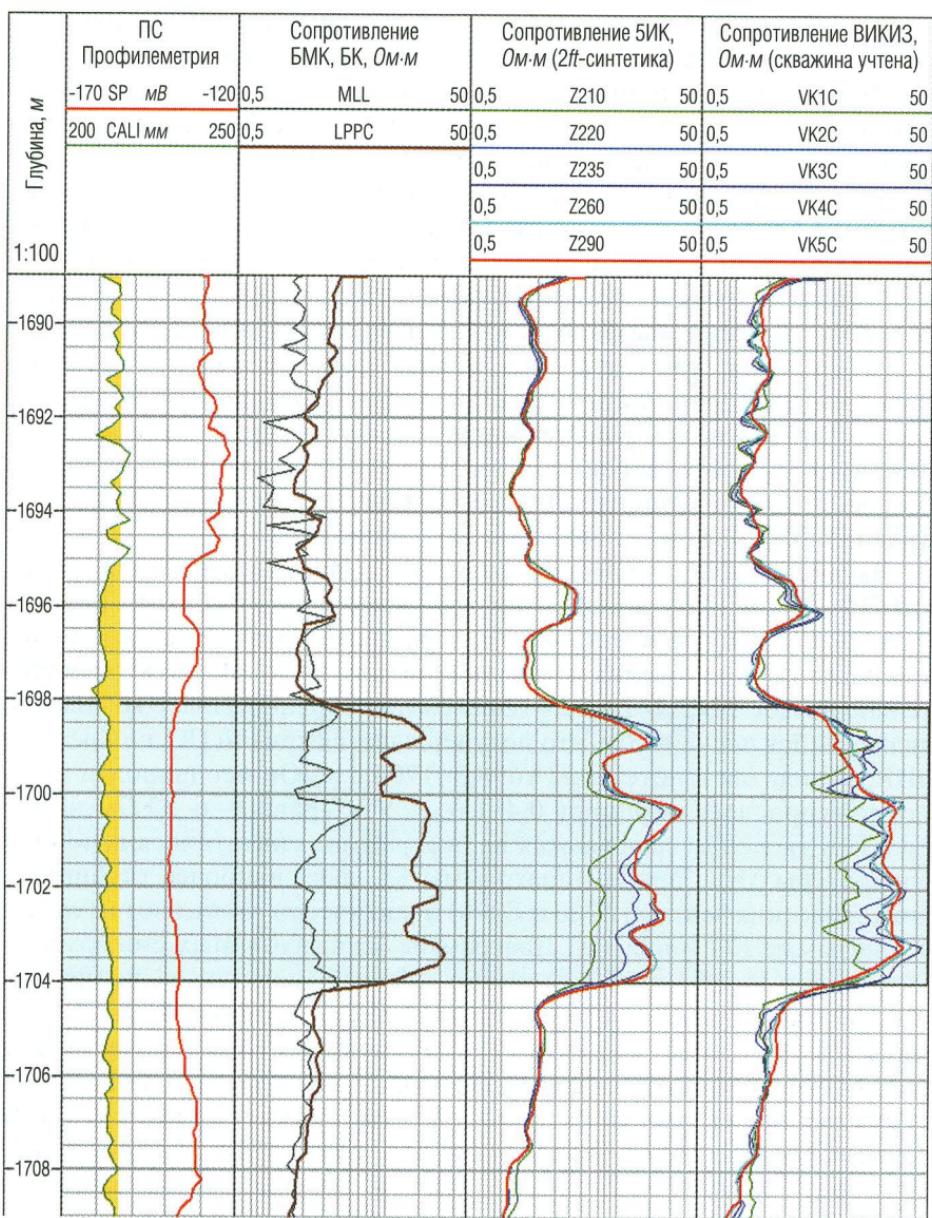


Рис. 8. Кривые КС зондов аппаратуры 5ИК, ВИКИЗ, полученные в вертикальной скважине ($d_h = 216$ мм, УЭС ПЖ = 0,28 Ом·м)

Таким образом, разработанная технология индукционного каротажного зондирования высокого вертикального разрешения обеспечивает:

- возможность получения диаграмм синтетических зондов различной радиальной глубинности (от 25 до 228 см) при одинаковом высоком вертикальном разрешении (60 или 120 см);
- повышение достоверности результатов интерпретации в тонких пластиах по сравнению с существующими отечественными комплексами ЭМК (ИКЗ-2, 4ИК, ВИКИЗ и др.).

Высокая эффективность технологии подтверждена результатами скважинных исследований. Она может широко использоваться благодаря наличию транзитных вариантов кабельного и автономного исполнения аппаратуры 5ИК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методическое руководство по проведению индукционного каротажа аппаратурой 4ИК и первичной обработке данных. Тверь: ООО “Нефтегазгеофизика”, 2005.
2. Шеин Ю. Л., Павлова Л. И., Рудяк Б. В., Снежко О. М. Определение геоэлектрических характеристик разреза в программе LogWin-ЭК // НТВ “Каротажник”. Тверь: Изд. АИС. 2009. Вып. 5 (182). С. 89–100.
3. Barber, T. D., Roshal, R. A. Using a Multiarray Induction Tool to Achieve High-resolution Logs with Minimum Environmental Effects. Paper SPE 22725.
4. LogPWin – комплекс программ первичной обработки данных каротажа. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005612569.
5. LogWin-ЭК. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005610807.