УДК 550.832.7

О. М. Снежко, *Ю. Л. Шеин*
ООО «Нефтегазгеофизика»
О. Б. Кузьмичев
ООО «РН-Технологии»

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РАДИАЛЬНОЙ ГЛУБИННОСТИ ЗОНДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАРОТАЖА

Предложена методика расчета параметра глубинности (P_R) зондов электрического (ЭК) и электромагнитного (ЭМК) каротажей по псевдогеометрическому фактору в пласте неограниченной мощности, основанная на изучении влияния зоны проникновения различной глубины на величину значения их кажущегося сопротивления (КС), исправленных за влияние скважины. Сделан вывод о том, что предложенная методика позволяет объективно оценивать параметр глубинности различных зондов (БКЗ, БК, ИК, ВИКИЗ) и в соответствии со значением параметра глубинности (P_R) выстроить их в единый ряд. Показано, что параметр P_R различных зондов зависит в первую очередь от параметра контрастности проникновения $\rho_{зп}/\rho_{п}$. В работе выявлены основные факторы, определяющие информативность отдельных зондов современных отечественных приборов ЭК и ЭМК, и проведена оценка их влияния на результаты интерпретации при различных геолого-технических условиях проведения каротажа.

Ключевые слова: скважина, электрический каротаж, электрическое сопротивление, измерения, радиальная глубинность.

Введение

Радиальная глубинность зондов ЭК и ЭМК является важнейшим критерием, характеризующим их эффективность при выделении пластов с зоной проникновения и определении их удельного электрического сопротивления (УЭС).

В настоящее время изучение электрических свойств пород в открытом стволе скважин проводится методами ЭК и ЭМК каротажей. Методы ЭК (разновидности БКЗ, БК) и ЭМК (разновидности ИК, ВИКИЗ) имеют различную физическую основу, и это является одной из причин того, что для каждого из них параметры, характеризующие радиальную глубинность, рассчитываются по своей индивидуальной методике.

Изначально параметр радиус исследования введен с целью сравнения глубинности зондов конкретного метода исследования между

собой. Поэтому при расчете радиуса исследования зондов ЭК и ЭМК подбирались такие модели среды и методики расчета, при которых он будет наименьшим образом зависеть от параметров пласта, зоны проникновения и скважины. При разработке новой аппаратуры это удобно для сравнения глубины исследования зондов одного метода исследования, например, индукционного каротажа (ИК), бокового (БК) или высокочастотного электромагнитного (ВИКИЗ).

Методики расчета существенно различаются между собой, как и рассчитываемые по ним параметры, которые могут отражать несколько отличающиеся электрические свойства среды. В связи с этим сравнительный анализ параметров, характеризующих радиальную глубинность отдельных зондов разных методов и их модификаций (БКЗ, БК, ИК, ВИКИЗ), а также их результатов измерений (с использованием известных радиальных характеристик), часто вызывает затруднение или просто невозможен.

Наиболее известными методиками расчета параметров, характеризующих радиальную глубинность зондов ЭК и ЭМК, являются следующие:

1. Оценка глубинности зондов низкочастотного электромагнитного (или индукционного) каротажа, основанная на приближении Долля [1], в рамках которого активная компонента кажущейся проводимости зонда ($\sigma_к^А$) связана с электрическими параметрами выбранной модели соотношением

$$\sigma_к^А = Q_с \times \sigma_с + Q_{зп} \times \sigma_{зп} + Q_п \times \sigma_п, \quad (1)$$

где $Q_с$, $Q_{зп}$, $Q_п$ – соответственно геометрические факторы скважины, зоны проникновения и неизмененной части пласта; $\sigma_с$, $\sigma_{зп}$, $\sigma_п$ – проводимости промывочной жидкости (ПЖ), зоны проникновения и неизмененной части пласта. Модель в этом случае представляет собой среду (включающую пласт, зону проникновения и скважину) с достаточно большим значением УЭС, при котором отсутствует влияние скин-эффекта. Величины $Q_с$, $Q_{зп}$, $Q_п$ определяются по интегральному радиальному геометрическому фактору зонда $G\,(D)$ [2]:

$$Q_с = G\,(d_с);\ Q_{зп} = G\,(D) - G\,(d_с);\ Q_п = 1 - G\,(D), \quad (2)$$

где $d_с$ и D – значения диаметра скважины и зоны проникновения.

Глубинностью принято считать диаметр зоны проникновения, при котором значение $G\,(D) = 0{,}5$.

В табл. 1 приведены значения радиусов исследования зондов ИК (R) аппаратуры АИК-М и 5ИК.

Таблица 1

Значения радиусов исследования и параметра глубинности зондов ЭК и ИК

Аппаратура	Зонд	Радиус исследования			Параметр радиальной глубинности	
		R зондов ИК по геометрическому фактору $Q_{зп}$, *м*	R^* зондов БКЗ, БК по псевдогеометрическому фактору $G^*(R_{зп})$, *м*		P_R зондов БКЗ, БК по псевдогеометрическому фактору $G_c^*(R_{зп})$, *м*	
			$\rho_п$ = 10 *Ом·м*; $\rho_{зп}$ = 100 *Ом·м*	$\rho_п$ = 100 *Ом·м*; $\rho_{зп}$ = 10 *Ом·м*	$\rho_п$ = 10 *Ом·м*; $\rho_{зп}$ = 100 *Ом·м*	$\rho_п$ = 100 *Ом·м*; $\rho_{зп}$ = 10 *Ом·м*
АБКТ	А0,4М0,1N		0,15	0,25	0,27	0,17
	А1,0М0,1N		0,24	0,33	0,35	0,24
	А2,0М0,5N		0,51	0,45	0,53	0,43
	А4,0М0,5N		1,26	0,82	1,03	0,98
	А8,0М1,0N		4,36	2,18	3,78	2,50
	БК-3		0,71	0,63	0,70	0,64
2БК-7/9	БК-7		1,07	1,36	1,05	1,37
	БК-9		0,37	0,30	0,37	0,30
АИК-М	6Ф1	1,25			3,66	0,44
5ИК	3И0,3	0,40			1,62	0,15
	3И0,5	0,72			2,31	0,25
	3И0,85	1,23			3,09	0,42
	3И1,26	1,82			3,74	0,62
	3И2,05	2,97			4,60	0,98

Примечание. Приборы 2БК-7/9 и 5ИК диаметром 76 *мм* – производства ООО «Нефтегазгеофизика».

2. Для зондов ЭК не существует геометрических факторов, построенных по аналогии с зондами ИК (по Доллю), поэтому оценка радиуса исследования зондов ЭК (БК, БКЗ, потенциал-зондов)

основана на расчете их радиальных псевдогеометрических факторов. Радиальные псевдогеометрические факторы зоны проникновения $G^*(R_{зп})$ зондов ЭК определяются из соотношения [3]:

$$\rho_к^{(3)}(\rho_с, \rho_{зп}, \rho_п, d_с, R_{зп}) =$$

$$= G^*(R_{зп}) \cdot \rho_к^{(2)}(\rho_с, \rho_{зп}, d_с) + (1 - G^*(R_{зп})) \cdot \rho_к^{(2)}(\rho_с, \rho_п, d_с), \quad (3)$$

где $\rho_с, \rho_{зп}, \rho_п$ – сопротивления ПЖ, зоны проникновения и неизмененной части пласта; $d_с$, $R_{зп}$ – радиус скважины и зоны проникновения; $\rho_к^{(3)}(\rho_с, \rho_{зп}, \rho_п, d_с, R_{зп})$ – кажущееся сопротивление зонда в трехслойной модели; $\rho_к^{(2)}(\rho_с, \rho_{зп}, d_с)$, $\rho_к^{(2)}(\rho_с, \rho_п, d_с)$ – кажущиеся сопротивления зонда в двухслойных моделях с соответствующими значениями параметров моделей.

При расчете используется радиально-однородная модель зоны проникновения. При этом анализируется влияние изменения в радиальном направлении УЭС трехслойной среды на показания зонда. За глубинность исследования зонда в радиальном направлении принимается величина радиуса зоны проникновения, при которой ее псевдогеометрический фактор равен 0,5.

Найденные из условия $G^*(R_{зп}) = 0{,}5$ значения радиусов исследования R^* приведены в табл. 1 для зондов БКЗ, БК-3 (прибор АБКТ), БК-7, БК-9 (прибор 2БК-7/9). Они рассчитаны для наиболее часто используемых для этой цели моделей с повышающим ($\rho_п = 10$ *Ом·м*, $\rho_{зп} = 100$ *Ом·м*) и понижающим ($\rho_п = 100$ *Ом·м*, $\rho_{зп} = 10$ *Ом·м*) проникновением при $d_с = 0{,}2$ *м*; $\rho_с = 1$ *Ом·м*.

3. Для отдельных зондов ВИКИЗ принято рассчитывать радиальную характеристику 1-го типа (для фокусирующих систем) как отношение сигнала $q_н$, (значения $\Delta\varphi$) измеренного в радиально-неоднородной среде и исправленного за влияние скважины и вмещающих пород к сигналу в однородной среде q_0 с удельным сопротивлением неизмененной части пласта [9]:

$$R_1 = q_н/q_0. \quad (4)$$

Недостатком данного подхода (как и предыдущих) является сильная зависимость величины R_1 от параметров модели. Весьма положительной стороной является учет влияния скважины и вмещающих пород, но в данной работе рассматривается только модель пласта бесконечной мощности.

Одним из основных отличий вышеперечисленных методик между собой является то, что глубинность зондов рассчитывается для разных параметров (электрических свойств) пластов ($\sigma_п$ – ИК, $\rho_п$ – ЭК, $\Delta\varphi$ – ВИКИЗ), что существенно затрудняет совместный анализ данных ЭК и ЭМК.

Существенно затрудняет совместный анализ данных ЭК и ЭМК и то, что радиусы исследования рассчитываются для одного значения параметра контрастности зоны проникновения ($К_{зп} = \rho_{зп}/\rho_п$). Например, у зондов БК он равен 10 при повышающем и 0,1 при понижающем проникновении.

На практике видно, что параметр контрастности проникновения имеет гораздо более широкий диапазон изменения, а расчеты радиуса исследования во всем диапазоне параметра $\rho_{пз}/\rho_п$ значительно различаются между собой как при повышающем, так и при понижающем проникновении. Поэтому, когда при интерпретации каротажных данных (например, при оценке качества) возникает вопрос сравнения глубины исследования зондов разных методов (ИК, БК, БКЗ, ВИКИЗ), часто это представляется неразрешимой задачей, поскольку в этом случае классические радиусы исследования зондов разных методов нельзя сравнивать между собой. Таким образом, при существующем подходе расчета радиусов исследования зондов ИК, БК, БКЗ, ВИКИЗ оценить их сравнительную глубинность невозможно. Интерпретаторов же интересуют радиусы исследования зондов для конкретной модели пласта с зоной проникновения и соотношение значений КС, используемых зондов ЭК и ЭМК.

Современные комплексы исследования, как правило, включают в себя различные зонды ЭК и ЭМК, и это является еще одной причиной, свидетельствующей о необходимости выбора общего подхода при оценке радиусов исследования, что позволило бы выстроить все зонды ИК, ВИКИЗ, БК, БКЗ, потенциал-зонды в единый ряд по глубине исследования.

Параметр радиальной глубинности

В данной работе предлагается ввести и рассчитать параметр, который отвечал бы потребностям интерпретаторов и который авторы назвали параметром радиальной глубинности (P_R) (далее по тексту – параметр глубинности). Для этой цели была использована методика, которая применяется при расчете радиуса исследования

по псевдогеометрическому фактору для зондов БК [3]. При этом для решения данной задачи она несколько изменена:

1) параметр P_R рассчитан для основного диапазона значений параметра контрастности $\rho_{зп}/\rho_{п}$;

2) используемое при расчете значение КС предварительно исправлено за влияние скважины, а у зондов ЭМК еще учтено и влияние скин-эффекта.

Радиальные псевдогеометрические факторы зоны проникновения $G_c^*(R_{зп})$ зондов ЭК и ЭМК предлагается определять из соотношения, аналогично предложенному в работе [7]:

$$G_c^*(R_{зп}) = (\rho_{кс} - \rho_{п})/(\rho_{зп} - \rho_{п}), \quad (5)$$

где $\rho_{кс}$ – значение КС, исправленное за влияние скважины.

Функции $\rho_{кс}$ и $G_c^*(R_{зп})$ обладают следующими свойствами:

$$\lim_{L/d_c \to 0} \rho_{кс} = \rho_{зп}; \quad \lim_{L/d_c \to 0} G_c^*(R_{зп}) = 1;$$

$$\lim_{L/d_c \to \infty} \rho_{кс} = \rho_{п}; \quad \lim_{L/d_c \to \infty} G_c^*(R_{зп}) = 0;$$

$$\lim_{D/d_c \to \infty} \rho_{кс} = \rho_{зп}; \quad \lim_{D/d_c \to \infty} G_c^*(R_{зп}) = 1;$$

$$\lim_{D/d_c \to 1} \rho_{кс} = \rho_{п}; \quad \lim_{D/d_c \to 1} G_c^*(R_{зп}) = 0.$$

Преобразование формулы (5) относительно $\rho_{кс}$ имеет вид

$$\rho_{кс} = G_c^*(R_{зп}) \times \rho_{зп} + (1 - G_c^*(R_{зп})) \times \rho_{п}. \quad (6)$$

Отсюда следует, что $G_c^*(R_{зп})$ играет роль псевдогеометрического фактора зоны проникновения для $\rho_{кс}$.

Параметром глубинности P_R будем считать диаметр зоны проникновения, при котором значение $G_c^*(R_{зп}) = 0{,}5$. Параметр $G_c^*(R_{зп})$ характеризует степень влияния зоны проникновения на показания зондов ЭК при фиксированной глубине проникновения. Значение нового параметра P_R, как видно из табл. 1, лучше, чем параметр R^*, характеризует глубинность зондов ЭК и ИК и по существу является радиусом исследования зонда при конкретных значениях параметра контрастности проникновения ($\rho_{зп}/\rho_{п}$) и скважины (d_c, ρ_c). Особенно это заметно по результатам расчета радиусов исследования коротких градиент-зондов БКЗ.

Термин «глубинность» часто используется геофизиками, когда разработчики аппаратуры имеют в виду классический радиус исследования, или интерпретаторами, когда они говорят о разнице между КС определенного зонда и величиной УЭС пласта. Но общепринятым термином является радиус исследования, который имеет одно значение для конкретной модели среды. Поэтому в данной работе предлагается использовать термин «параметр глубинности» в том аспекте, в котором его хочет понимать весьма значительная часть интерпретаторов, – это глубина исследования конкретного зонда в конкретном пласте-коллекторе.

По программному обеспечению ООО «Нефтегазгеофизика», разработанному Ю. Л. Шеиным, рассчитаны радиальные псевдогеометрические факторы $G_c^*(R_{зп})$ зондов приборов 5ИК, 2БК-7/9 (приборы ООО «Нефтегазгеофизика»), ВИКИЗ, АИК-М (6Ф1), АБКТ (БК-3, БКЗ, N6,0M0,5A) для различных моделей трехслойной среды неограниченной мощности с однородной зоной проникновения, по которым определены их параметры глубинности. Параметры моделей трехслойных сред следующие:

– $\rho_п$ = 4, 20 и 100 *Ом·м* ($\sigma_п$ = 250, 50 и 10 *мСм/м* соответственно);
– $\rho_{зп}/\rho_п$ = 0,05 – 8;
– $\rho_{зп}/\rho_c$ = 4 – 800;
– ρ_c = 0,05, 0,25, 1 *Ом·м*;
– d_c = 0,125, 0,2, 0,3 *м*;
– $H = \infty$;
– прибор центрирован.

За базовую принята модель с $\rho_п$ = 20 *Ом·м*, ρ_c = 0,25 *Ом·м*, d_c = 0,2 *м* как одна из наиболее часто встречающихся на практике и удобная при анализе основного диапазона значений УЭС нефтегазонасыщенных пластов-коллекторов. Значения УЭС зоны проникновения базовой модели выбраны из соображений наиболее вероятного диапазона величин параметров $\rho_{зп}/\rho_c$ = 4 – 640 и контрастности $\rho_{зп}/\rho_п$ = 0,05 – 8.

Две вспомогательные модели имеют значения УЭС, равные 4 *Ом·м* ($\rho_{зп}/\rho_c$ = 4 – 128; $\rho_{зп}/\rho_п$ = 0,25 – 8) и 100 *Ом·м* ($\rho_{зп}/\rho_c$ = 20 – 800; $\rho_{зп}/\rho_c$ = 0,05 – 2). Результаты расчетов для ρ_c = 0,25 *Ом·м* и d = 0,2 *м* приведены в табл. 2.

Ниже представлен анализ результатов математического моделирования.

Зависимости параметра глубинности от контрастности проникновения

Проведенный анализ расчетных данных показал, что существует зависимость между параметром глубинности P_R зондов ЭК, ЭМК и параметром контрастности проникновения $К_{зп}$, который характеризует контрастность и вид проникновения ($К_{зп} > 1$ – повышающее; $К_{зп} < 1$ – понижающее). Использование такой зависимости весьма удобно при анализе глубинности зондов ЭК и ЭМК в конкретных геолого-технических условиях. На рис. 1 приведены зависимости $P_R = f(\rho_{зп}/\rho_п)$, построенные для длинных и коротких зондов комплексов БКЗ, БК, ИК, ВИКИЗ и одиночных зондов БК-3, 6Ф1 для моделей с $\rho_п$ = 4, 20, 100 *Ом·м* при $\rho_с$ = 0,25 *Ом·м* и $d_с$ = 0,2 *м*. Величина параметра контрастности в этих модельных ситуациях изменяется от значения 0,05 при контрастном понижающем проникновении до 8 при контрастном повышающем проникновении (при нейтральном проникновении он равен 1).

В значительном диапазоне изменяются и значения параметра глубинности, которые у большинства зондов максимальны при повышающем проникновении и минимальны при понижающем. Например, у зонда БК-3 при $\rho_п$ = 20 *Ом·м* минимальное значение параметра глубинности (при $\rho_{зп}/\rho_п$ = 0,05) меньше максимального (при $\rho_{зп}/\rho_п$ = 8) на 28% (рис. 1*а, б*), а у зонда 6Ф1 – меньше в 10 раз (изменяется от 0,36 до 3,71 *м*) (рис. 1*а*). Наиболее постоянные значения параметра глубинности при разных видах и контрастностях проникновения имеют зонды БК-3 и БК-9, а величины их P_R отличаются от своего среднего значения на ±14% и ±15% соответственно (рис. 1*б*). В связи с этим для удобства анализа зависимостей $P_R = f(\rho_{зп}/\rho_п)$ кривые, соответствующие зонду БК-3 в качестве масштабных, нанесены на рис. 1*а* и 1*б*. На рис. 1*а* показано, что при повышающем проникновении у зондов ЭМК параметр глубинности значительно больше, чем при понижающем (у зондов ИК значения P_R могут отличаться в 7–11 раз, а у ВИКИЗ – в 4 раза), то есть для зондов ЭМК контрастное понижающее проникновение особенно неблагоприятно. Кроме того, чем меньше УЭС пласта, тем меньше параметр глубинности зондов ИК, ВИКИЗ, БК-3 и коротких зондов БКЗ. У зонда БК-7 и длинных зондов БКЗ отмечается обратная закономерность (рис. 1*а*).

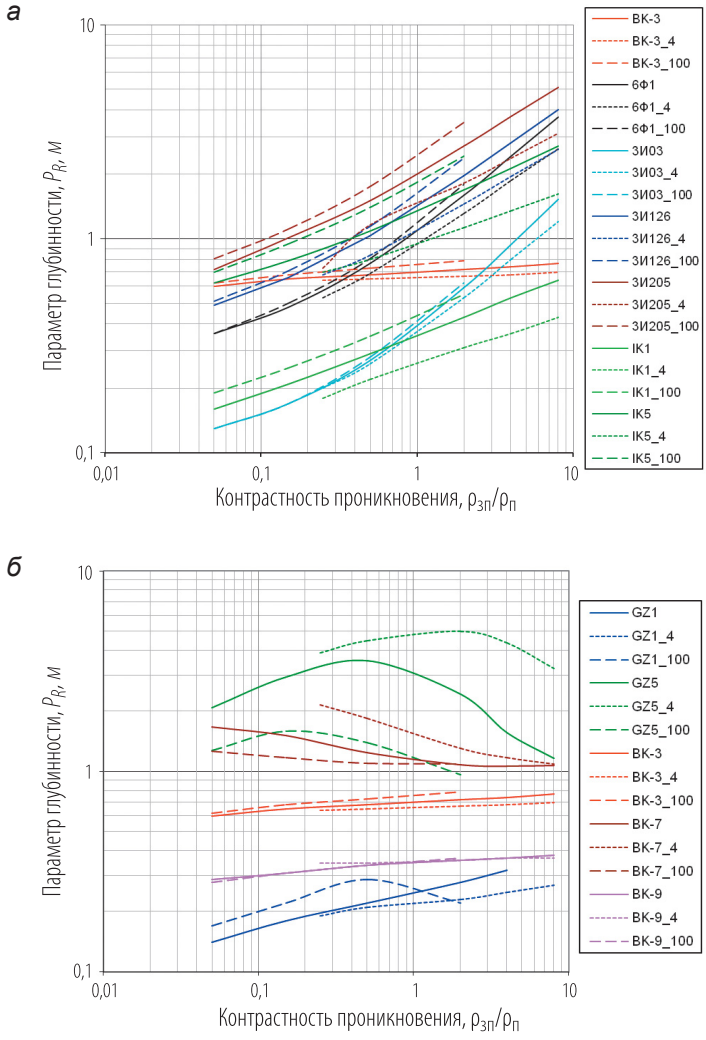


Рис. 1. Результаты расчета зависимостей параметра глубинности P_R зондов от параметра контрастности проникновения $\rho_{зп}/\rho_п$ и $\rho_п$: *а* – ИК, ВИКИЗ, БК-3; *б* – БКЗ, БК:

---------- кривые без индекса: $\rho_п$ = 20 *Ом·м*, d_c = 0,2 *м*, ρ_c = 0,25 *Ом·м*;

- - - - - - - - кривые с индексом 4: $\rho_п$ = 4 *Ом·м*, d_c = 0,2 *м*, ρ_c = 0,25 *Ом·м*;

-- -- -- -- кривые с индексом 100: $\rho_п$ = 100 *Ом·м*, d_c = 0,2 *м*, ρ_c = 0,25 *Ом·м*

Эффективность комплексов зондов при выделении пластов с зоной проникновения можно оценить по отношению параметров глубинности их длинного и короткого зондов при фиксированных значениях контрастности. Например, при неконтрастном повышающем проникновении ($\rho_{зп}/\rho_{п} = 2$) для базовой модели ($\rho_{п} = 20$ *Ом·м*) такое отношение у комплексов БКЗ, 5ИК и ВИКИЗ равно 8,6, 4,6 и 3,9 соответственно, то есть в этих условиях при обнаружении зоны проникновения наиболее эффективен комплекс БКЗ.

На рис. 2 приведены зависимости $P_R = f(\rho_{зп}/\rho_{п})$, построенные для длинных и коротких зондов комплексов БКЗ, БК, ИК, ВИКИЗ и одиночных зондов БК-3, 6Ф1 для базовой модели с $\rho_{п} = 20$ *Ом·м* при разных параметрах скважины: а) $\rho_{с} = 0{,}25$ *Ом·м* и $d_{с} = 0{,}125$, 0,2, 0,3 *м*; б) $\rho_{с} = 0{,}05$, 0,25, 1,0 *Ом·м* и $d_{с} = 0{,}2$ *м*. Из рис. 2 следует, что увеличение диаметра скважины приводит к увеличению параметра глубинности зондов БК и коротких зондов БКЗ, 5ИК, ВИКИЗ (рис. 2*а*), а уменьшение значения УЭС ПЖ уменьшает величину P_R зонда БК-7 и длинного зонда БКЗ (рис. 2*б*). При изменении значений $d_{с}$ и $\rho_{с}$ параметр глубинности у средних и длинных зондов ИК и ВИКИЗ практически остается постоянным (рис. 2*а*, *б*).

Основные выявленные закономерности в поведении зависимостей $P_R = f(\rho_{зп}/\rho_{п})$ зондов ЭК, ЭМК следующие.

1. Чем меньше значение $\rho_{зп}/\rho_{п}$, тем меньше P_R зондов ИК, ВИКИЗ, БК-3, БК-9, потенциал-зонда и коротких зондов БКЗ, а для зонда БК-7 существует обратная закономерность. У среднего и длинных зондов БКЗ параметр глубинности максимален при неконтрастном понижающем проникновении ($0{,}2 < \rho_{зп}/\rho_{п} < 1$), а при увеличении контрастности как понижающего, так и повышающего проникновения параметр глубинности уменьшается.

2. Наиболее постоянные значения параметра глубинности при разных видах и контрастностях проникновения имеют зонды БК-3 и БК-9.

3. При повышающем проникновении у зондов ИК, ВИКИЗ параметр глубинности в несколько раз больше, чем при понижающем проникновении.

4. Чем меньше УЭС пласта, тем меньше параметр глубинности зондов ИК, ВИКИЗ, БК-3, потенциал-зонда и коротких зондов БКЗ. У зонда БК-7 и длинных зондов БКЗ отмечается обратная закономерность.

5. Самый большой параметр глубинности имеют следующие зонды (перечислены по уменьшению P_R):

– при контрастном повышающем проникновении ($\rho_{зп}/\rho_{п} > 2$–4) – длинные зонды 5ИК, 6Ф1 и ВИКИЗ;

– при неконтрастном повышающем и неконтрастном понижающем проникновении ($0{,}35 < \rho_{зп}/\rho_{п} < 2$) – длинные зонды БКЗ и 5ИК;

– при контрастном понижающем проникновении ($\rho_{зп}/\rho_{п} < 0{,}35$) – длинные зонды БКЗ, 2БК-7/9 и 5ИК;

– при неконтрастном понижающем проникновении ($0{,}35 < \rho_{зп}/\rho_{п} < 1$) – длинные зонды БКЗ и 5ИК.

6. Самый малый параметр глубинности имеют зонды (перечислены по возрастанию P_R):

– при повышающем проникновении – короткие зонды БКЗ, 2БК-7/9 и ВИКИЗ;

– при неконтрастном понижающем проникновении ($0{,}2 < \rho_{зп}/\rho_{п} < 1$) – короткие зонды БКЗ;

– при контрастном понижающем проникновении ($\rho_{зп}/\rho_{п} < 0{,}2$) – короткие зонды БКЗ, 5ИК и ВИКИЗ.

7. При выделении коллекторов наиболее эффективными являются комплексы зондов ЭК и ЭМК (по степени уменьшения эффективности):

– при повышающем проникновении – БКЗ, ВИКИЗ и 5ИК;

– при неконтрастном понижающем проникновении ($0{,}07 < \rho_{зп}/\rho_{п} < 1$) – БКЗ, 5ИК и ВИКИЗ;

– при контрастном понижающем проникновении ($\rho_{зп}/\rho_{п} < 0{,}07$) – БКЗ, 2БК-7/9, 5ИК и ВИКИЗ.

8. У реактивных составляющих зондов 5ИК параметр глубинности при контрастном повышающем проникновении ($\rho_{зп}/\rho_{п} = 4$) значительно больше, чем у активных (в 2–7 раз), а при контрастном понижающем проникновении – на 5–40%. Чем короче зонд, тем больше отличие по параметру глубинности между его активными и реактивными составляющими.

9. Чем больше диаметр скважины, тем больше параметр глубинности зондов БК и коротких зондов БКЗ, 5ИК, ВИКИЗ.

10. Чем меньше УЭС ПЖ, тем меньше параметр глубинности длинных зондов БКЗ и 2БК-7/9.

11. У четырех наиболее длинных зондов 5ИК, трех наиболее длинных зондов ВИКИЗ и зонда 6Ф1 параметр глубинности от значений d_c и ρ_c не зависит.

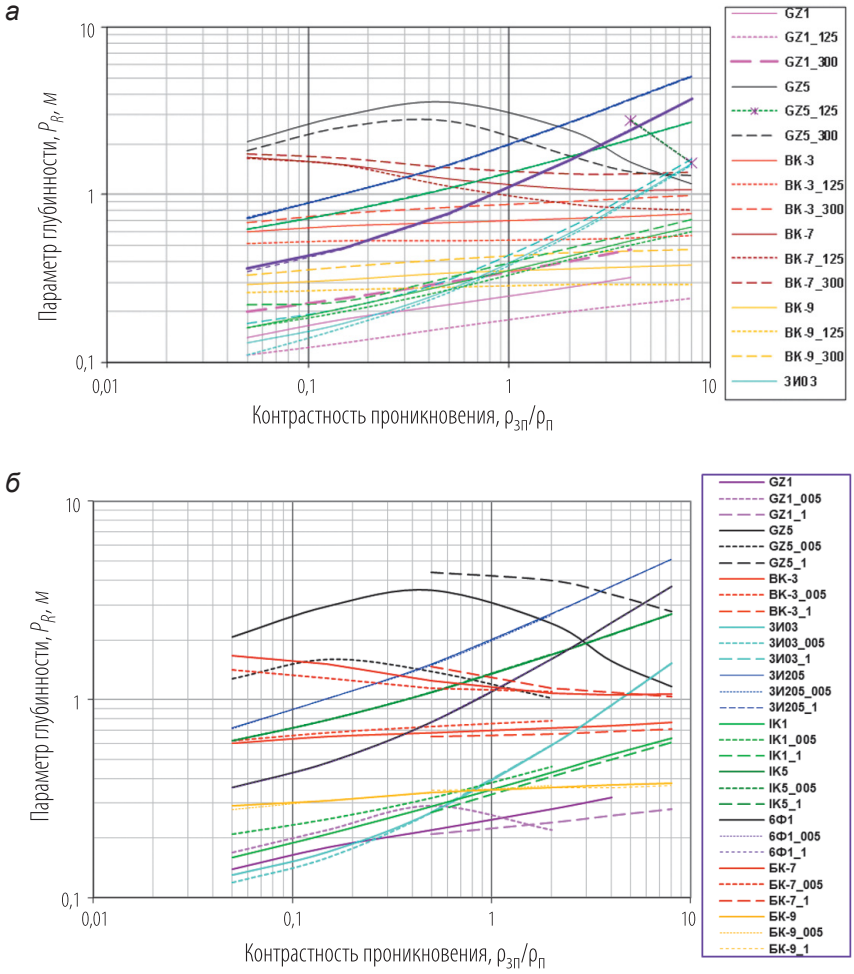


Рис. 2. Результаты расчета зависимостей параметра глубинности P_R зондов БКЗ, БК, 5ИК и ВИКИЗ от параметра контрастности проникновения $\rho_{зп}/\rho_п$, d и ρ_c:

а) ---------- кривые без индекса: $\rho_п$ = 20 *Ом·м*, d_c = 0,2 *м*, ρ_c = 0,25 *Ом·м*;
- - - - - - - кривые с индексом 125: $\rho_п$ = 20 *Ом·м*, d_c = 0,125 *м*, ρ_c = 0,25 *Ом·м*;
-- -- -- -- кривые с индексом 300: $\rho_п$ = 20 *Ом·м*, d_c = 0,3 *м*, ρ_c = 0,25 *Ом·м*;
б) ---------- кривые без индекса: $\rho_п$ = 20 *Ом·м*, d_c = 0,2 *м*, ρ_c = 0,25 *Ом·м*;
- - - - - - - - кривые с индексом 005: $\rho_п$ = 20 *Ом·м*, d_c = 0,2 *м*, ρ_c = 0,05 *Ом·м*;
-- -- -- -- кривые с индексом 1: $\rho_п$ = 20 *Ом·м*, d_c = 0,2 *м*, ρ_c = 1,0 *Ом·м*

В настоящее время, когда компьютерная интерпретация стала нормой, появилась возможность оперативного представления данных каротажа в удобной для анализа форме – в виде кривых $\rho_{кс}$ (процедура расчета занимает несколько секунд). Как показано выше, зонды, представленные в стандартном комплексе, имеют такие радиальные характеристики, которые позволяют решать большинство поставленных задач для пластов большой и средней мощности, а некоторые их возможности становятся более очевидными.

Например, при повышающем проникновении короткие зонды с минимальным параметром глубинности имеют комплексы БКЗ и 2БК-7/9, а не ВИКИЗ, как часто принято считать. Комплекс ВИКИЗ наиболее информативен при средней контрастности повышающего проникновения. При контрастном понижающем проникновении средней и большой глубины (тем более в пластах с высоким значением УЭС) наиболее информативным является комплекс 2БК-7/9.

При окончательных выводах о применимости зондов ЭК, ЭМК в конкретных геолого-технических условиях, кроме величины параметра глубинности, необходимо учитывать и их область применения. Например, известно, что высокая эффективность БКЗ имеет место в ситуациях, когда $\rho_п/\rho_с < 500$ и возможно использование значения КС длинного зонда A8,0M1,0N, не искаженного эффектом экранирования, а именно при мощности пластов $h > 11$ *м*. При высоких значениях УЭС пластов в скважинах с высокоминерализованной ПЖ наиболее эффективным является БК, поскольку зонды ИК и ВИКИЗ будут иметь очень маленький сигнал от пласта, а влияние скважины будет, наоборот, велико, и его не всегда можно учесть с достаточной точностью. Необходимо отметить, что зонды ВИКИЗ в значительной мере сохраняют свои преимущества в пластах ограниченной толщины, в отличие от длинных зондов БКЗ и 5ИК. В последнем случае, как и во всей статье, речь идет об активных составляющих физических зондов 5ИК, а не о синтетических, которые по вертикальному разрешению превосходят ВИКИЗ [4], но это не является темой данной статьи.

Возможность сопоставления величины параметра глубинности зондов в конкретных геолого-технических условиях позволит интерпретаторам надежнее формировать эффективный комплекс зондов ЭК и ЭМК.

Сопоставление значений КС, исправленных за влияние скважины, в модельных разрезах

Предложенная методика расчета $G_c^*(R_{зп})$ и P_R имеет важное практическое значение еще и потому, что при интерпретации данных ЭК, ЭМК (например, в программах LogWin-ЭК и LogPWin [5, 6, 8]) анализ качества данных проводится посредством сопоставления во всем интервале исследований значений КС всех зондов, предварительно исправленных за влияние скважины ($\rho_{кс}$).

В ситуациях, когда на показания зондов ЭК и ЭМК нет существенного влияния вмещающих пород, разница между значениями $\rho_{кс}$ зондов, имеющих разные значения параметров глубинности, отражает степень влияния на них УЭС только зоны проникновения. В непроницаемых изотропных пластах значения $\rho_{кс}$ всех зондов ЭК и ЭМК должны быть равны значениям $\rho_п$ (влияние анизотропии приводит к завышению значений $\rho_{кс}$ зондов БК и коротких зондов БКЗ, а диэлектрической проницаемости – к занижению $\rho_{кс}$ коротких зондов ВИКИЗ). В пластах с зоной проникновения соотношение значений $\rho_{кс}$ различных зондов будет отражать соотношение их параметров глубинности (или, что более правильно, соотношение значений их псевдогеометрических факторов G_c^*). Это позволяет контролировать качество данных как в непроницаемых пластах, так и в проницаемых.

Рассмотрим, как выглядят кривые $\rho_{кс}$ зондов ЭК и ЭМК при разных видах проникновения на модельных разрезах.

Пример модельного разреза пласта с зоной повышающего проникновения ($\rho_п$ = 4 *Ом·м*; $\rho_{зп}$ = 16 *Ом·м*; ρ_c = 1,0 *Ом·м*; d_c = 0,2 *м*; *D/d* = 4) и непроницаемыми изотропными вмещающими пластами ($\rho_п$ = 7 *Ом·м*) приведен на рис. 3. Пласт с зоной проникновения имеет мощность *h* = 15 *м* и находится в интервале 10–25 *м* (закрашен голубым цветом), в кровле и подошве которого находятся непроницаемые пласты.

При данных геолого-технических условиях наблюдается относительно небольшое влияние скважины. Тем не менее не по всем комплексам зондов возможно визуальное выделение непроницаемых пластов и пластов с зоной проникновения (рис. 3*а*), если для этого использовать кривые КС, не исправленные за влияние скважины. Например, у зонда A0,4M0,1N значения $\rho_{кс}$ меньше, чем у зонда A1,0M0,1N, что не соответствует значениям их параметров глубинности при повышающем проникновении. После исправления значений

КС за влияние скважины в пласте с зоной проникновения кривые $\rho_{кс}$ располагаются в том порядке, который соответствует значениям параметров глубинности рассматриваемых зондов. При этом необходимо учитывать конфигурацию кривых КС зондов БКЗ, у которых необходимо отбрасывать ту часть кривой $\rho_{кс}$, которая искажена эффектом экранирования (у подошвенных градиент-зондов она равна длине зонда и находится в кровле пласта), то есть использование данных всех зондов БКЗ для визуального выделения коллекторов возможно только в подошвенной части, если позволяет их мощность. В тонких пластах (при $h < 1{,}2$ *м*) для этой цели можно использовать только зонд А0,4М0,5N (например, в комплексе с зондом 6Ф1). Данные короткого зонда 3И0,3 также только после получения кривой $\rho_{кс}$ становятся пригодными для выделения коллекторов и непроницаемых интервалов.

В целом это позволяет использовать кривые $\rho_{кс}$ для решения задачи выделения пластов с зоной повышающего проникновения в визуальном режиме, не прибегая к более сложной процедуре попластовой обработки (рис. 3*а*). При этом соотношение значений параметров глубинности коротких зондов комплексов БКЗ, ВИКИЗ, 2БК-7/9 и 5ИК (они равны 0,25, 0,36, 0,37 и 0,8 *м* соответственно) соответствует соотношению $\rho_{кс}$ этих зондов, которые в свою очередь равны 12,9, 12,7, 10,1 и 6,8 *Ом·м* соответственно. Таким образом, использование предложенной методики позволяет контролировать качество зондов, входящих в различные комплексы ЭК и ЭМК, не только в непроницаемых пластах, но и в пластах с зоной проникновения.

На рис. 4 приведены кривые КС зондов ЭК и ЭМК, не исправленные ($\rho_к$) и исправленные ($\rho_{кс}$) за влияние скважины, которые были рассчитаны для модели с понижающим проникновением ($\rho_п = 20$ *Ом·м*; $\rho_{зп} = 5$ *Ом·м*; $D/d = 4$; $\rho_с = 0{,}25$ *Ом·м*; $d_с = 0{,}2$ *м*) и непроницаемыми изотропными вмещающими пластами ($\rho_п = 7$ *Ом·м*). Если поправка за скважину не введена, то по соотношению значений $\rho_к$ зондов ЭК и ЭМК визуально сложно выделить как пласт с зоной проникновения, так и непроницаемые интервалы (рис. 4*а*). Особенно хорошо виден этот недостаток при анализе кривых КС коротких зондов БКЗ и 5ИК, полученных против непроницаемых и проницаемых интервалов. В пласте с зоной проникновения значения $\rho_к$ зондов БК-3, БК-9 и БК-7 практически равны между собой, что не соответствует их значениям P_R при данной глубине понижающего проникновения, а значения кривой КС зонда 6Ф1 почти равны значению $\rho_п$ (из-за отрицательного значения геометрического фактора скважины).

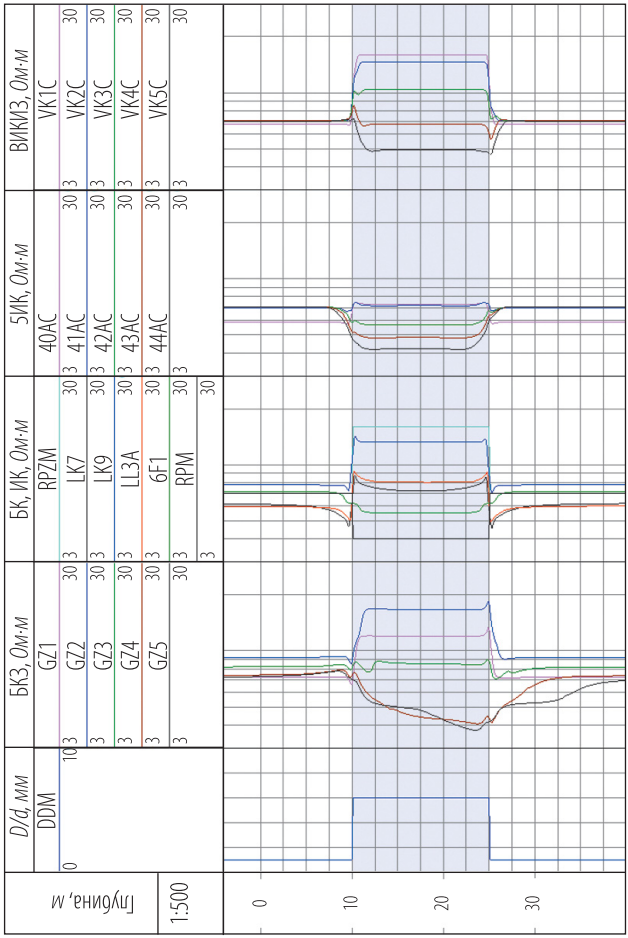


Рис. 3а. Результаты математического моделирования показаний зондов ЭК и ЭМК для модели с повышающим проникновением ($\rho_п$ = 4 *Ом·м*; $\rho_{зп}$ = 16 *Ом·м*; *D/d* = 4; d_c = 0,2 *м*, ρ_c = 1,0 *Ом·м*) и вмещающими породами без зоны проникновения ($\rho_п$ = 7 *Ом·м*): значения КС, не исправленные за влияние скважины

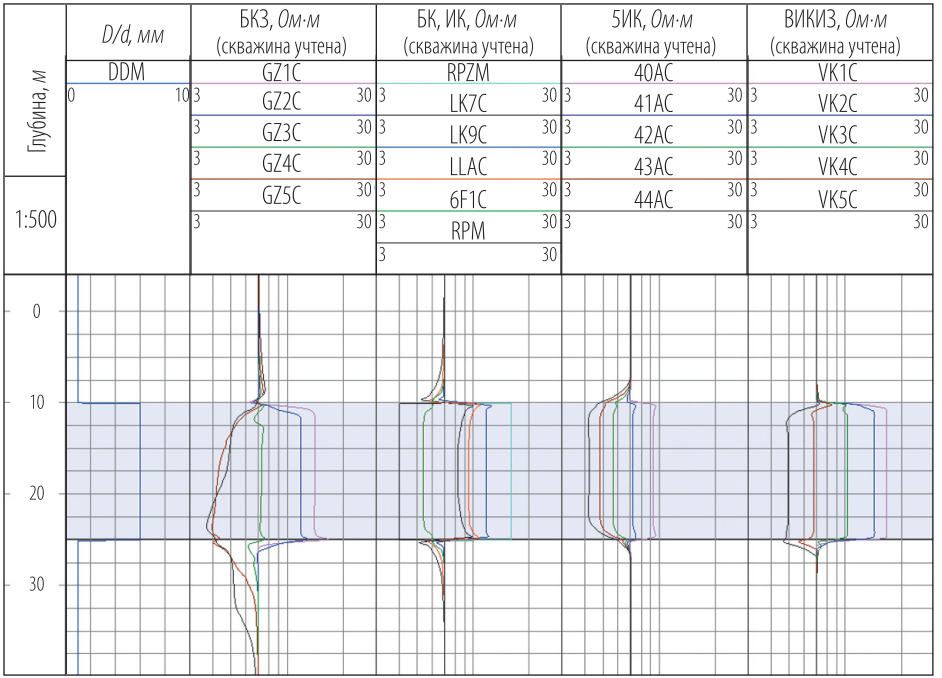


Рис. 3*б*. Результаты математического моделирования показаний зондов ЭК и ЭМК для модели с повышающим проникновением ($\rho_п$ = 4 *Ом·м*; $\rho_{зп}$ = 16 *Ом·м*; *D/d* = 4; d_c = 0,2 *м*; ρ_c = 1,0 *Ом·м*) и вмещающими породами без зоны проникновения ($\rho_п$ = 7 *Ом·м*): значения КС, исправленные за влияние скважины.

Примечание: окно *1* – DDM (относительный диаметр зоны проникновения модели); окно *2* – RPM, RZPM (значения УЭС пласта и зоны проникновения модели, зонды БКЗ); окно *3* – зонды БК-7/9-2Т (БК-7, БК-9), АБКТ (БК-3), АИК-М (6Ф1); окно *4* – зонды 5ИК; окно *5* – зонды ВИКИЗ.

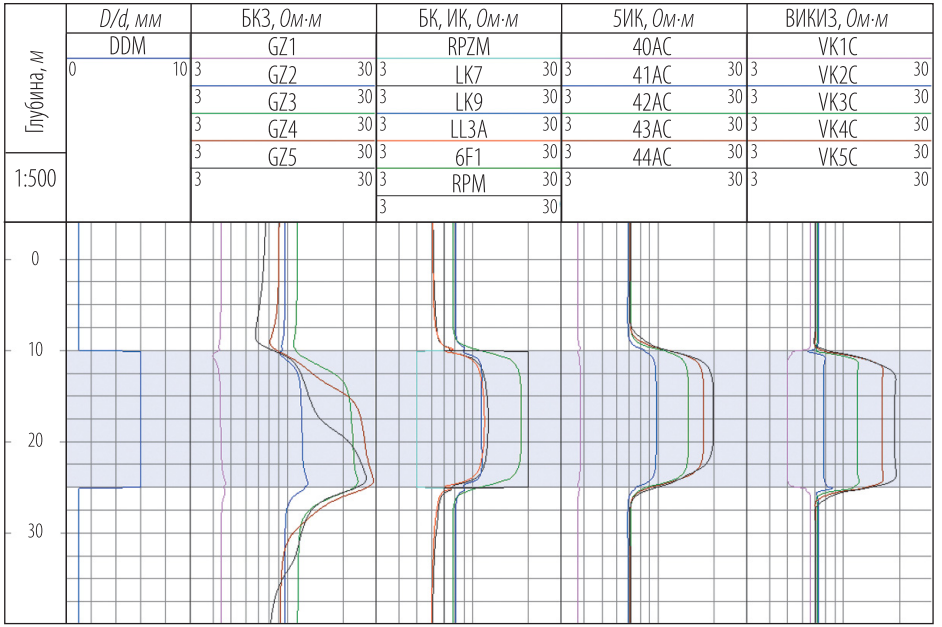


Рис. 4*а*. Результаты математического моделирования показаний зондов ЭК и ЭМК для модели с понижающим проникновением ($\rho_п$ = 20 *Ом·м*; $\rho_{зп}$ = 5 *Ом·м*, *D/d* = 4, *d* = 0,2 *м*, $\rho_с$ = 0,25 *Ом·м*) и вмещающими породами без зоны проникновения ($\rho_п$ = 7 *Ом·м*): значения КС, не исправленные за влияние скважины

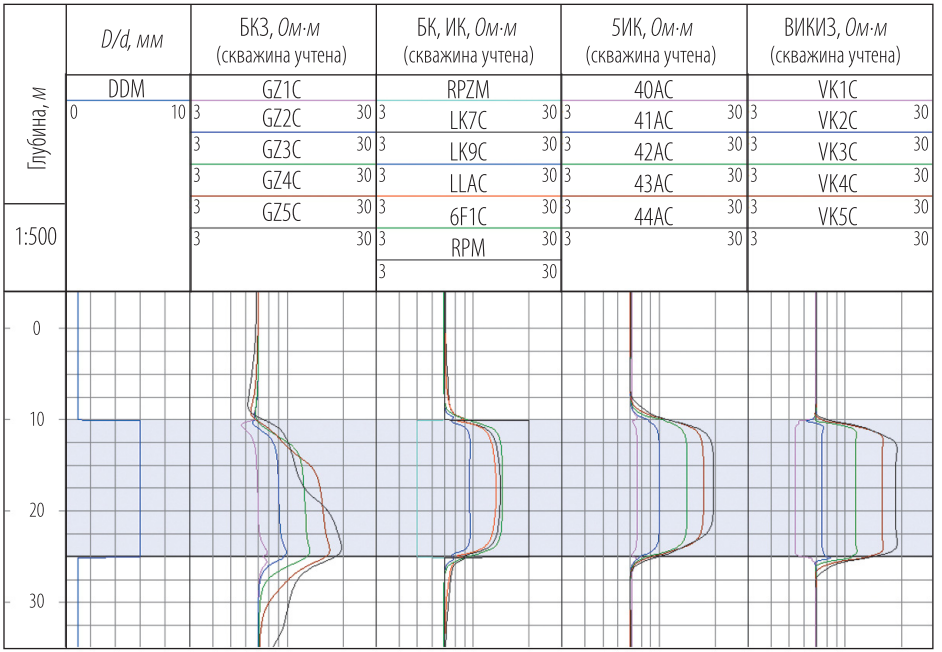


Рис. 4*б*. Результаты математического моделирования показаний зондов ЭК и ЭМК для модели с понижающим проникновением ($\rho_п$ = 20 *Ом·м*; $\rho_{зп}$ = 5 *Ом·м*; *D/d* = 4; *d* = 0,2 *м*; $\rho_с$ = 0,25 *Ом·м*) и вмещающими породами без зоны проникновения ($\rho_п$ = 7 *Ом·м*): значения КС, исправленные за влияние скважины.

Примечание: окно *1* – DDM (относительный диаметр зоны проникновения модели); окно *2* – RPM, RZPM (значения УЭС пласта и зоны проникновения модели, зонды БКЗ); окно *3* – зонды БК-7/9-2Т (БК-7, БК-9), АБКТ (БК-3), АИК-М (6Ф1); окно *4* – зонды 5ИК; окно *5* – зонды ВИКИЗ.

После исправления кривых $\rho_к$ за влияние скважины полученные значения $\rho_{кс}$ становятся пригодными для визуального выделения пластов с зоной проникновения и для оценки качества данных по непроницаемым опорным пластам. В непроницаемых пластах значения $\rho_{кс}$ равны между собой и равны $\rho_п$ (рис. 4*б*). В пласте с зоной проникновения значения $\rho_{кс}$ комплексов БКЗ, 2БК-79, 5ИК и ВИКИЗ выстроились в соответствии с их параметрами глубинности, что позволяет контролировать качество записи данных зондов, входящих в конкретный комплекс.

Наиболее сложным является совместный анализ данных зондов, входящих в разные комплексы (например, 5ИК и ВИКИЗ). Рассмотрим влияние зоны проникновения на показания коротких зондов ВИКИЗ и 5ИК, параметры глубинности которых, рассчитанные для вышеупомянутой модели, равны 0,24 и 0,21 *м* соответственно. Если исходить из соотношения величин параметров глубинности данных зондов, то логично предположить, что зонд 3И0,3, имеющий в данной ситуации меньшее значение параметра глубинности, будет иметь и меньшее значение $\rho_{кс}$. На самом деле это не так, и значение $\rho_{кс}$ зонда 3И0,3 равно 7,9 *Ом·м*, что существенно больше $\rho_{кс}$ короткого зонда ВИКИЗ, равного 5,7 *Ом·м*. Причиной такого несоответствия соотношений P_R и $\rho_{кс}$ этих зондов является то, что зависимость $G_с^*(R_{зп})$ у зонда ВИКИЗ более крутая, чем у зонда 3И0,3, а значение $R_{зп} = 0{,}4$ *м* (в рассматриваемой модели) находится значительно правее точки пересечения зависимостей $G_с^*(R_{зп})$ этих зондов (рис. 5*а*). Кривые этих зависимостей пересекаются при $R_{зп} = 0{,}3$ *м*, поэтому при $R_{зп} > 0{,}3$ *м* параметр глубинности зонда 3И0,3 больше, чем у короткого зонда ВИКИЗ. Следовательно, влияние зоны проникновения на показания короткого зонда ВИКИЗ значительно больше, чем на показания зонда 3И0,3. У коротких зондов А0,4М0,1N и БК-9 также близкие по величине значения P_R (равны 0,2 и 0,32 *м* соответственно). Кривые зависимостей $G_с^*(R_{зп})$ этих зондов не пересекаются (практически параллельны), поэтому и значения $\rho_{кс}$ у зонда А0,4М0,1N будут всегда меньше, чем у зонда БК-9, что и наблюдается на рис. 4*б* (у зонда А0,4М0,1N – 7,7 *Ом·м*, у БК-9 – 11,3 *Ом·м*).

Максимальное значение параметра глубинности в данной модельной ситуации имеет зонд 3И2,05 (5ИК), поэтому он имеет максимальное значение $\rho_{кс}$, равное 20,0 *Ом·м*, а у длинных зондов ВИКИЗ и БКЗ параметр глубинности несколько меньше их значения $\rho_{кс}$ и составляет 19,8 и 19,3 *Ом·м* соответственно.

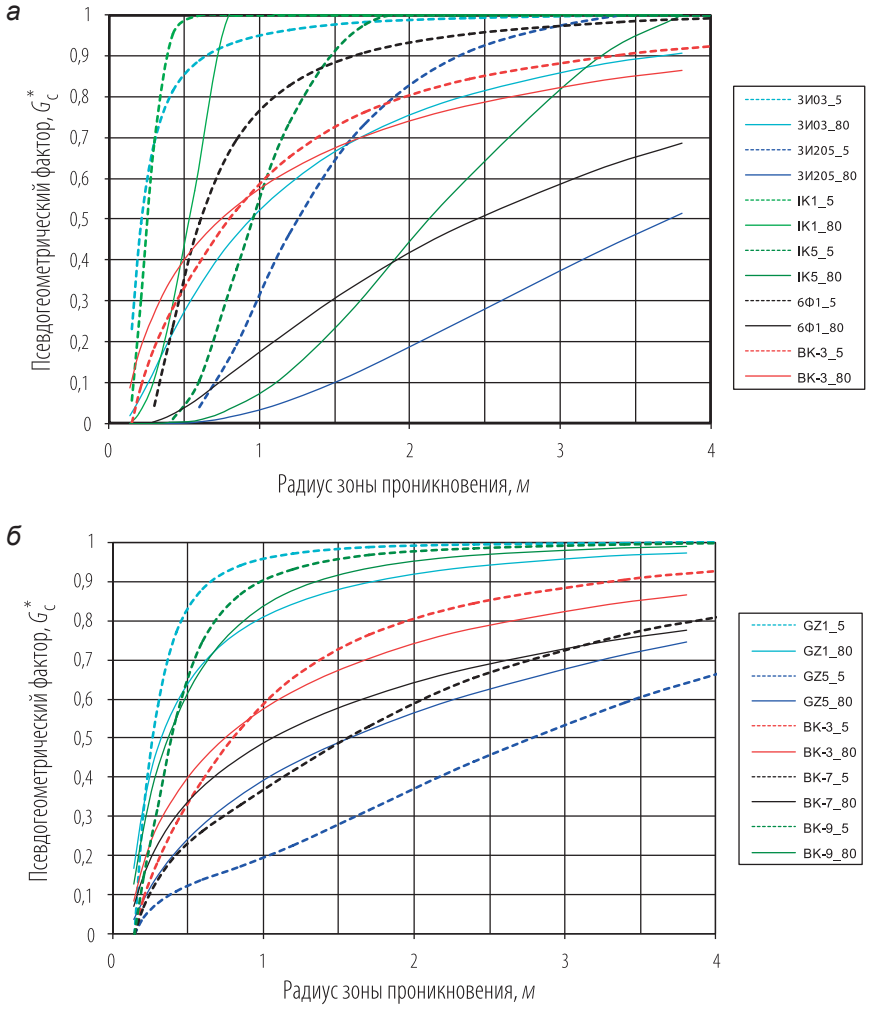


Рис. 5. Результаты расчета зависимостей псевдогеометрических факторов от радиуса зоны проникновения $G_c^* = f(R_{зп})$ для зондов: *а* – ИК, ВИКИЗ; *б* – БКЗ, БК:

- - - - - - кривые с индексом 5: понижающее проникновение ($\rho_п$ = 20 *Ом·м*; $\rho_{зп}$ = 5 *Ом·м*; d_c = 0,2 *м;* ρ_c = 0,25 *Ом·м*);

---------- кривые с индексом 80: повышающее проникновение ($\rho_п$ = 20 *Ом·м*; $\rho_{зп}$ = 80 *Ом·м*; d_c = 0,2 *м;* ρ_c = 0,25 *Ом·м*)

Таким образом, при анализе показаний двух зондов разных комплексов ЭК и ЭМК, представленных в виде кривых $\rho_{кс}$, необходимо учитывать не только величину их параметра глубинности, но и различие в крутизне их зависимостей $G_c^*(R_{зп})$. Если различие велико и кривые этих зависимостей пересекаются, то нужно учитывать положение фактического значения радиуса зоны проникновения $R_{зп}$ относительно точки пересечения зависимостей $G_c^*(R_{зп})$ рассматриваемых зондов. Поскольку это делается на завершающем этапе оценки качества данных ЭК, ЭМК, то значение $R_{зп}$ определяется в результате попластовой интерпретации.

Предложенная процедура обработки позволяет существенно ускорить процесс выделения коллекторов по радиальному градиенту сопротивления в ситуациях, когда имеется значительный интервал исследований, содержащий десятки и даже сотни проницаемых пластов.

Из приведенных примеров следует, что при каротаже прибором 5ИК с центраторами влияние скважины на показания коротких зондов значительно больше, чем у коротких зондов прибора ВИКИЗ. Но нужно учитывать то, что технология ООО «Нефтегазгеофизика» проведения каротажа прибором 5ИК предполагает использование отклонителей, что позволяет в несколько раз уменьшить влияние скважины и корректно исключить его (с учетом отклонения прибора от стенки скважины).

Сопоставление значений КС, исправленных за влияние скважины, на материалах каротажа

Результаты поточечной и попластовой обработки данных зондов ЭК и ЭМК, полученных в скважинах с различными геолого-техническими условиями каротажа, представлены на рис. 6. Обработка проведена в программе LogWin-ЭК [5, 8].

На рис. 6*а* представлены данные комплексов БКЗ, ВИКИЗ и 5ИК в виде кривых КС, исправленных за влияние скважины 1 с пресной промывочной жидкостью (ПЖ) ($d_н$ = 0,216 *м*; $\rho_с$ = 1,45 *Ом·м*). В интервалах 2123,2–2126,2 и 2109,0–2114,8 *м* находятся однородные пласты глин ($\rho_п$ = 3,2 *Ом·м*) и водонасыщенного песчаника ($\rho_п$ = 2,1 *Ом·м*; $\rho_{зп}$ = 15,5 *Ом·м*; *D/d* = 2,4) соответственно. В пласте глин нет проникновения, поэтому значения $\rho_{кс}$ всех зондов практически равны между собой (за исключением среднего и длинных зондов БКЗ, у

которых из-за малой мощности пласта значения КС искажены эффектом экранирования). В интервале пласта песчаника соотношение значений кривых $\rho_{кс}$ в каждом из трех комплексов зондов соответствует соотношению их параметров глубинности (чем короче зонд, тем больше влияние зоны проникновения на его показания и ближе значение его $\rho_{кс}$ к значению $\rho_{зп}$). Значения параметров глубинности коротких зондов комплексов БКЗ, ВИКИЗ и 5ИК в данных условиях можно оценить с учетом контрастности проникновения ($\rho_{зп}/\rho_{п} = 7{,}4$) на рис. 2, где они равны 0,26, 0,4 и 1,1 *м* соответственно, то есть они либо равны радиусу зоны проникновения ($R_{зп} = 0{,}26$ *м*), либо больше него. Значения кривых $\rho_{кс}$ рассматриваемых зондов равны 7,4, 5,1 и 3,1 *Ом·м* соответственно, что указывает на то, что соотношение между величинами параметров глубинности этих зондов и их значениями $\rho_{кс}$ не нарушено. Так и должно быть, поскольку в данной модельной ситуации зонд 3И0,3 имеет не только бóльшую величину параметра глубинности, но и менее крутую зависимость $G^{*}_{с}(R_{зп})$, чем короткий зонд ВИКИЗ, поэтому влияние зоны проникновения на его показания меньше. Все остальные зонды рассматриваемых трех комплексов также имеют значения $\rho_{кс}$, которые соответствуют их значениям P_R (табл. 2).

На рис. 6*б* представлен фрагмент разреза скважины 2, заполненной высокоминерализованной ПЖ ($\rho_{с} = 0{,}1$ *Ом·м*; $d_{н} = 0{,}216$ *м*). Каротаж проведен приборами 5ИК, ЭК-73ПЛ (зондами БК-3, БКЗ), МК-БМК (зондом БМК). В двух интервалах находятся продуктивные пласты с зоной понижающего проникновения. Для анализа результатов поточечной обработки в этих интервалах были выделены два относительно однородных прослоя (2970,3–2975,7 и 2976,5–2980,2 *м*). Электрические параметры этих прослоев, полученные в результате попластовой обработки, следующие: $\rho_{п}$ = 13,8–16,5 *Ом·м*; $\rho_{зп} = 3{,}2$–$4{,}1$ *Ом·м*; $D/d = 4{,}1$–$4{,}2$ (рис. 6*б*). Данные условия каротажа являются благоприятными для зондов ИК, БК, БКЗ и БМК, поскольку контрастность понижающего проникновения $\rho_{зп}/\rho_{п}$ равна 0,18–0,23, а отношения $\rho_{п}/\rho_{с}$ и $\rho_{зп}/\rho_{с}$ находятся в пределах 138–165 и 32–41 соответственно. Пласт глин, который находится ниже, в интервале 2985,3–2989,3 *м* (выделен желтым цветом), имеет значения $\rho_{п}$ и коэффициент анизотропии, равные 5,4 *Ом·м* и 1,8 соответственно. Значения $\rho_{кс}$ зондов ИК равны между собой, а значения зонда БК и коротких зондов БКЗ завышены из-за влияния анизотропии.

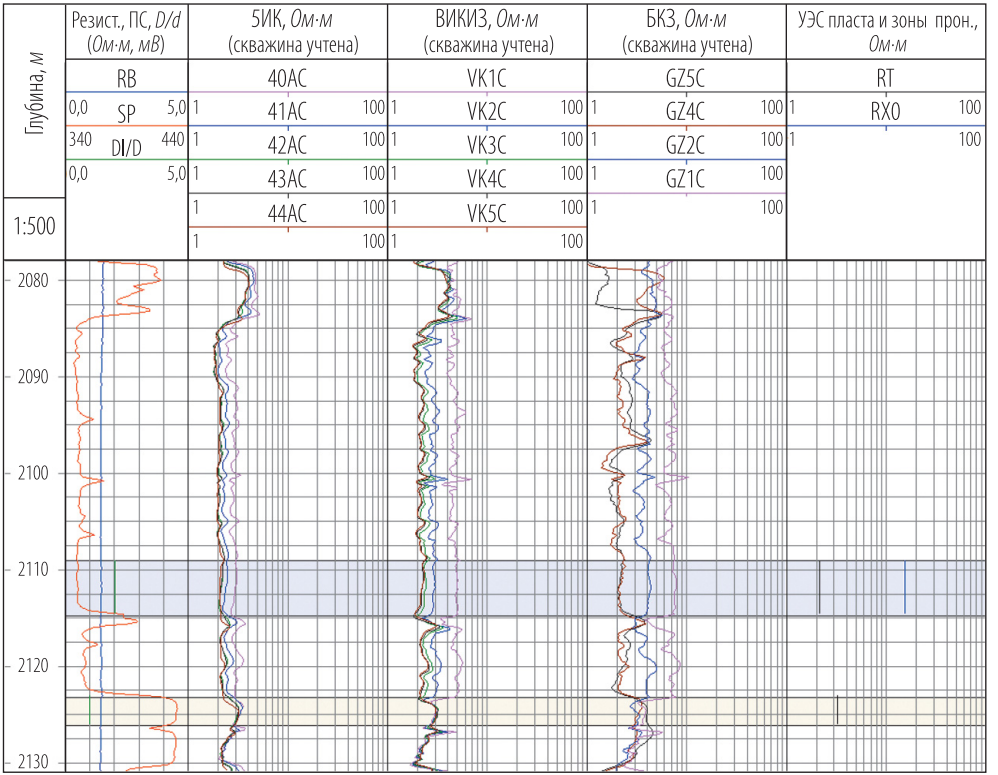


Рис. 6*а*. Пример выделения пластов с зоной проникновения по данным каротажа зондами ЭК и ЭМК, представленным в виде кривых КС, исправленных за влияние скважины: скважина 1 (пласты с зоной повышающего проникновения), $d_н$ = 0,216 *м*; $ρ_c$ = 1,45 *Ом·м*

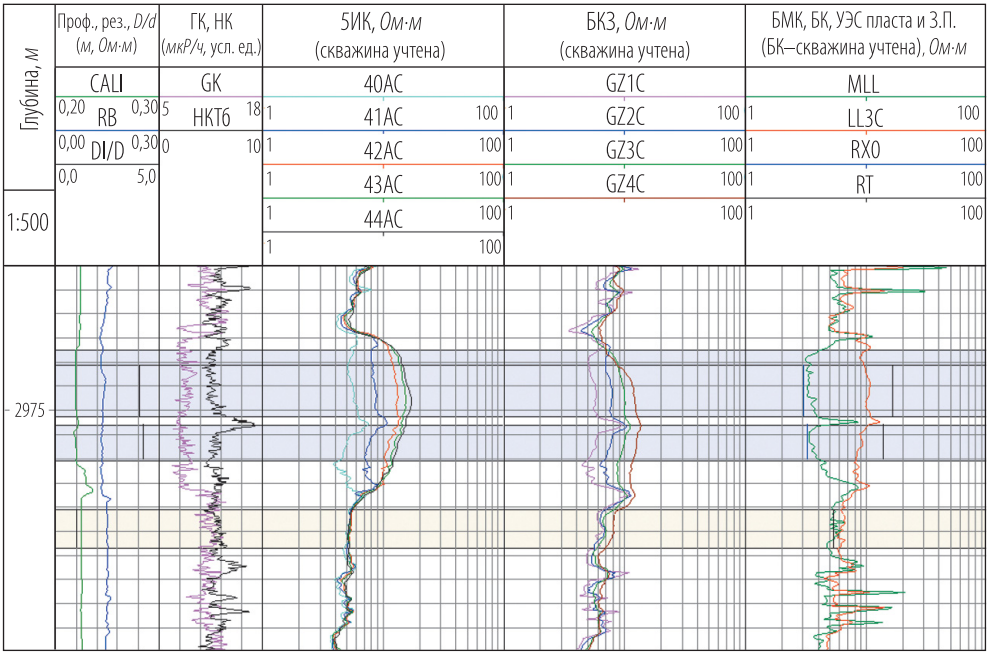


Рис. 6*б*. Пример выделения пластов с зоной проникновения по данным каротажа зондами ЭК и ЭМК, представленным в виде кривых КС, исправленных за влияние скважины: скважина 2 (пласты с зоной понижающего проникновения), $d_н$ = 0,216 *м*, ρ_c = 0,12 *Ом·м*

Таблица 2

Параметр глубинности P_R зондов ЭК и ЭМК, рассчитанный по псевдогеометрическому фактору $G^*_c(R_{зп})$ (d_c = 0,2 *м*; ρ_c = 0,25 *Ом·м*)

Аппаратура	Зонд	Параметр глубинности P_R зондов ЭК и ЭМК														
		$\rho_п$ = 20 *Ом·м*						$\rho_п$ = 4 *Ом·м*					$\rho_п$ = 100 *Ом·м*			
		$\rho_{зп}$ / $\rho_п$						$\rho_{зп}$ / $\rho_п$					$\rho_{зп}$ / $\rho_п$			
		0,05	0,15	0,5	2	4	8	0,25	0,5	2	4	8	0,05	0,15	0,5	2
АБКТ	БКЗ-1	0,14	0,18	0,22	0,28	0,32	0,34	0,19	0,21	0,23	0,25	0,27	0,17	0,22	0,29	0,22
	БКЗ-2	0,20	0,26	0,31	0,36	0,40	0,45	0,34	0,35	0,34	0,34	0,35	0,22	0,29	0,37	0,40
	БКЗ-3	0,39	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,86	0,88	0,67	0,56	0,52	0,32	0,40	0,46	0,70
	БКЗ-4	0,87	1,15	1,13	0,78	0,70	0,67	1,86	2,05	1,76	1,28	0,91	0,51	0,61	0,65	0,70
	БКЗ-5	2,07	2,96	3,57	2,42	1,56	1,16	3,91	4,48	5,03	4,36	3,26	1,27	1,59	1,39	0,96
	ПЗ	0,27	0,35	0,43	0,50	0,54	0,58	0,39	0,41	0,44	0,46	0,49	0,30	0,40	0,50	0,60
АБКТ	БК-3	0,60	0,65	0,68	0,72	0,74	0,77	0,64	0,65	0,67	0,68	0,70	0,62	0,68	0,73	0,79
2БК-7/9	БК-7	1,67	1,51	1,24	1,08	1,06	1,07	2,14	1,83	1,30	1,17	1,09	1,26	1,17	1,10	1,09
	БК-9	0,29	0,31	0,34	0,36	0,37	0,38	0,35	0,35	0,36	0,37	0,37	0,28	0,31	0,34	0,37
АИК-М	6Ф1	0,36	0,48	0,77	1,60	2,44	3,71	0,53	0,69	1,31	1,87	2,64	0,36	0,50	0,81	1,79
5ИК	3И0,3А	0,13	0,17	0,27	0,59	0,94	1,53	0,20	0,26	0,53	0,80	1,20	0,13	0,17	0,28	0,62
	3И0,5А	0,20	0,28	0,46	0,97	1,49	2,30	0,32	0,42	0,81	1,17	1,68	0,21	0,29	0,48	1,06
	3И0,85А	0,34	0,46	0,74	1,48	2,19	3,21	0,50	0,64	1,15	1,60	2,20	0,35	0,48	0,79	1,70
	3И1,26А	0,49	0,66	1,03	1,97	2,82	4,00	0,68	0,84	1,45	1,95	2,61	0,51	0,71	1,14	2,38
	3И2,05А	0,72	1,01	1,51	2,71	3,72	5,09	0,73	1,16	1,82	2,38	3,12	0,81	1,11	1,76	3,50
ВИКИЗ	ВИКИЗ-1	0,16	0,21	0,29	0,43	0,53	0,64	0,18	0,22	0,31	0,36	0,43	0,19	0,25	0,35	0,55
	ВИКИЗ-2	0,23	0,28	0,39	0,60	0,75	0,93	0,25	0,29	0,41	0,49	0,59	0,26	0,34	0,50	0,83
	ВИКИЗ-3	0,31	0,39	0,55	0,84	1,06	1,34	0,35	0,41	0,57	0,68	0,81	0,36	0,48	0,70	1,20
	ВИКИЗ-4	0,44	0,56	0,77	1,19	1,50	1,90	0,50	0,57	0,80	0,95	1,15	0,50	0,67	0,99	1,71
	ВИКИЗ-5	0,62	0,79	1,09	1,69	2,14	2,71	0,70	0,80	1,13	1,35	1,62	0,70	0,95	1,40	2,43

Примечание: БКЗ-1, БКЗ-2, БКЗ-3, БКЗ-4, БКЗ-5 – градиент-зонды А0,4М0,1N; А1,0М0,1N; А2,0М0,5N; А4,0М0,5N; А8,0М1,0N; ПЗ – потенциал-зонд N6,0M0,5A; 3И0,3А; 3И0,5А; 3И0,85А; 3И1,26А; 3И2,05А – активные составляющие зондов 5ИК; ВИКИЗ-1, ВИКИЗ-2, ВИКИЗ-3, ВИКИЗ-4, ВИКИЗ-5 – зонды И10,1И20,4Г; И10,14И20,57Г; И10,2И20,8Г; И10,28И21,13Г; И10,4И21,6Г.

По радиальному градиенту сопротивлений, который отмечается на кривых $\rho_{кс}$ комплексов 5ИК, БК-БМК и БКЗ, уверенно выделяются проницаемые интервалы, характеризующиеся понижающим проникновением. Кривые $\rho_{кс}$ рассматриваемых зондов располагаются в порядке, соответствующем их параметрам глубинности как внутри комплексов 5ИК и БКЗ, так и при сравнении зондов различных комплексов. Например, значения $\rho_{кс}$ короткого зонда БКЗ в обоих пластах практически равны $\rho_{с}$ короткого зонда ИК, а $\rho_{с}$ длинных зондов ИК больше $\rho_{с}$ зондов БК и А4,0М0,5N.

Таким образом, использование предложенного параметра глубинности позволяет в оперативном режиме контролировать качество данных разнотипных зондов ЭК и ЭМК в пластах с зоной проникновения, а также подбирать наиболее эффективный комплекс зондов для известных геолого-технических условий каротажа.

Однако возможны ситуации, при которых отмечаются некоторые несоответствия между значениями $\rho_{кс}$ зондов различных комплексов ЭК и ЭМК. Ниже приведен перечень причин, по которым у разнотипных зондов с близкими значениями P_R кривые $\rho_{кс}$ могут не располагаться в соответствии с соотношением их параметров глубинности:

– разная крутизна зависимостей $G_{с}^{*} = f(R_{зп})$;

– радиально-неоднородная зона проникновения;

– влияние диэлектрической проницаемости на короткие зонды ВИКИЗ.

Необходимо отметить, что величина параметра глубинности зондов ЭК и ЭМК существенно изменяется при уменьшении мощности пластов, но это задача отдельных исследований.

Выводы

В результате проведенных исследований предложена методика расчета параметра глубинности P_R зондов ЭК и ЭМК по псевдогеометрическому фактору в пласте неограниченной мощности, основанная на изучении влияния зоны проникновения различной глубины на величину значения их КС, исправленных за влияние скважины. Сделан вывод о том, что предложенная методика позволяет объективно оценивать параметр глубинности различных зондов БКЗ, БК, ИК, ВИКИЗ и в соответствии со значением P_R выстраивать их в единый ряд. Показано, что параметр глубинности различных зондов зависит в первую очередь от параметра контрастности проникновения $\rho_{зп}/\rho_{п}$.

Данная работа не претендует на то, чтобы охватить все возможные аспекты поднятого вопроса. Авторами проведен анализ, целью которого являлось выявление факторов, определяющих информативность отдельных зондов современных отечественных приборов ЭК и ЭМК, и оценка влияния этих факторов в разных геолого-технических условиях каротажа.

Авторы благодарны к. ф.-м. н. Б. В. Рудяку за весьма ценные, в том числе критические, замечания при работе над данной статьей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Долль Г.* Теория индукционного метода исследований разрезов скважин и его применение в скважинах, пробуренных с глинистым раствором на нефти // Вопросы промысловой геофизики. М.: Гостоптехиздат, 1957. С. 252–274.
2. *Кауфман А. А.* Теория индукционного каротажа. Новосибирск: Наука, 1965. 236 с.
3. *Рудяк Б. В., Снежко О. М., Шеин Ю. Л.* Опробование автономного прибора двухзондового бокового каротажа БК-35А в горизонтальных скважинах // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2009. Вып. 10 (187). С. 12–25.
4. *Рудяк Б. В., Снежко О. М., Шеин Ю. Л.* Технология индукционного каротажного зондирования высокого разрешения // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2013. Вып. 3 (225). С. 70–83.
5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005610807, 2005 г. Авторы: Шеин Ю. Л., Горбачев В. К., Елкина О. Е., Комлев Н. Ю., Косорукова Т. А., Павлова Л. И., Снежко О. М.
6. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2005612569, 2005 г. Авторы: Лобода Д. Р., Велижанин В. А., Власенко П. И., Волнухина А. А., Меженская Т. Е., Павлова Л. И., Пантюхин В. А., Пивоварова Н. Е., Рудяк Б. В., Смирнов Н. А., Снежко О. М., Шеин Ю. Л.
7. *Шеин Ю. Л., Пантюхин В. А., Кузьмичев О. Б.* Алгоритмы моделирования показаний зондов БКЗ, БК, ИК в пластах с зоной проникновения. В сб. «Автоматизированная обработка данных геофизических и геолого-технологических исследований нефтегазоразведочных скважин и подсчет запасов нефти и газа с применением ЭВМ». Калинин: НПО «Союзпромгеофизика». 1989. С. 75–81.
8. *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.
9. *Эпов М. И., Глинских В. Н., Ульянов В. Н.* Оценка характеристик пространственного разрешения систем индукционного и высокочастотного электромагнитного каротажа в терригенных разрезах Западной Сибири // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2001. Вып. 81. С. 19–57.

Рецензенты доктор техн. наук, проф. М. И. Кременецкий, канд. техн. наук В. А. Велижанин

Поступление рукописи в редакцию 22.01.26 г., принятие в печать 09.02.26 г.