

УДК 550.832.7

**Ю. Л. Шеин, О. М. Снежко, Б. В. Рудяк, Л. И. Павлова**  
**ООО «Нефтегазгеофизика»**

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАСТОВ В НАКЛОННЫХ СКВАЖИНАХ С НЕОДНОРОДНЫМИ ВМЕЩАЮЩИМИ ПОРОДАМИ

Предложена методика определения продольного электрического сопротивления пластов, описано программное обеспечение, реализующее данную методику. Даны примеры обработки данных прибора 5ИК в наклонных скважинах.

**Ключевые слова:** электромагнитный каротаж, удельное электрическое сопротивление, обратная задача, неоднородные вмещающие породы, наклонная скважина.

В настоящее время в наклонных и в горизонтальных скважинах обработка данных зондов электромагнитного каротажа (ЭМК – ИК, ВИКИЗ) с целью определения удельного электрического сопротивления (УЭС) пластов, как правило, выполняется по программам и методикам, разработанным для вертикальных скважин. В результате определение УЭС продуктивных пластов при таком подходе может приводить к значительным неконтролируемым погрешностям и, как следствие, к ошибочным заключениям о характере насыщения коллекторов. Для решения этой проблемы была разработана методика определения УЭС пластов в наклонных скважинах по данным ЭМК, использующая программную реализацию обратной задачи для модели пласта ограниченной мощности без скважины с неоднородными вмещающими породами.

Ниже кратко изложена методика определения продольного электрического сопротивления пластов ( $\rho_n$ ) по данным зондов прибора 5ИК-90А в наклонных скважинах с учетом зенитного угла наклона ствола скважины ( $\alpha$ ) и влияния неоднородных вмещающих пород, а также приведены примеры применения этой методики в модельных и реальных разрезах.

Решение обратной задачи (определение величины  $\rho_n$ ) основано на поиске минимума целевой функции  $\Phi(\rho_n)$ :

$$\Phi(\rho_n) = \sum_{j=1}^{N_{\text{зонд}}} \sum_{i=1}^{N_z} \theta_i \cdot W^2(j, i), \quad (1)$$

где  $\rho_n$  – массив искомых значений истинных сопротивлений пластов;

$N_{\text{зонд}}$  – число зондов, участвующих в обработке;  $N_z$  – количество точек по оси  $Z$  выбранного интервала обработки, в которых выполнена запись зондами;  $\theta_i$  – весовой множитель, характеризующий значимость вклада данной точки  $i$  в целевую функцию  $\Phi$ ;  $W(j, i)$  – величина невязки  $j$ -го зонда в  $i$ -й точке:

$$W(j, i) = \frac{\gamma_{k, j, i}^{\phi} - \gamma_{k, j, i}^{\tau}(\rho_n)}{\sqrt{(\Delta_j^{\text{mul}} \cdot \gamma_{k, j, i}^{\phi})^2 + (\Delta_j^{\text{add}})^2}}. \quad (2)$$

Здесь  $\gamma_{k, j, i}^{\phi}$  – измеренное (фактическое) значение кажущейся электропроводимости (КП)  $i$ -го зонда ИК в  $j$ -й точке;  $\gamma_{k, j, i}^{\tau}(\rho_n)$  – соответствующее теоретическое значение КП, найденное посредством решения прямой задачи согласно [1, 2] в предположении, что угол  $\alpha$  известен (рассчитывается по данным инклинометрии);  $\Delta_j^{\text{mul}}, \Delta_j^{\text{add}}$  – максимально допустимые значения мультипликативной и аддитивной составляющих погрешности измерений  $j$ -го зонда (для зондов ИК берутся  $\Delta_j^{\text{mul}} = 0,05$ ,  $\Delta_j^{\text{add}} = 5 \text{ мСм}/\text{м}$ , что соответствует максимально допустимым искажениям масштаба записи  $\pm 5\%$  и сдвигов нуля  $\pm 5 \text{ мСм}/\text{м}$ ).

Так как изучаемый пласт находится в неоднородных вмещающих породах с неизвестными сопротивлениями, то эти породы разбиваются на относительно однородные интервалы, а сама задача сводится к минимизации функции нескольких переменных (общее число неизвестных УЭС пластов). Поскольку число переменных, как правило, достаточно большое, а прямая задача в наклонной скважине [1, 2] для нескольких зондов ИК решается не очень быстро, то определение сопротивлений пласта и вмещающих может составлять несколько часов.

При решении прямой задачи [1, 2, 6, 7] используется модель непроницаемого пласта ограниченной мощности без скважины в неоднородных вмещающих породах, поэтому при решении обратной задачи следует брать фактические кривые кажущихся проводимостей зондов ИК, исправленные за влияние скважины. При этом сделано допущение, что ствол наклонной скважины пересекает пластины без зоны проникновения со строго горизонтальными границами. В случае обнаружения влияния на показания коротких зондов зоны проникновения в пласте-коллекторе они исключаются из обработки. По умолчанию коэффициенты анизотропии пласта и вмещающих полагаются равными 1,1, однако при наличии априорной информации их величины могут меняться.

Входными данными программы решения обратной задачи являются:

- величина зенитного угла  $\alpha$  (как указано выше, берется из инклинометрии);
- список зондов, участвующих в обработке;
- кривые кажущейся проводимости зондов, исправленные за влияние скважины;
- границы пласта и однородных интервалов во вмещающих породах;
- начальное приближение УЭС разреза (кусочно-постоянная кривая RT0).

Выбор начального приближения RT0 имеет большое влияние на скорость решения обратной задачи. Очевидно, чем ближе начальное приближение к искомому решению, тем быстрее это решение будет найдено. По этой причине предлагается кривую RT0 определять как результат попластовой обработки в программе LogWin-ЭК по методике для вертикальных скважин [5, 8]. Вмещающие породы могут быть представлены несколькими пластами с разными электрическими параметрами ( $\rho_n$ ,  $\lambda_n$ ). Предполагается, что самый верхний и самый нижний пласты имеют бесконечную мощность.

Таким образом, задача сводится к поиску во всех пластах значений УЭС, обеспечивающих максимальное совмещение расчетных кривых КП с соответствующими фактическими кривыми в искомом пласте и вмещающих его породах для всех участвующих в обработке зондов. В процессе поиска решений рассчитываются также кривые невязок для каждого зонда ИК и уровень соответствия  $W$  для найденного значения  $\rho_n^*$ :

$$W = \sqrt{\frac{\Phi(\rho_n^*)}{(N_{\text{зонд}} \cdot \sum_{i=1}^{N_z} \theta_i)}}. \quad (3)$$

Кроме того, в программе предусмотрена оценка погрешностей определения искомых сопротивлений, обусловленная погрешностями измерений зондов. Оценка погрешностей основана на методике, изложенной в [3]. Если уровень соответствия  $W \leq 1$ , то можно говорить о том, что теоретические кривые КП в среднем по зондам и точкам на диаграммах записи хорошо согласуются с фактическими кривыми.

Кривые невязок зондов  $W(j, i)$  демонстрируют величину отклонения теоретических кривых КП для найденного решения  $\rho_n^*$  от фактических кривых КП для каждого зонда в отдельности и в каждой точке регистрации. Если невязки лежат в интервале  $-1 \leq W(j, i) \leq +1$ , то можно говорить о хорошем совпадении теоретических кривых КП с фактическими кривыми. Это позволяет контролировать качество входных данных и достоверность найденных параметров пласта.

Программа позволяет жестко фиксировать значение УЭС для одного или нескольких однородных интервалов во вмещающих породах (например, если имеется априорная информация о них по пилотной скважине). В этом случае ищутся сопротивления во всех остальных выделенных пластах.

Методика определения УЭС пластов содержит следующие этапы:

1. Отбивка границ искомого пласта и окружающих его вмещающих пластов (по данным НК, ГК, ГГК).
2. Выбор комплекса зондов, данные которых будут приниматься в расчет при поиске электрических параметров разреза.
3. Внесение необходимых корректур, в том числе за скважину в кривые КП выбранных зондов.
4. Выбор начального приближения RT0.
5. Определение искомых параметров разреза (RT) с помощью специализированного программного модуля.
6. Анализ полученных результатов и принятие решений.

Отбивка границ предполагается по стандартной процедуре по данным НК, ГК, ГГК в программе LogWin-ЭК [5].

Особое внимание следует уделять выбору комплекса зондов, участвующих в обработке, поскольку на короткие зонды комплекса сильное влияние могут оказывать скважина и зона проникновения, а на длинные – вмещающие породы. Данные длинных зондов ЗИ2,05 и ЗИ1,26 можно использовать, когда истинная мощность искомого пласта ( $h_{п.и}$ ) составляет не менее 2,5 и 1,6 м соответственно, причем истинные мощности вмещающих пород ( $h_{вм.и}$ ) и в кровле, и в подошве пласта должны браться, соответственно, также не менее 3 и 2,0 м. Данные коротких зондов можно использовать только в пластах без зоны проникновения и при наличии профилеметрии, резистивиметрии и проведении каротажа с отклонителями, то есть при возможности корректного учета влияния скважины.

Внесение корректур (например, сдвигов нулевых линий КП зондов ИК) – процедура, которая может быть выполнена как в программе LogPWin [4], так и в программе LogWin-ЭК [5, 8].

В качестве начального приближения RT0 рекомендуется использовать результаты, полученные по методике для вертикальных скважин [5, 8] во всех выделенных пластах рассматриваемого интервала обработки. В тонких пластах, из-за сильного влияния вмещающих пород на длинные зонды 5ИК, при построении RT0 рекомендуется использовать в обработке лишь один-два средних зонда комплекса 5ИК (ЗИ0,5, ЗИ0,85). Если есть априорные данные по значениям  $\rho_n$  и  $\lambda_n$  во вмещающих породах, полученные в пилотной скважине, то они могут быть использованы при формировании кривой RT0 с указанием фиксированных значений  $\rho_n$  и  $\lambda_n$  в этих вмещающих интервалах. Тогда при решении задачи эти величины изменяться не будут, что приведет к повышению устойчивости задачи поиска электрических параметров разреза RT на выделенном интервале и существенному сокращению времени этого поиска.

Определение искомых параметров разреза RT осуществляется выбором соответствующего пункта меню в программе LogWin-ЭК с помощью специализированного программного модуля.

Полученные в программе результаты следует проанализировать на предмет их достоверности и принять решение. Если уровень соответствия и кривые невязок имеют приемлемые значения ( $W \leq 1$ ;  $|W(j, i)| \leq 1$ ), то можно считать, что искомые параметры разреза найдены правильно, и они могут быть использованы для геологической интерпретации. В противном случае необходимо убедиться в качестве исходных материалов (при необходимости внести корректуры), проверить правильность отбивки границ и выбор зондов, участвующих в обработке. После внесенных изменений процедуру следует повторить.

Предполагается, что практически все осадочные породы анизотропны относительно электросопротивлений, поэтому при отсутствии данных о величине коэффициента анизотропии его значение принимается по умолчанию равным 1,1. При необходимости значение  $\lambda_n$  корректируется. Например, в глинах значение  $\lambda_n$  может находиться в пределах 1,5–2,5. В рассматриваемых ниже примерах обработки использовались значения  $\lambda_n = 1,1$ , поскольку данные в пилотных скважинах отсутствовали.

Ниже приведены результаты обработки данных ЭМК в скважинах с большим углом наклона на модельных и скважинных материалах.

Для удобства анализа материалов полученные в результате решения обратной задачи теоретические кривые КП были исправлены за скин-эффект, то есть получены теоретические кривые КС, которые используются в дальнейшем при сравнении с фактическими кривыми КС, исправленными за влияние скважины.

Для изучения влияния вмещающих пород на показания зондов ЭМК для наклонной скважины ( $\alpha = 70^\circ$ ) был рассчитан модельный разрез. Ствол скважины пересекает пласти разной мощности, находящиеся в относительно низкоомных однородных вмещающих породах. Значения УЭС высокоомных пластов приняты одинаковыми ( $\rho_n = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), а истинная мощность ( $h_{\text{п.и}}$ ) составляет 2, 4, 6, 8 м. Они находятся во вмещающих пластах с  $\rho_{\text{вм}} = 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  и  $h_{\text{вм.и}} = 6,0 \text{ м}$ . Кривые КП и КС зондов 5ИК и УЭС самого модельного разреза представлены на рис. 1. Отмечается логичное увеличение влияния низкоомных вмещающих пород на показания зондов ЭМК в высокомоих пластах при уменьшении их мощности. Поскольку реактивные компоненты КП зондов ИК наиболее подвержены влиянию вмещающих пород, рекомендуется их использовать в разрезах, представленных мощными низкоомными продуктивными пластами.

Для высокомоих одиночных пластов с  $\rho_n = 50, 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  ( $h_{\text{п.и}} = 4,0 \text{ м}$ ) и однородными вмещающими пластами ( $\rho_{\text{вм}} = 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ), вскрытыми под различными углами, были рассчитаны модельные кривые КП и КС зондов 5ИК-90А. Затем в предположении, что это фактические скважинные данные, была проведена обработка этих кривых по рассматриваемой методике определения УЭС искомого пласта с учетом влияния вмещающих пород. Были опробованы два варианта выбора начального приближения RT0. В первом в качестве RT0 были взяты попластовые отсчеты модельной кривой УЭС (RPM), во втором использовался результат попластовой обработки по методике для вертикальных скважин. Восстановленные таким образом параметры разреза RT (УЭС пластов) совпали между собой и с его исходными параметрами, а значения невязок у каждого зонда оказались практически равными нулю.

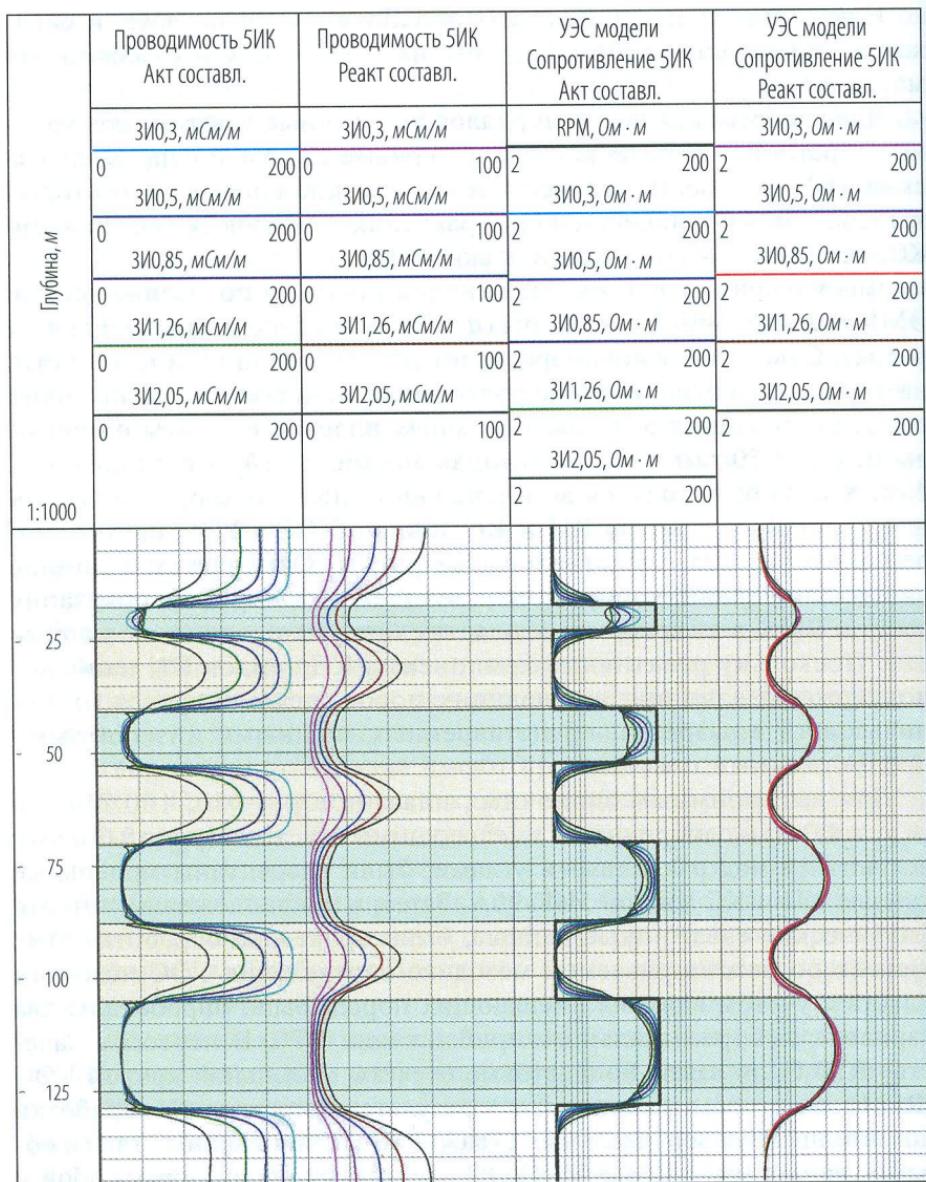


Рис. 1. Результаты расчета кривых КП и КС зондов 5ИК для модельного разреза наклонной скважины. Параметры модельного разреза:  $\rho_n = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_{n,i} = 2; 4; 6; 8 \text{ м}$ ;  $\rho_{bm} = 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_{bm,i} = 6,0 \text{ м}$ ;  $\lambda_n = \lambda_{bm} = 1,1$ ;  $\alpha = 70^\circ$

Следующий пример обработки также основан на модельных материалах. Но на этот раз тот же искомый пласт ( $\rho_n = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_{n,i} = 4 \text{ м}$ ) окружен неоднородными вмещающими породами в кровле ( $\rho_{вм.кр.и} = 5; 20; 100; 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_{вм.кр.и} = 1,84; 1,5; 1,5; 2,0 \text{ м}$ ) и подошве ( $\rho_{вм.под.и} = 10; 100; 30; 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_{вм.под.и} = 2,0; 1,0; 2,0; 2,0 \text{ м}$ ). Кривые КП и КС зондов 5ИК, рассчитанные в интервале 80–132 м, представлены на рис. 2. Обработка данных ЭМК также была проведена для двух тех же самых вариантов выбора начального приближения УЭС пластов RT0. Как и в предыдущем случае, независимо от выбора начального приближения восстановленные значения УЭС (RT) искомого пласта и вмещающих его пластов равны их модельным значениям, а невязки у всех зондов 5ИК равны нулю. При этом величина абсолютной погрешности определения параметра RT в искомом пласте составляет  $\pm 6,8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (или 14%).

Отсюда можно сделать следующие выводы.

1. Выбранная процедура поиска минимума целевой функции (1) сходится, а программа обработки работает правильно при определении RT с учетом влияния однородных и неоднородных вмещающих пород.

2. При определении УЭС пласта в неоднородных вмещающих породах в наклонной скважине выбор в качестве начального приближения RT0 результата попластовой обработки по методике для вертикальных скважин позволяет ускорить процедуру поиска решения в несколько раз.

Ниже приведены результаты опробования разработанной методики на фактических данных каротажа 5ИК-90А, полученных в наклонных скважинах. Опыт обработки данных ЭМК в таких скважинах показал, что продуктивные пластины, как правило, окружены неоднородными вмещающими породами, которые представлены несколькими тонкими пластами с разными значениями УЭС и мощности.

Рассмотрим скважину № 1, пробуренную с раствором на углеродной основе (РУО), в которой проведен каротаж аппаратурой 5ИК-90А и PerisCope (LWD) фирмы «Шлюмберже». В интервале 2702,2–2709,5 м под углом 71° вскрыт продуктивный пласт-коллектор, мощность которого  $h_{n,i}$  равна 2,5 м. На рис. 3 этот пласт и вмещающие его пластины закрашены синим и зеленым цветом соответственно. Вмещающие породы представлены 10 пластами, они неоднородны по УЭС (около 4–15  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ) и имеют весьма небольшие толщины ( $h_{вм.и} = 0,2\text{--}0,9 \text{ м}$ ). Для обработки данных выделен весьма значительный интервал 2694–2718,7 м ( $h_{и} = 8,2 \text{ м}$ ), который включает и продуктивный, и вмещающие его пластины.

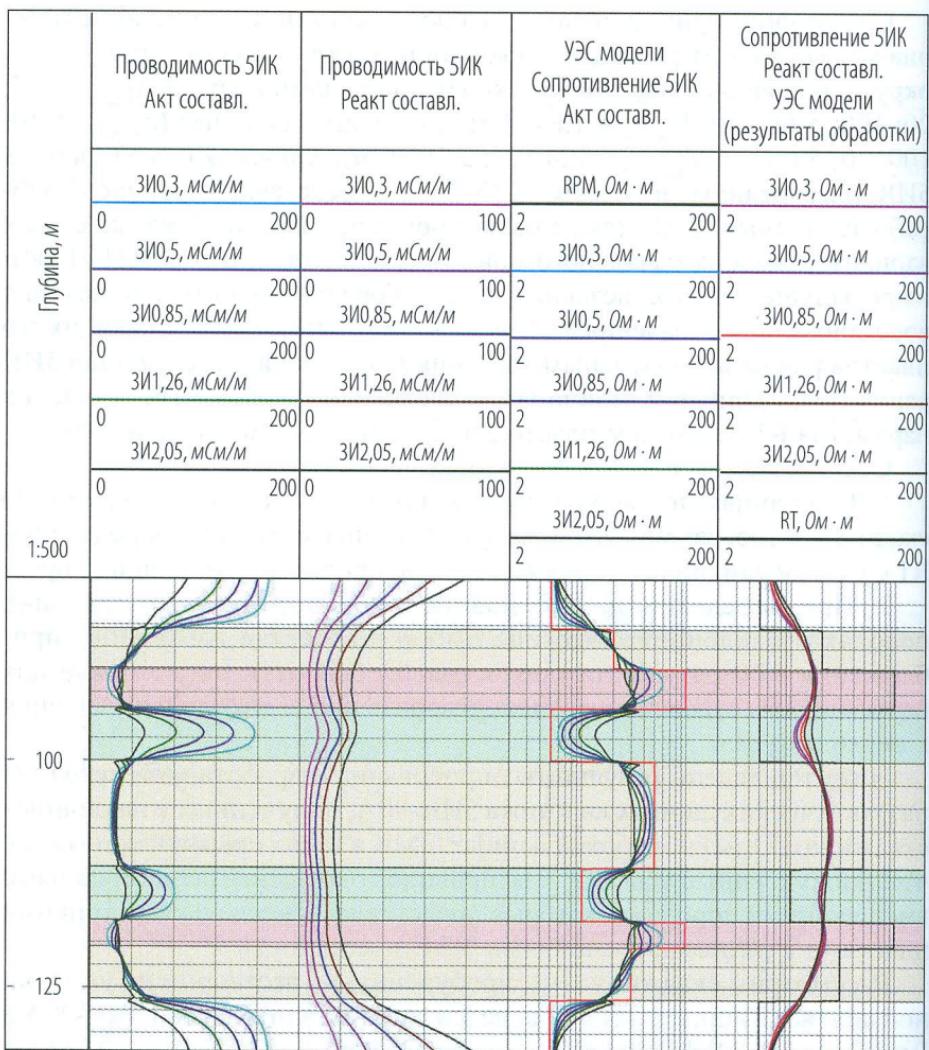


Рис. 2. Результаты определения УЭС пласта (инт. 100,0–111,7 м) по данным 5ИК-90А в модельном разрезе наклонной скважины с учетом влияния неоднородных вмещающих пород. Параметры модельного разреза:  $\alpha = 70^\circ$ ;  $\rho_n = 50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_{\text{п.и}} = 4 \text{ м}$ ;  $\rho_{\text{вм.кр}} = 5; 20; 100; 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_{\text{вм.кр.и}} = 1,84; 1,5; 1,5; 2,0 \text{ м}$ ;  $\rho_{\text{вм.под}} = 10; 100; 30; 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;  $h_{\text{и.вм.под.и}} = 2,0; 1,0; 2,0; 2,0 \text{ м}$ ;  $\lambda_n = \lambda_{\text{вм}}$  = 1,1

Самый короткий зонд ЗИ0,3 при обработке не использовался, поскольку значение определяемого им КС значительно больше КС зонда ЗИ0,5, что является признаком влияния зоны повышающего проникновения. Кривая УЭС начального приближения RT0 была сформирована по результатам попластовой обработки, рекомендуемой для вертикальных скважин, причем во вмещающих пластах – по данным зонда ЗИ0,5 (как наименее подверженного влиянию вмещающих пород), а в пласте-коллекторе – по данным трех зондов ЗИ0,5; ЗИ0,85; ЗИ1,26 (как наименее подверженных влиянию зоны проникновения и вмещающих пород). Данные длинного зонда ЗИ1,26 были взяты по причине достаточной мощности пласта коллектора ( $h_{\text{п.и}} = 2,4 \text{ м}$ ).

Поскольку значение УЭС вмещающих пластов предполагалось неизвестным (не использовались материалы пилотной скважины), то при обработке уточнялись значения УЭС как пласта-коллектора, так и вмещающих его пластов. Результаты обработки приведены на рис. 3. Расчитанное значение УЭС (RT) продуктивного пласта равно  $29,2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , что на 36% больше заданного начальным приближением значения УЭС (RT0). Во вмещающих породах также наблюдается подобное расхождение, которое в наиболее тонких пластах достигает 23–49%.

Полученное значение RT пласта можно считать достаточно достоверным, так как величина абсолютной погрешности составляет  $\pm 3,3 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (или 11%), а уровень соответствия равен 0,34. При этом невязки отдельных зондов ИК в продуктивном пласте не превышают 0,35, и только во вмещающих пластах и на границах пластов они достигают 0,72–1,16, вероятно, по причине неоднородности вмещающих пород и погрешности отбивки границ пластов и пропластков.

Достоверность полученных результатов подтверждают и данные, полученные с помощью аппаратуры PerisCope (LWD) фирмы «Шлюмберже» (рис. 3) в процессе бурения раньше, чем был выполнен каротаж прибором 5ИК-90А. Для удобства анализа результатов обработки кривая КС короткого зонда PerisCope (P16Н) помещена во все три окна с кривыми КС. В пласте-коллекторе значения УЭС, полученные по данным 5ИК-90А и PerisCope, практически равны. При этом значение КС короткого зонда ЗИ0,3, как и предполагалось, несколько выше рассчитанного УЭС (RT) и кривой P16Н, вероятно, по причине влияния зоны повышающего проникновения, которая образовалась уже после каротажа прибором PerisCope. Во вмещающих породах также получены результаты, которые хорошо согласуются с данными PerisCope.

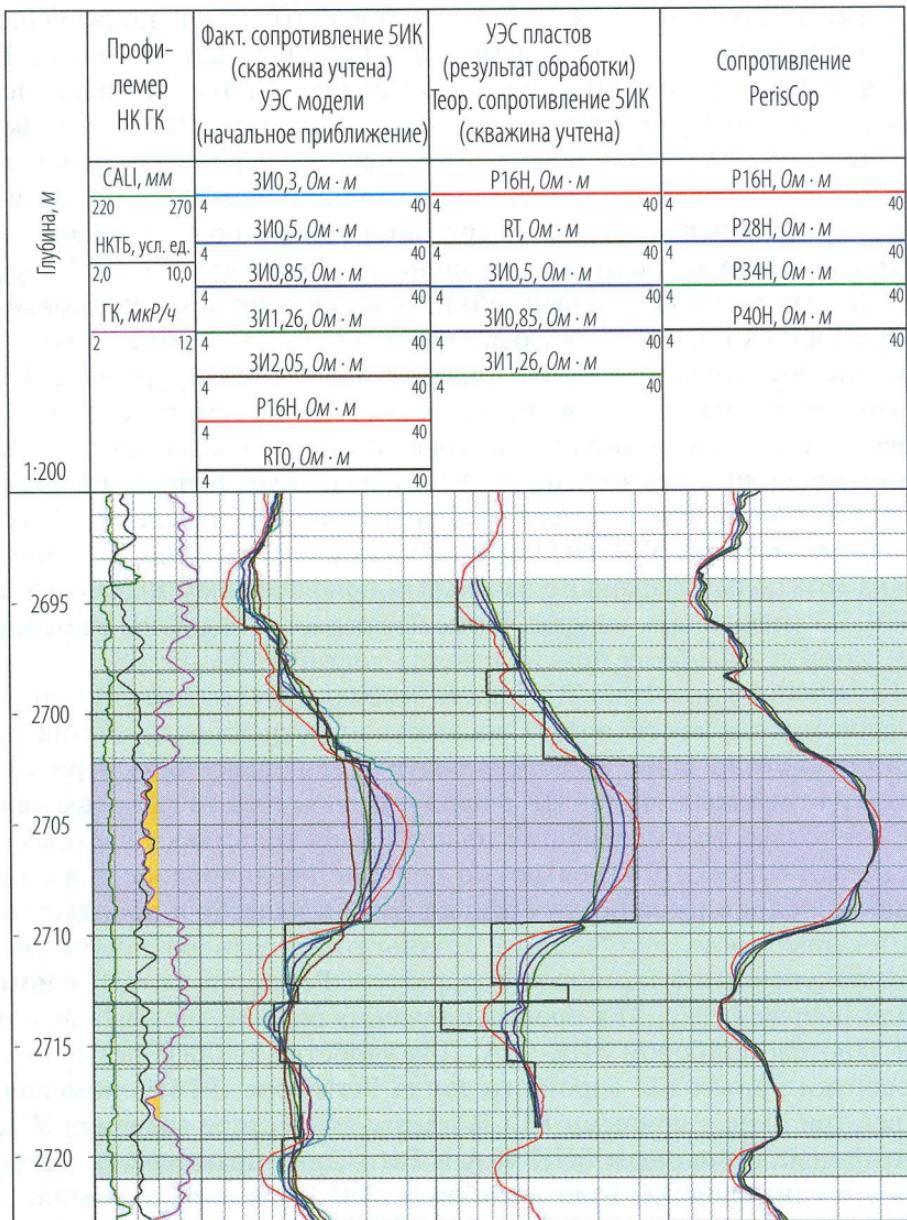


Рис. 3. Результаты исследований аппаратурой 5ИК-90А и PerisCope (LWD) фирмы «Шлюмберже» на РУО в наклонной ( $\alpha = 70\text{--}71^\circ$ ) скважине № 1 и определения по данным 5ИК-90А значений УЭС пласта-коллектора (инт. 2694–2721 м) с учетом влияния неоднородных вмещающих пород

Далее рассмотрим скважину № 2, в которой каротаж аппаратурой 5ИК-90А тоже проведен на РУО. В интервале 2471,8–2486,8 м под углом 75–78° вскрыт продуктивный пласт-коллектор, мощность которого  $h_{\text{п.и}} = 3,5 \text{ м}$  (рис. 4). Вмещающие породы неоднородны по УЭС и представлены восемью пластами весьма небольшой толщины ( $h_{\text{вм.и}} = 0,3\text{--}1,8 \text{ м}$ ), в целом относительно низкоомными, с УЭС около  $26\text{--}52 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (только один пласт имеет УЭС более  $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ). Для обработки данных выделен весьма значительный интервал 2460,6–2508 м ( $h_{\text{и}} = 10,5 \text{ м}$ ).

При обработке не были использованы данные короткого зонда ЗИ0,3, поскольку при столь малом значении КП ( $16,5 \text{ мСм/м}$ ) корректно учесть влияние скважины можно только при использовании отклонителей, а каротаж был проведен без них. Кроме того, возможно, на показания зонда ЗИ0,3 оказывает влияние зона повышающего проникновения.

В связи с этим при расчете кривой RT0 были использованы результаты попластовой обработки остальных зондов по методике, рекомендуемой для вертикальных скважин. Мощность пласта-коллектора  $h_{\text{п.и}} = 3,5 \text{ м}$ , поэтому при построении RT0 в самом пласте был использован даже самый длинный зонд ЗИ2,05, а RT0 вмещающих пород определялось по данным зондов ЗИ0,5 и ЗИ0,85.

При окончательной обработке (после расчета кривой RT) были использованы вышеупомянутые четыре зонда ИК. Данные пилотной скважины о величине УЭС вмещающих пород не использовались, поэтому обработка проведена в режиме поиска УЭС всех пластов рассматриваемого интервала.

Результаты обработки приведены на рис. 4. Найденное значение УЭС пласта-коллектора (RT) равно  $178 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , что на 60% больше значения начального приближения (RT0). При этом величина абсолютной погрешности составляет  $\pm 85 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (или 48%), а уровень соответствия равен 0,34. В пластах вмещающих пород также отмечается существенное отличие найденных значений УЭС пластов (RT) от соответствующих значений начального приближения RT0 (в основном в пределах 20–70%). Например, в одном тонком высокоомном пласте ( $h_{\text{и}} = 0,4 \text{ м}$ ) расчетное значение RT составило  $763 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  (больше значения RT0 почти в восемь раз). Погрешность оценки УЭС данного пласта, безусловно, очень велика, поскольку он имеет весьма незначительную мощность, а величина его УЭС велика и в разы превышает значения УЭС соседних вмещающих пластов гораздо

большей мощности. Но главное то, что все использованные данные о вмещающих породах внесли необходимый вклад в полученный результат, и это позволило учесть влияние неоднородных вмещающих пород на показания зондов ИК в продуктивном пласте-коллекторе.

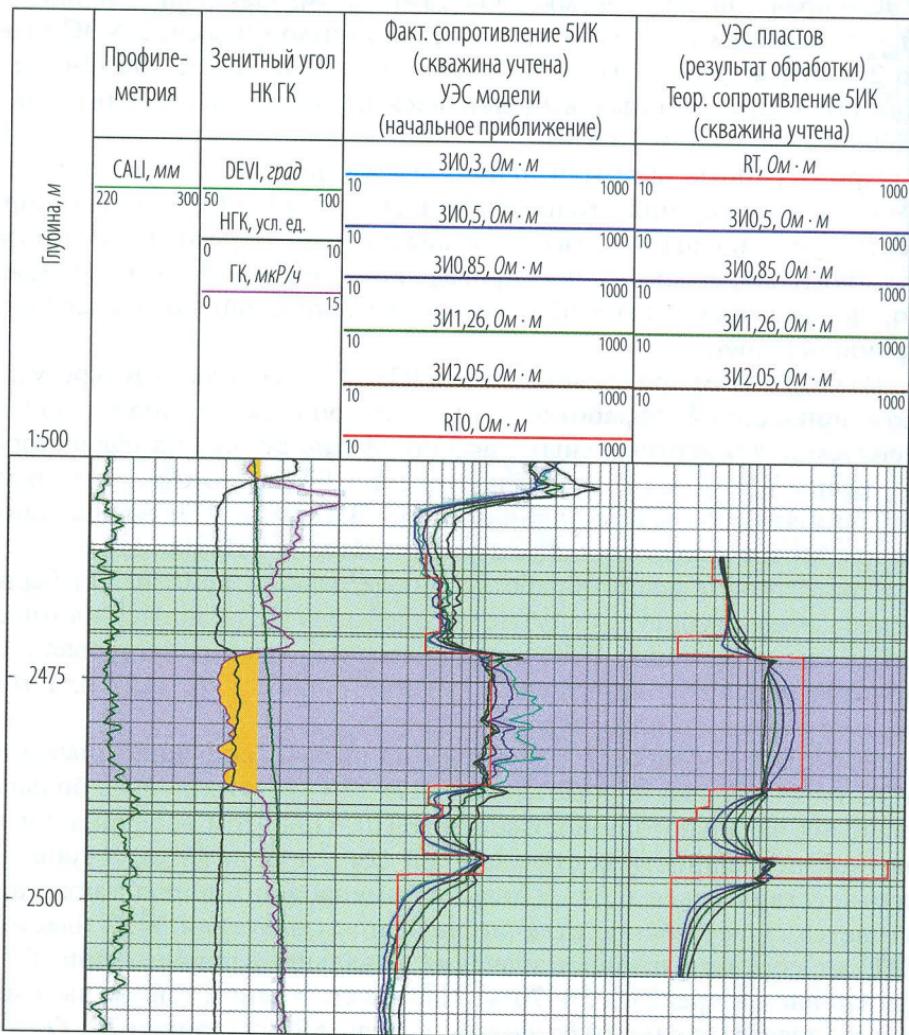


Рис. 4. Результаты исследований аппаратурой 5ИК-90А на РУО в наклонной ( $\alpha = 75\text{--}78^\circ$ ) скважине № 2 и определения значений УЭС пласта-коллектора (инт. 2471,8–2486,8 м) с учетом влияния неоднородных вмещающих пород

Следует отметить хорошее совпадение теоретической и фактической кривых КП зондов как в самом пласте, так и во вмещающих породах, о чем свидетельствует малое значение невязок этих кривых (в пласте-коллекторе невязки не превышают значений 0,57, а во вмещающих породах – 0,83).

Нужно еще раз подчеркнуть, что при определении значений УЭС пород, значительно превышающих  $100 \text{ Om} \cdot \text{m}$ , основным методом является боковой каротаж (БК), но в настоящее время на многих месторождениях нефти и газа наклонные скважины бурятся и исследуются на РУО. В этих условиях каротаж возможен только зондами ЭМК, в связи с чем изложенная методика особенно актуальна.

В предложенной статье приведены результаты опробования изложенной методики на примере данных прибора 5ИК-90А, но все изложенное справедливо и для приборов ВИКИЗ и ВЭМКЗ, а расчет модельных разрезов и обработка данных зондов этих приборов производятся в программе LogWin-ЭК [4].

## Заключение

Таким образом, предлагаемое программно-методическое обеспечение позволяет в наклонных скважинах существенно повысить точность определения УЭС пластов по сравнению с результатами обработки по методике, разработанной для вертикальных скважин. Наиболее хорошие результаты получаются в скважинах, исследованных на РУО и пресных промывочных жидкостях (ПЖ). В скважинах с высокоминерализованными ПЖ при благоприятных условиях ( $h_{\text{п.и}} \geq 4,0 \text{ м}$ ;  $\rho_{\text{п}} < 40 \text{ Om} \cdot \text{m}$ ;  $d_{\text{п}} < 170 \text{ мм}$ ) можно также получать удовлетворительные результаты по данным 2–3 наиболее длинных зондов 5ИК-90А.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вержбицкий В. В., Пантиухин В. А. Влияние анизотропии проводимости на результаты электрического и электромагнитного каротажей в горизонтальных и наклонных скважинах // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2016. Вып. 9 (267). С. 94–108.
2. Пантиухин В. А., Чадаев Е. В., Юматова Т. Г. Эквивалентность при индукционном каротаже наклонных анизотропных пластов // Изв. вузов. Геология и разведка. 1986. № 2. С. 148–151.

3. Рудяк Б. В., Шеин Ю. Л. Оценка достоверности определения электрических параметров пластов-коллекторов // Изв. вузов. Геология и разведка. 1989. № 10. С. 105–110.
4. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2005612569, 2005. Авторы: Лобода Д. Р., Велижанин В. А., Власенко П. И., Волнухина А. А., Меженская Т. Е., Павлова Л. И., Пантиохин В. А., Пивоварова Н. Е., Рудяк Б. В., Смирнов Н. А., Снежко О. М., Шеин Ю. Л.
5. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005610807, 2005. Авторы: Шеин Ю. Л., Горбачев В. К., Ёлкина О. Е., Комлев Н. Ю., Косорукова Т. А., Павлова Л. И., Снежко О. М.
6. Табаровский Л. А., Эпов М. И. Электромагнитное поле гармонических источников в слоистых анизотропных средах // Геология и геофизика. 1977. № 1. С. 101–109.
7. Чадаев Е. В., Гайдаш А. Д., Санто К. Л., Пантиохин В. А. Индукционный каротаж наклонных анизотропных пластов // Геология и геофизика. 1980. № 10. С. 106–112.
8. Шеин Ю. Л., Павлова Л. И., Рудяк Б. В., Снежко О. М. Определение геоэлектрических характеристик разреза при совместной обработке данных разнотипных зондов электрического и электромагнитного каротажа // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2009. Вып. 5 (182). С. 89–100.

*Рецензент доктор техн. наук, проф. Л. Е. Кнеллер*