

УДК 550.832.7

Ю. Л. Шеин, Л. И. Павлова, Б. В. Рудяк, О. М. Снежко
ООО "Нефтегазгеофизика"

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗРЕЗА В ПРОГРАММЕ LOGWIN-ЭК

Изложены основные принципы организации программы и ее возможности при совместной обработке данных разнотипных зондов электрического и электромагнитного каротажа.

Ключевые слова: электро- и электромагнитный каротаж, разнотипные зонды, программа обработки данных на ЭВМ.

В комплексе ГИС важнейшее место занимают методы, несущие информацию о геоэлектрических характеристиках разреза. Они остаются практически единственными методами, служащими для оценки коэффициента нефтегазонасыщенности, и занимают более половины объема геофизических исследований, проводимых в открытом стволе.

К настоящему времени в производственных организациях сложился весьма широкий парк скважинных приборов. Кроме того, выполняемые проекты по подсчету запасов требуют переобработки материалов по скважинам старого фонда, в том числе исследованных приборами, уже являющимися "историей", для которых палеточное обеспечение практически недоступно, а программное обеспечение часто отсутствует. Для повышения достоверности интерпретации требуется совместная обработка данных разнотипных зондов электрического (ЭК) и электромагнитного (ЭМК) каротажа, позволяющая сузить область эквивалентности получаемых решений.

В 90-е годы для этой цели была разработана программа ЭКАР, рекомендованная в "Методических рекомендациях..." [3] для использования при подсчете запасов нефти и газа и эксплуатировавшаяся как самостоятельно, так и в составе систем обработки ГИС-Подсчет и LogTools. В ходе дальнейших работ для обработки в нее было включено большинство отечественных зондов ЭК и ЭМК, она подключена к программной оболочке LogWin и зарегистрирована Федераль-

ной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам в Реестре программ для ЭВМ под именем LogWin-ЭК [7]. Эта программа позволяет проводить поточечную обработку, а также реализовать все этапы попластовой обработки, предусмотренные изорезистивной методикой интерпретации [4]: оценку качества результатов измерений зондами ЭК и ЭМК с уточнением удельного электрического сопротивления (УЭС) промысловой жидкости (ПЖ) и определение электрических параметров пластов.

С помощью программы LogWin-ЭК обрабатываются диаграммы зондов ЭК (градиент- и потенциал-зонды (ГЗ, ПЗ), зонды бокового каротажа (БК)) аппаратуры АБКТ, ЭК-1, БКС-2, ЭК-73 (в модификациях П, ПЛ, ПТ), БК-35, БК-3/5-А, аппаратуры БК-79 ООО “Нефтегазгеофизика” (всех модификаций), ЭК-76Ж, ЭК-42Ж, К1А-723-М; зондов ЭМК аппаратуры АИК-4, ПИК-1, ПИК-1М, ПИК-2, ПИК-100, АИК-М, АИК-5, ИКП, АИК-36, АИК-42, ИКЗ-1, ИКЗ-2, ИКЗ-2/40, ИКЗП, ИКЗ-Н, ЗИК-45, 4ИК-45, 5ИК, Э-3М, Э-6, К1А-723-М, ЭКМА-90Г, ВИКИЗ, ВЭМКЗ.

Программа эксплуатируется в тресте “Сургутнефтегазгеофизика”, ОАО “Когалымнефтегазгеофизика”, КогалымНИПИнефть, “Балканнефтегазгеофизика” (Туркмения), УМППНИПИнефть, ОАО НПП “ГЕРС”, ПоморГЕРС, Поморнефтегазгеофизика, ООО “ЦНИП ГИС”, ООО “Нефтегазгеофизика”, НПЦ “Тверьгеофизика” и других организациях.

Определяемые параметры и интерпретационные модели, используемые на различных этапах обработки, представлены в табл. 1.

Решение задачи определения геоэлектрических характеристик разреза производится методом поиска минимума функции невязки расчетных и фактических отсчетов. Невязки – это расхождения фактических и расчетных значений отсчетов, нормированные на предполагаемые погрешности измерений. Во всех процедурах количественной обработки по умолчанию предполагается, что обрабатываемые данные всех зондов могут иметь независимые по зондам случайные погрешности мультипликативного и аддитивного характера. В программе по умолчанию принято, что мультипликативная часть случайной погрешности для зондов ГЗ, ПЗ, БК составляет 10% величины обрабатываемого сигнала, для зондов ИК и ВИКИЗ – 5%; аддитивная для зондов ГЗ, ПЗ, БК – 0,3 Ом·м, для зондов ИК – 5 мСм/м и для зондов ВИКИЗ – 0,5 град. Выбор значений параметров, описывающих модель погрешностей измерений, отражает как точность

Таблица 1

Интерпретационные модели и определяемые параметры

Процедура обработки	Интерпретационная модель	Определяемые параметры
Оценка качества по опорным пластиам ($N \geq 3$, $H \geq 3,0$ м)	Одиночный пласт со скважиной в однородных вмещающих породах: анизотропный пласт без зоны проникновения пласт с зоной проникновения	Аддитивные и мультипликативные погрешности измерений всеми зондами, УЭС ПЖ (ρ_c). УЭС пласта (ρ_n), коэффициент анизотропии (λ_n). ρ_n , контрастность проникновения ($\rho_{пз}/\rho_n$)
Поточечная обработка данных одиночных зондов	Пласт неограниченной толщины со скважиной без зоны проникновения	Кажущиеся сопротивления по зондам, исправленные за влияние скважины
Поточечная обработка данных комплексов зондов ИК, ВИКИЗ, БМК; 2БК, БМК	Пласт неограниченной толщины со скважиной и с зоной проникновения	ρ_n , УЭС промытой зоны ($\rho_{пз}$), относительный диаметр зоны проникновения (D/d)
Попластовая обработка данных комплекса зондов при $H \geq 0,8$ м	Одиночный пласт со скважиной в однородных вмещающих породах: анизотропный пласт без зоны проникновения пласт с зоной проникновения	ρ_n , λ_n ρ_n , $\rho_{пз}$, D/d

измерений зондами [5, 8, 9], так и вклад от несоответствия принятой интерпретационной модели реальной среде. При необходимости эти параметры могут изменяться интерпретатором.

Поскольку явное использование процедур решения прямых задач (особенно для зондов БК, при расчете показаний которых необходимо моделировать объемные электроды) в процессе поиска решения приводит к неприемлемо большим временным затратам (до нескольких десятков минут), применен метод получения решений прямых задач путем интерполирования по базисному набору заранее рассчитанных и хранящихся решений [11]. При расчетах этого набора реше-

ний использован метод матричной прогонки коэффициентов Фурье [2], обобщенный на решение прямых задач для всех обрабатываемых зондов ЭК и ЭМК.

По сложившейся традиции подход с использованием хранимого базисного набора решений иногда ошибочно считают “палеточным”. В данном случае это неверно, поскольку замена процедуры явного решения прямой задачи на процедуру получения этого решения путем интерполирования не содержит иных источников погрешностей, кроме погрешностей интерполирования. В частности, отсутствует процедура последовательного введения поправок, свойственная именно “палеточным” методам. Например, при “ручной” поплавовой обработке часто сначала вводится поправка за влияние вмещающих пород (в предположении об отсутствии зоны проникновения). Затем по исправленным таким образом отсчетам зондов в рамках модели пласта неограниченной толщины с зоной проникновения производится определение геоэлектрических параметров разреза. Такой последовательный учет влияния вмещающих пород и зоны проникновения вносит дополнительные погрешности в получаемые решения. В описываемой программе этого нет, поскольку в ней явно используются решения для модели пласта ограниченной мощности с зоной проникновения.

Во всех процедурах поплавовой и поточечной обработки согласованно используются выбранные источники данных о диаметре скважины и УЭС ПЖ (отсчеты с диаграмм каверномера и резистивиметра или введенные интерпретатором априорные значения). При использовании априорных данных об УЭС ПЖ возможен автоматический учет влияния геотермического градиента.

В процедурах поплавовой обработки одновременно могут использоваться до 20 зондов.

Данные, характеризующие область работоспособности программы, представлены в табл. 2.

Оценка качества

Заключается в выявлении, оценке величины и учете систематических погрешностей мультипликативного (искажения масштабов) и аддитивного (сдвиги нулевых линий записей) характера в данных зондов ЭК и ЭМК и в уточнении УЭС ПЖ. Проводится по результа-

Таблица 2

Область работоспособности программы

Параметр	Область изменения параметра	Примечание
Диаметр скважины УЭС ПЖ	$8 \text{ см} \leq d \leq 36 \text{ см}$ $\rho_c \geq 0,02 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	
УЭС пласта	$0,1 \leq \rho_n/\rho_c \leq 16\,000$ $0,25 \leq \rho_n \leq 1024 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}$ $0,1 \leq \rho_n/\rho_c \leq 1000\,000$	При использовании ИК, ВИКИЗ При поточечной обработке БК
УЭС промытой зоны	$4 \leq \rho_{пз}/\rho_c \leq 512$ $0,25 \leq \rho_{пз} \leq 1024 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}$	При использовании ИК, ВИКИЗ
УЭС вмещающих пород	$1 \leq \rho_{вм}/\rho_c \leq 1000$ $0,25 \leq \rho_{вм} \leq 1024 \text{ (Ом}\cdot\text{м)}$	При использовании ИК, ВИКИЗ
Контрастность проникновения Относительный диаметр зоны проникновения Коэффициент анизотропии в пластах без зоны проникновения	$1/32 \leq \rho_{пз}/\rho_n \leq 32$ $1 \leq D/d \leq 16$ $1 \leq \lambda_n \leq 4$	
Фиксируемые параметры модели зоны проникновения	Коэффициент анизотропии $\lambda_n = \lambda_{пз} = 1,1$ Параметр радиальной неоднородности $\eta = 0,25$	[4]
Варьируемые параметры модели пласта без проникновения	Относительная диэлектрическая проницаемость пласта $1 \leq \varepsilon \leq 60$	При попластовой обработке

там совместной обработки результатов измерений всеми зондами одновременно в нескольких (не менее 3) опорных пластах [1]. В качестве опорных пластов могут использоваться пласты мощностью не

менее 3,0 м без проникновения или с неглубоким повышающим проникновением ПЖ. Предусмотрена возможность учета влияния относительной диэлектрической проницаемости пласта в неколлекторах (например, глинах) на показания зондов ВИКИЗ.

Решение задачи производится методом поиска минимума функции невязки расчетных и фактических отсчетов по электрическим параметрам всех выбранных опорных пластов и УЭС ПЖ. Кроме того, интерпретатор может включать в процедуру поиска минимума как неизвестные систематические погрешности измерений зондами: искажения масштабов и (или) сдвиги нулевых линий записей. При таком подходе процедура оценки качества является многоэтапной интерактивной процедурой, целевой установкой которой является поиск систематических погрешностей измерений у минимального числа зондов, наличием которых можно объяснить существенное расхождение расчетных и фактических отсчетов.

На каждом этапе программой оценивается расхождение рассчитанных и фактических отсчетов с учетом полученных на данном этапе систематических погрешностей измерений. Если эти расхождения не выходят за рамки предположений о погрешностях измерений (невязки, нормированные на предполагаемые погрешности измерений, не превосходят по модулю 1), процедура может считаться завершенной. В противном случае набор зондов, в показаниях которых предполагается наличие систематических погрешностей, необходимо изменить, стремясь к минимизации этого набора зондов.

Результатом работы являются величины систематических погрешностей измерений и уточненное значение УЭС ПЖ, в соответствии с которыми интерпретатор может при необходимости скорректировать соответствующие диаграммы.

Для упрощения анализа результатов оценки качества в программе реализован просмотр корректировочных графиков [4], которые строятся программой отдельно для каждого зонда. Пример корректировочного графика приведен на рис. 1.

По осям графиков откладываются координаты фактических и расчетных отсчетов в опорных пластах. Признаком наличия систематических погрешностей измерений является закономерное отклонение нанесенных на график отсчетов от биссектрисы, то есть систематическое поведение невязок. По результатам расчетов на график наносятся собственно корректировочная прямая и доверительная область

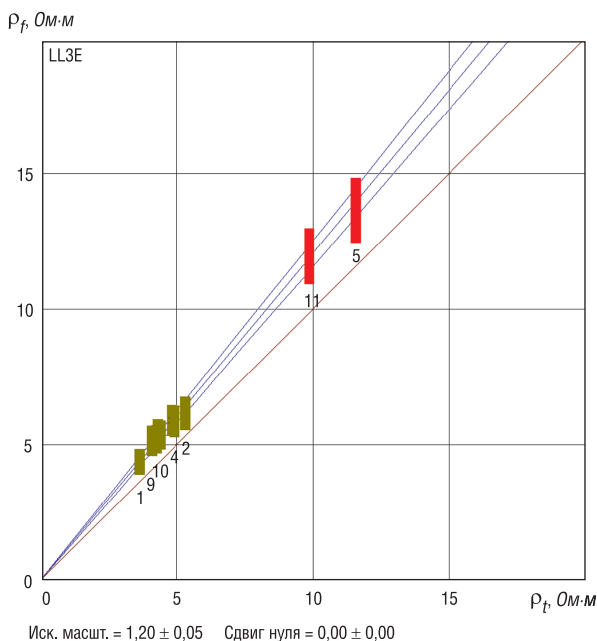


Рис. 1. Корректировочный график, построенный по результатам оценки качества

для отсчетов [10], ограниченная двумя кривыми, расположенными симметрично относительно корректировочной прямой. Параметры доверительной области вычисляются исходя из полученных в программе оценок неопределенности мультипликативной и аддитивной систематических погрешностей измерений и коэффициента корреляции между ними. Выход отсчета за границы доверительной области, возможно, является признаком большой случайной погрешности в величине этого отсчета.

Кроме основной процедуры оценки качества, разработана упрощенная процедура оценки сдвигов нулевых линий записей для зондов ИК и ВИКИЗ по одному непроницаемому однородному интервалу разреза, предпочтительно высокого сопротивления. Она может использоваться при отсутствии достаточного количества опорных пластин.

Поточечная обработка

Поточечная обработка, реализованная в программе, может проводиться как для отдельных зондов, так и для многозондовых комплексов.

Обработка диаграмм отдельных зондов заключается во введении в показания зондов поправок за скважину (ГЗ, ПЗ, БК, ИК, ВИКИЗ), скин-эффект (ИК), вмещающие породы (ИК-фильтрация) и в переводе результатов в единицы УЭС (ИК, ВИКИЗ). Результат обработки каждой выбранной диаграммы (кажущееся сопротивление, исправленное за влияние скважины) получает самостоятельное имя. Для преодоления неоднозначности, существующей при переходе от кажущейся проводимости среды к ее УЭС при высоких проводимостях среды, поправка за скин-эффект в активные компоненты показаний длинных зондов ИК может вводиться с учетом соответствующих реактивных компонент показаний. Это производится в том случае, если для обработки одновременно выбраны диаграммы активной и реактивной компоненты сигнала.

Обработка данных многозондовых комплексов ИК, ВИКИЗ, БМК и 2БК, БМК с учетом зоны проникновения заключается в устранении влияния вмещающих пород с помощью процедуры цифровой фильтрации (ИК) и поточечном определении электрических параметров разреза с применением интерпретационной модели пласта неограниченной толщины. Для обработки используются данные всех выбранных интерпретатором зондов ИК, ВИКИЗ, БМК (при этом необходимо наличие не менее 4 диаграмм ИК, ВИКИЗ) или 2БК, БМК.

Поточечная обработка, кроме получения оценок УЭС разреза по каждому из зондов, дает возможность визуальной оценки качества диаграмм и выделения пластов для попластовой обработки, в частности, выделения пластов с зоной проникновения. В процедуре выделения пластов с зоной проникновения после поточечной обработки могут с успехом использоваться и диаграммы градиент-зондов. Результаты поточечной обработки приведены на рис. 2.

Попластовая обработка

Поиск минимума функции невязки ведется посредством подбора электрических параметров пластов. В пластах без зоны проникновения это УЭС пласта и значение коэффициента анизотропии; в плас-

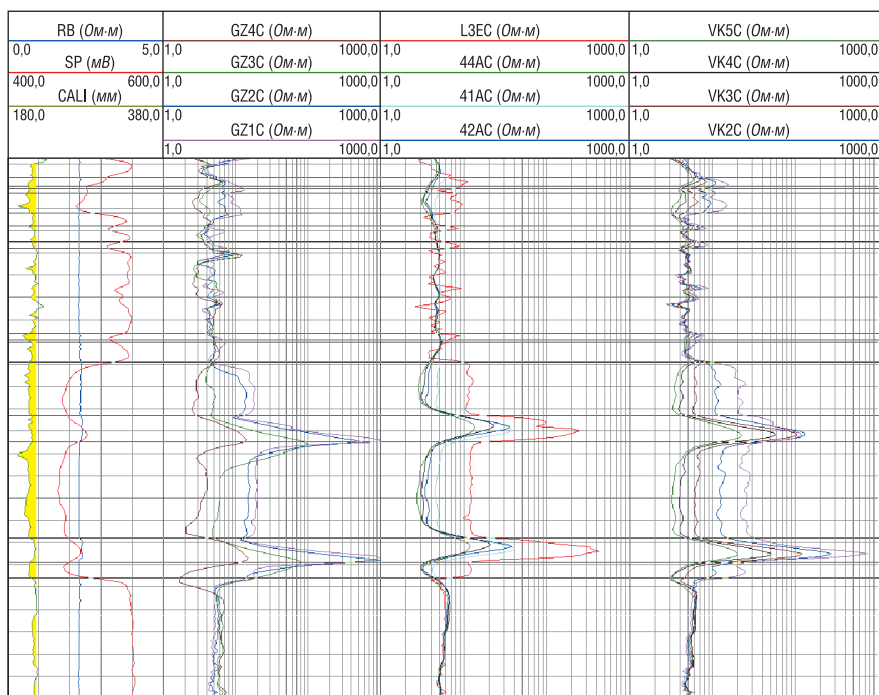
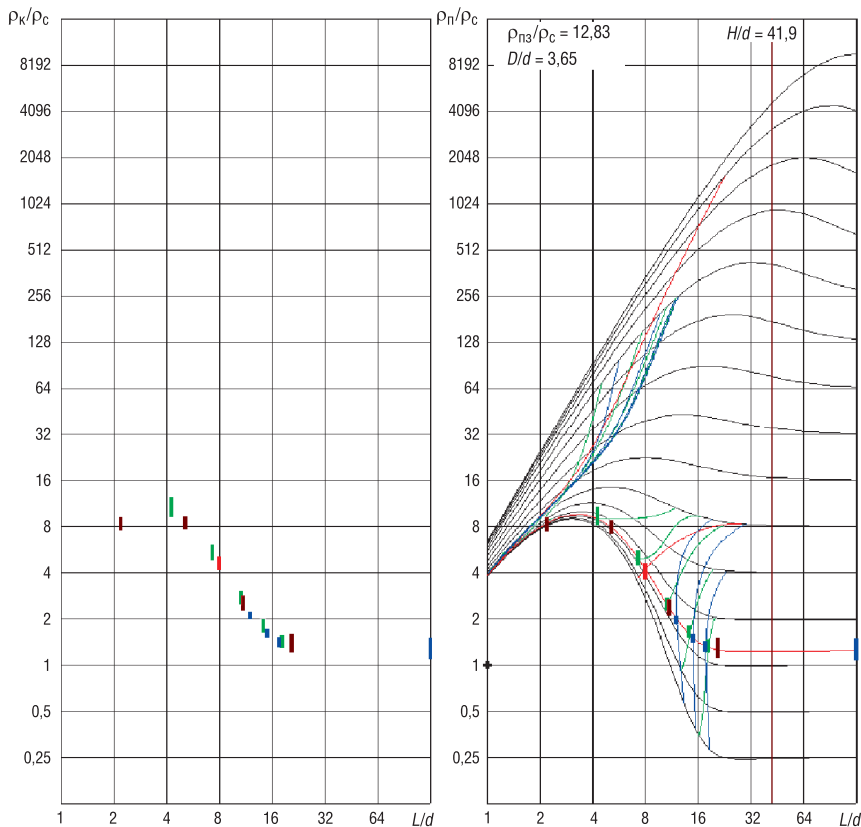


Рис. 2. Пример результатов поточечной обработки

тах с проникновением – УЭС пласта, УЭС промытой зоны, относительный диаметр зоны проникновения. В программе реализована возможность явного задания типа пласта (без проникновения, с проникновением) или автоматического выбора типа пласта программой путем сопоставления невязок решений при задании типа пласта “неопределенный”. Для найденного решения производятся оценки вероятных погрешностей определения полученных параметров [6].

Вся информация, необходимая для анализа решения, выводится в табличной форме: отсчеты, снятые в пласте и во вмещающих породах, расчетные показания зондов, невязки, нормированные на предполагаемые погрешности измерений. Кроме просмотра решения в табличной форме, реализован просмотр решения в виде комплексной изорезистивной палетки зондирования (рис. 3). Левая часть изображения соот-

ветствует пласту ограниченной мощности, правая – результатам, приведенным к пласту бесконечной мощности. Фактические отсчеты отображаются в виде отрезков, размеры которых соответствуют предпо-



Скважина: Вачимское-RUSSIA-136P

Пласт: 2149,0–2157,6 м

Параметры модели: $H = 8,6$ м; $\rho_c = 2,301$ Ом-м; $dc = 0,21$ м; $\rho_n = 3,0$ Ом-м; $\rho_{nz} = 29,5$ Ом-м; $D/d = 3,65$

Фактические отсчеты: ■ IK1 6,90 град; ■ IK2 9,73 град; ■ IK3 14,72 град; ■ IK4 18,71 град; ■ IK5 21,60 град;

■ GZ1 19,10 Ом-м; ■ GZ2 19,42 Ом-м; ■ GZ3 5,80 Ом-м; ■ GZ4 3,20 Ом-м; ■ LL3E 10,60 Ом-м;

■ IC1A 181,20 мСм/м; ■ IC2A 205,30 мСм/м; ■ IC3A 192,84 мСм/м; ■ IC4A 134,77 мСм/м

Рис. 3. Графическое представление результатов попластовой обработки данных комплекса из 5 зондов ВИКИЗ, 4 градиент-зондов, зонда БК, 4 зондов ИК

лагаемым погрешностям во входных данных. Абсциссы отсчетов градиент-зондов определяются длинами этих зондов. Абсциссы отсчетов всех остальных зондов имеют абсциссу пересечения их изорезист с расчетной кривой зондирования идеальными градиент-зондами, изображенной в виде непрерывной линии красного цвета. (Изорезиста зонда – геометрическое место точек на палетке, для которых показания зонда, исправленные за влияние скважины, в единицах УЭС равны значениям на кривых зондирования идеальными градиент-зондами.)

Заключение

Работа программы LogWin-ЭК основана на численно точных решениях прямых задач для модели одиночного пласта с зоной проникновения.

Программой количественно обрабатываются диаграммы свыше 100 зондов.

Широкий диапазон технических параметров скважины и искомых электрических параметров разреза, заложенные в программу LogWin-ЭК, позволяют эффективно использовать ее для обработки данных ГИС в большинстве ситуаций, встречающихся на практике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бриченко И. П., Малинин А. В., Пантюхин В. А., Чаадаев Е. В., Шеин Ю. Л. Учет влияния систематических погрешностей измерений при интерпретации данных зондов электрического и электромагнитного каротажа // Экспресс-информация. Разведочная геофизика. Отеч. произв. опыт. М.: ВИЭМС. 1986. Вып. 2. С. 12–17.
2. Друскин В. Л. Прямой метод расчета стационарных полей для одного класса моделей, принятых в геофизике // Геология и разведка. Рук. деп. в ВИНИТИ от 1.09.83, № 5099-83. 14 с.
3. Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом. Москва–Тверь: ВНИГНИ, НПЦ “Тверьгеофизика”. 2003. 130 с.
4. Методические указания по комплексной интерпретации данных БКЗ, БК, ИК (с комплектом палеток) / Е. В. Чаадаев, И. П. Бриченко, А. А. Левченко, А. В. Малинин, В. А. Пантюхин / Науч. ред. А. В. Ручкин. Калинин: НПО “Союзпромгеофизика”. 1990. 76 с.
5. Методическое руководство по проведению индукционного каротажа аппаратурой 4ИК и первичной обработке данных. Тверь: ООО “Нефтегазгеофизика”. 2005. 39 с.

6. Рудяк Б. В., Шеин Ю. Л. Оценка достоверности определения электрических параметров пластов-коллекторов // Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. М. 1989. № 10. С. 105–110.
7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005610807.
8. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах // РД 153-39.0-072-01. М. 2001. 271 с.
9. Технология исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство / Ред. М. И. Эпов, Ю. Н. Антонов. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, Изд. СО РАН. 2000. 121 с.
10. Шеин Ю. Л. Неоднозначность решений при интерпретации данных БКЗ, БК, ИК // Оперативная интерпретация материалов ГИС: состояние, проблемы. Тверь: НПО “Союзпромгеофизика”. 1991. С. 102–107.
11. Шеин Ю. Л., Пантюхин В. А., Кузьмичев О. Б. Алгоритмы моделирования показаний зондов БКЗ, БК, ИК в пластах с зоной проникновения // Автоматизированная обработка данных геофизических и геолого-технологических исследований нефтегазоразведочных скважин и подсчет запасов нефти и газа с применением ЭВМ (сб. научных трудов). Калинин: НПО “Союзпромгеофизика”. 1989. С. 75–81.