



**VI КИТАЙСКО-РОССИЙСКИЙ СИМПОЗИУМ
ПО ПРОМЫСЛОВОЙ ГЕОФИЗИКЕ
12-15 АВГУСТА 2010 Г**



**THE SIXTH CHINESE-RUSSIAN SCIENTIFIC SYMPOSIUM
ON PETROLEUM GEOPHYSICS
12-15 August 2010**

МАТЕРИАЛЫ СИМПОЗИУМА SYMPOSIUM MATERIALS

**Китай, г. Циндао - 2010
China, Qingdao - 2010**

УДК 550.832
ББК 26.2
Ш 51

**ШЕСТОЙ КИТАЙСКО-РОССИЙСКИЙ СИМПОЗИУМ ПО ПРОМЫСЛОВОЙ
ГЕОФИЗИКЕ, Г. ЦИНДАО, 12-15 АВГУСТА 2010 г.**

Материалы симпозиума. Уфа: изд-во «НПФ «Геофизика», 2010г., с. 259, ил. 217. ISBN 5-901472-23-1.

Представлены полные тексты докладов научного симпозиума по промышленной геофизике, состоявшегося 12-15 августа 2010 г. в Китае, в г. Циндао. Доклады российских участников приведены на русском и английском языках последовательно, доклады китайских участников опубликованы на русском языке, перевод осуществлен китайской стороной.

Освещаются вопросы современного состояния геофизических исследований нефтегазовых скважин в России и в Китае: новых методов, аппаратуры, технологий, методик обработки.

Книга представляет интерес для широкого круга специалистов нефтегазовой отрасли и студентов профильных ВУЗов.

Издание подготовлено к печати группой научно-технической информации и рекламно-издательской деятельности ОАО НПФ «Геофизика» по решению оргкомитета российской стороны.

УДК 550.832
ББК 26.2

ISBN 5-901472-23-1

© ООО ИМЦ ОАО НПФ «Геофизика»

НОВЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТУРНЫЙ КОМПЛЕКС ГЕОФИЗИЧЕСКОГО КАРОТАЖА СКЛ

Эпов М.И., Каюров К.Н., Еремин В.Н., Петров А.Н., Волканин Ю.М., Киселёв В.В., Сухорукова К.В., Глинских В.Н., Соболев А.Ю., Байкова М.А. (ЗАО НППГА «Луч», г. Новосибирск, Россия)

ВВЕДЕНИЕ

Новая совместная разработка Института нефтегазовой геологии и геофизики Сибирского отделения Российской академии наук и Научно-производственного предприятия геофизической аппаратуры «Луч» – программно-аппаратурный комплекс СКЛ в жестком корпусе, предназначенный для каротажа в вертикальных и наклонных скважинах. В одной связке представлен набор геофизических методов (электрический и электромагнитный каротаж, резистивиметрия, потенциал самополяризации, гамма- и нейтронный каротаж, термометрия, инклинометрия). Этот комплекс необходим для расчленения геологического разреза, определения литологического состава, оценки пористости и флюидонасыщения коллекторов.

Как известно, с увеличением глубины строение коллекторов усложняется. Уплотнение и преобразование пород сопровождается их глинизацией и пиритизацией, а также сменой типа пористости с межзерновой на трещинную. При бурении всё чаще применяются высокопроводящие биополимерные буровые растворы. В этих условиях понижается эффективность традиционных геофизических комплексов, предназначенных для исследования мощных однородных терригенных коллекторов.

К настоящему времени разработаны новые методики оценки фильтрационно-емкостных параметров коллектора по распределению удельного электрического сопротивления (УЭС) в зоне проникновения, обусловленному фильтрацией бурового раствора. Радиальный профиль УЭС в зоне проникновения определяется путем инверсии сигналов высокочастотного электромагнитного каротажа (ВЭМКЗ), бокового электрического каротажного зондирования (БКЗ) и бокового каротажа (БК). Накопленный опыт показал, что при раздельной инверсии данных этих методов могут получаться не только эквивалентные, но иногда и противоречащие друг другу геоэлектрические модели. Совместная инверсия во многих случаях снимает это противоречие. На практике между измерениями БКЗ и ВЭМКЗ проходит значительное время, и зона проникновения может существенно измениться. Совместная инверсия одновременно измеренных данных БКЗ, ВЭМКЗ и БК, реализованная в СКЛ, снимает эту проблему и позволяет получить согласованный профиль УЭС.

Расширение набора измеряемых характеристик (относительные и абсолютные амплитуды) ВЭМКЗ повышает эффективность инверсии в сложных разрезах. Прежде всего, становится возможным оценивать относительную диэлектрическую проницаемость (ОДП) пород. Использование всего набора данных устраняет неоднозначность интерпретации в областях с высоким электрическим контрастом.

Преимущества применения СКЛ: уменьшается число спуско-подъемных операций; исключается необходимость взаимной увязки по глубине диаграмм разных методов; открывается возможность измерений на постоянном токе (БКЗ, БК) не только в вертикальных, но и в наклонных и горизонтальных скважинах.

Тестовые измерения были выполнены в декабре 2007 г. в одной из скважин Колтогорского

месторождения (Западная Сибирь). Начиная с июля 2009 года, в промышленном эксплуатационном режиме выполнены измерения в 28-ми скважинах на территории Широтного Приобья.

АППАРАТУРА СКЛ

В состав кабельного комплекса СКЛ (рис. 1) входят модули электрических (БКЗ, БК и ПС) и электромагнитных (ВЭМКЗ-20) методов, резистивиметрии, а также модули ННКт, ГК и инклинометра. По предложению одного из заказчиков в комплекс включён треххвосточный зонд ИК. В скважине измеряется около 50-ти физических характеристик. Все модули выполнены в жестком корпусе с карданными соединениями отдельных частей. Число модулей определяется решаемой геологической задачей. При этом учитывается их совместимость и расположение точек записи.

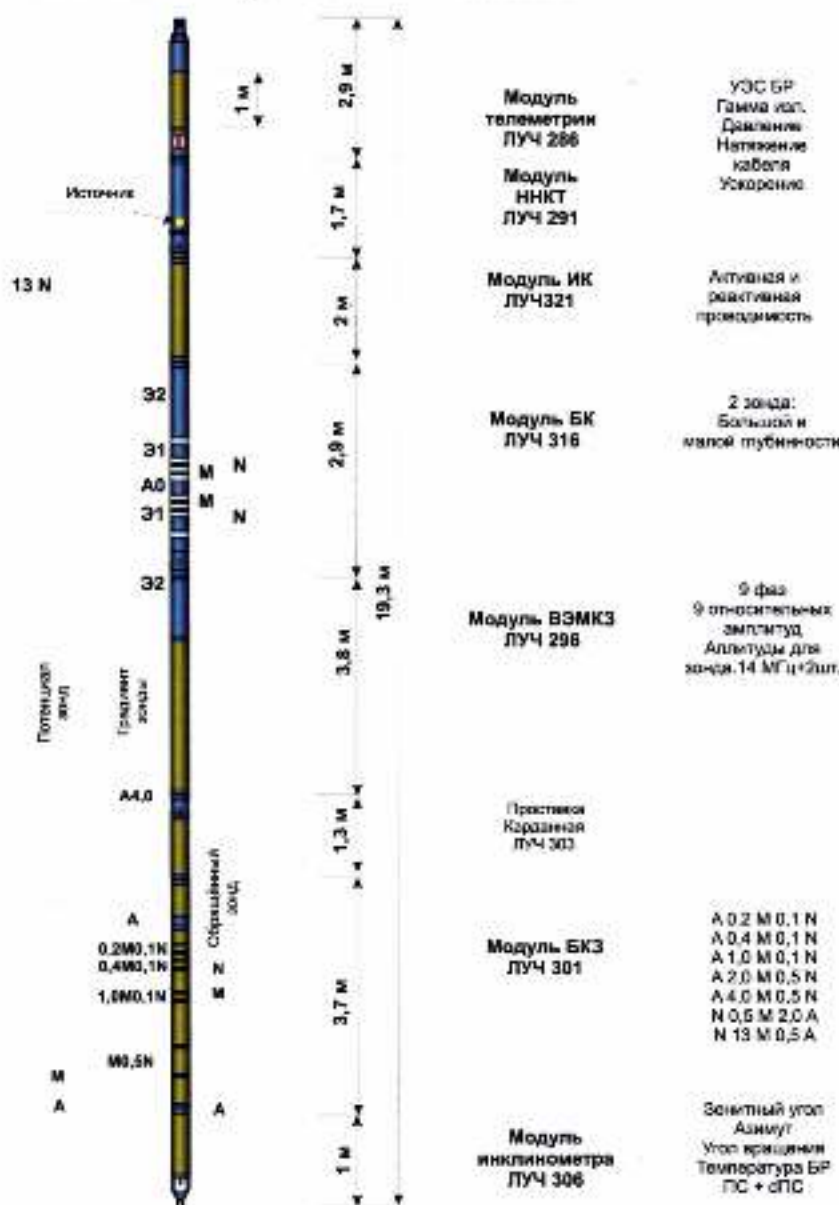


Рис. 1. Комплекс СКЛ

Модуль ВЭМКЗ-20 состоит из 9-ти высокочастотных индукционных зондов длиной от 0.5 до 2 м. Зонды трехкатушечные, несимметричные, изопараметрические. Измеряется разность фаз и отношение амплитуд сигналов в приемных катушках, а также две амплитуды в катушках короткого зонда [1–3].

Комплекс построен на модульном принципе и включает:

- кабельную телеметрию, согласованную с наиболее распространенными каротажными станциями;
- единый общий модуль телеметрии (расположен сверху) со стандартным стыковочным узлом;
- транзитные линии связи и питания;
- межмодульный интерфейс RS-485 с гальванической развязкой;
- унифицированные узлы с гибкими (в пределах 3—5°) соединениями;
- механические накидные гайки для соединения модулей;
- электрические соединения через разъем СН-47-7 (обеспечивает межмодульную гидростатическую развязку при аварийной разгерметизации отдельных модулей);
- электрическую изоляцию от корпусов общего провода, шасси и экранов;
- датчики натяжения кабеля и давления, акселерометр, расположенные в модуле телеметрии.

Модуль ВЭМКЗ находится между модулями БК и БКЗ. Его стальной охранный корпус является экранирующим электродом БК, а зондовая стеклопластиковая часть – электроизолятором для БКЗ. Модуль телеметрии одновременно выполняет как технологические функции, так и является блоком питания модулей БК и БКЗ. При этом его корпус используется в качестве электродов и изоляторов. В результате такой компоновки удалось совместить наиболее широко распространенные методы измерений в одной связке приемлемой длины (19 м). При этом точки записи большинства методов оказались сгруппированы у нижней концовки комплекса. Это обеспечивает минимальный размер «мёртвой зоны» у забоя скважины.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЧИСЛЕННОЙ ИНВЕРСИИ

EMF Pro – новая программная система интерпретации данных электрических и электромагнитных методов исследования в скважинах. Ее результат – геоэлектрическая модель и фокусированные кривые. В основе программы лежат алгоритмы совместного решения обратных задач.

Реализовано 3 уровня инверсии. Первый – вычисление кажущихся УЭС и ОДП для модели однородной среды с учетом скважины и эксцентриситета зонда. Второй – деконволюция, поплатовая разбивка и инверсия в рамках цилиндрически-слоистой модели. Третий – быстрая двумерная инверсия в классе моделей с набором цилиндрических и плоских границ с построением кусочно-однородной модели, а также фокусированных кривых на заданных расстояниях от стенки скважины.

В программе предусмотрен импорт данных из LAS-формата. Также реализована визуализация всех введенных в систему сигналов и их трансформаций. Визуализация основана на макетном представлении данных, принятом в интерпретационных системах ПРАЙМ, ГеоПоиск, СИАЛ-ГИС, Geo Office solver и др.

Все длительные вычисления выполняются в отдельном системном потоке. Это позволяет во время их выполнения работать с пользовательским интерфейсом. Алгоритмы групповых операций адаптированы для вычислений на многопроцессорных и многоядерных архитектурах. Система

реализована на языке C++ с помощью кросс-платформенной графической библиотеки Qt. Работает под управлением MS Windows, начиная с NT и выше.

Отдельные модули взаимодействуют через интерфейсы. Каждый модуль программной системы является независимым и состоит из программы, необходимых дополнительных файлов, данных локализации и пользовательской помощи. Общие интерфейсы объединены в библиотеки. Работа с данными каждого геофизического метода реализована в отдельном модуле. Это позволяет добавлять модули количественной инверсии как для новых геофизических методов, так и для новых приборов. Аналогичным образом организовано встраивание новых алгоритмов: фильтрации, псевдообращения, перепараметризации модели, решения прямых и обратных задач.

ЧИСЛЕННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ БКЗ И ВЭМКЗ

Совместное использование отношения амплитуд ΔA и разности фаз $\Delta \varphi$ повышает надежность оценки УЭС и его радиального профиля, а также позволяет оценивать величину ОДП.

На рис. 2 показан фрагмент практических диаграмм в песчано-глинистом разрезе (диаметр скважины - 0.216 м, УЭС бурового раствора - 1.8–1.9 Ом·м). Здесь же показаны диаграммы трансформаций сигналов ВЭМКЗ в кажущиеся УЭС (ρ_a) и ОДП (ϵ_a), а также фокусированные кривые для радиальных глубин 0.2, 0.35, 0.55, 0.85 и 1.35 м.

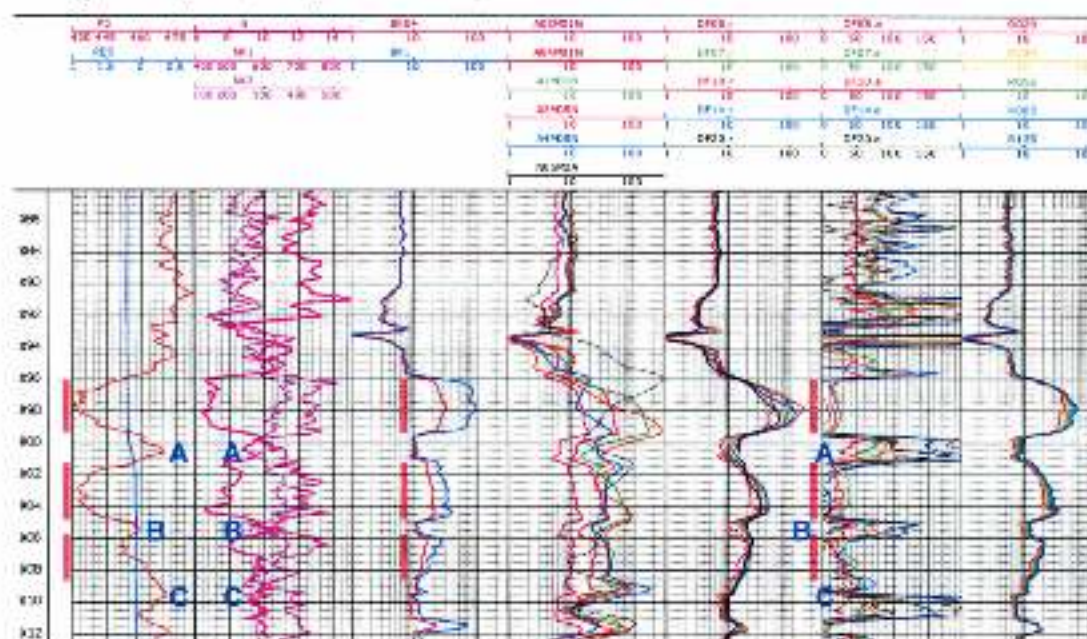


Рис. 2. Диаграммы (слева направо): ПС и резистивиметра; ГК и НКГТ; БК; БКЗ; ВЭМКЗ; диаграммы ρ_a и ϵ_a (зонды DF05, DF07, DF10, DF14 и DF20) и фокусированные кривые

Интервалы коллекторов хорошо выделяются по значениям ПС, ГК, бокового каротажа и ВЭМКЗ ($\times 96$ – $\times 99.5$, $\times 01$ – $\times 05$, $\times 06$ – $\times 09$ м). Все они характеризуются низкими значениями величины ϵ_a . При этом наименьшие значения ϵ_a соответствуют минимумам на диаграмме ПС и хорошо выделяют интервалы песчаников. Отметим, что увеличение глинистости (заметное по данным ПС и ГК) приводит к возрастанию ϵ_a , что особенно заметно на интервале $\times 06$ – $\times 10$ м. В глинистых интервалах (выше $\times 90$ м)

значения ε_k увеличиваются с уменьшением рабочей частоты от 50 единиц при 14 МГц до 100–150 при 0.875 МГц. Самыми высокими значениями ОДП (более 200) характеризуются интервалы пиритизации ($\times 90.5$ – $\times 94$ м), которые практически не выделяются на диаграммах других методов.

Наиболее точно границы коллекторов выделяются по диаграммам ρ_k (БК), ρ_k и ε_k (ВЭМКЗ). Отметим высокое разрешение в глинах диаграмм ρ_k . Глинистые прослои в интервалах А ($\times 99.5$ – $\times 01$ м), В ($\times 04.5$ – $\times 06$ м) отмечаются повышением ГК от 5 до 8 мкР/ч (А) и с 8 до 12 (Б), в интервале С такого возрастания не наблюдается. Сигналы ПС также увеличиваются: в интервале А с 450 до 470 мВ, В – с 450 до 460 мВ, С – с 480 до 470 мВ. В то же время точного определения границ глинистых пластов сделать нельзя из-за сглаженности диаграмм. Границы этих же интервалов очень четко выделяются по резкому увеличению значений ε_k .

Даже при использовании всего набора измерений на переменном токе не всегда удается достаточно точно определить УЭС прилегающей к стенке скважины зоны. Это же касается определения ОДП в пластах с низким УЭС. В этих случаях используется совместная инверсия данных на постоянном (БКЗ, БК) и переменном (ВЭМКЗ, ИК и резистивиметрия буровой жидкости) токе. Такая инверсия проводится, как правило, в рамках цилиндрически-слоистой модели с предварительной попластовой разбивкой. Полученная геоэлектрическая (УЭС, ОДП) модель используется как стартовая для уточнения в рамках двумерной инверсии.

Как известно, в процессе бурения в коллекторе формируется прискважинная зона, обусловленная проникновением фильтрата бурового раствора. По профилю УЭС в этой зоне с помощью гидродинамического моделирования можно оценить параметры коллектора [4]. Поэтому важно как можно точнее восстановить этот радиальный профиль. При инверсии данных одного из методов значения ее параметров обычно принадлежат широкой области эквивалентности [5]. Разная чувствительность к УЭС и ОДП, разные пространственные разрешения и глубинность методов БКЗ, БК и ВЭМКЗ значительно уменьшают эту область в пространстве геоэлектрических параметров.

На рис. 3 показаны диаграммы СКП в нефтенасыщенном коллекторе ($\times 75.5$ – $\times 79.5$ м).

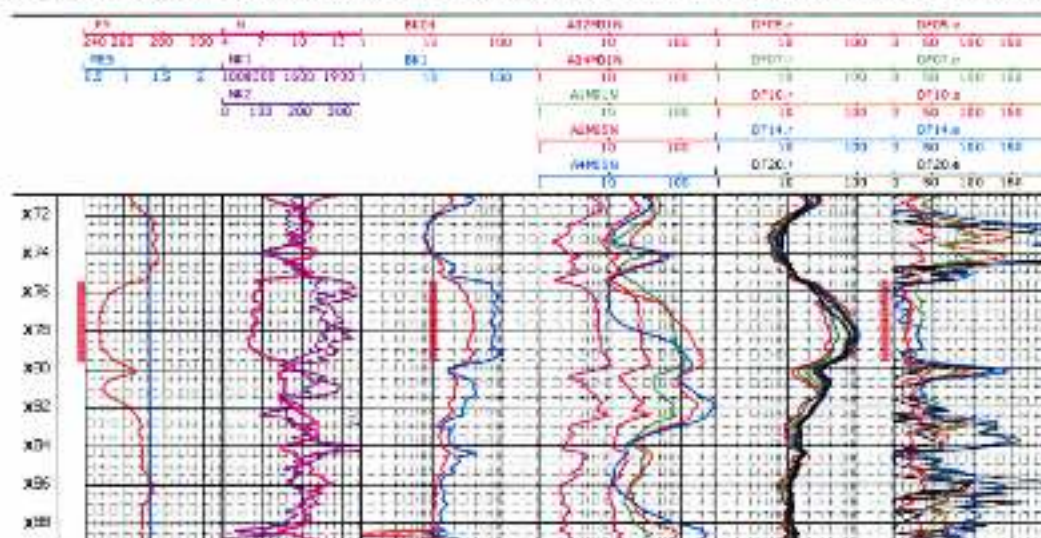


Рис. 3. Практические диаграммы ПС; ГК и ННКТ; БК (ρ_k); БКЗ (ρ_k); ВЭМКЗ (ρ_k , ε_k).

На рис. 4–6 приведены примеры инверсии данных БКЗ, данных ВЭМКЗ и совместно БКЗ+ВЭМКЗ в интервале коллектора. В левой части рис. 4 показаны кривые БКЗ (ρ_{Σ}). Справа – подобранная геоэлектрическая модель. Она приведена в виде таблицы значений параметров и радиального распределения УЭС (внизу). Синтетические сигналы показаны пунктиром на кривых зондирования. В результате инверсии получена модель слабопроницаемого пласта с УЭС 93 Ом·м и небольшим понижающим проникновением (толщина 0.23 м, УЭС 47.3 Ом·м).

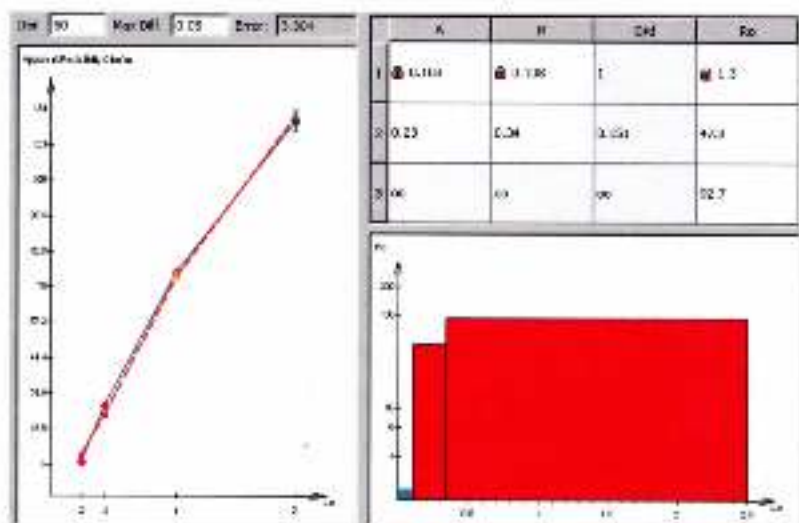


Рис. 4. Результаты инверсии кривой БКЗ

В левой части рис. 5 показаны кривые ВЭМКЗ (вверху – $\Delta\varphi$ и внизу – ΔA , в кажущихся сопротивлениях) с погрешностями измерения (вертикальные отрезки). Справа – подобранная геоэлектрическая модель с понижающей зоной проникновения (толщина 0.29 м и УЭС 27.7 Ом·м). УЭС пласта 95 Ом·м.

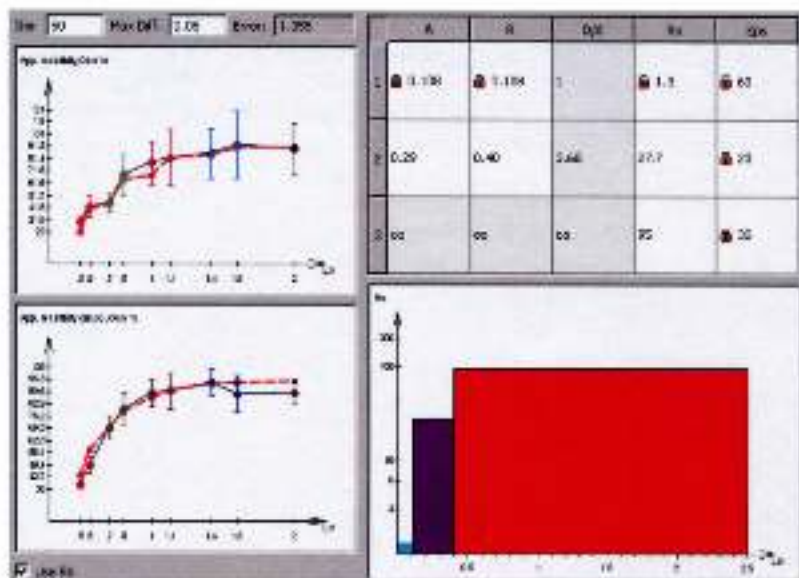


Рис. 5. Результаты инверсии кривой ВЭМКЗ

В левой части рис. 6 в кажущихся сопротивлениях показаны кривые ВЭМКЗ ($\Delta\varphi$ и ΔA , вверху, вертикальные отрезки – погрешности измерения) и БКЗ (внизу). В подобранной геоэлектрической модели изменяются параметры понижающей зоны проникновения – увеличивается толщина (0.37 м) и уточняется УЭС (49.8 Ом·м).

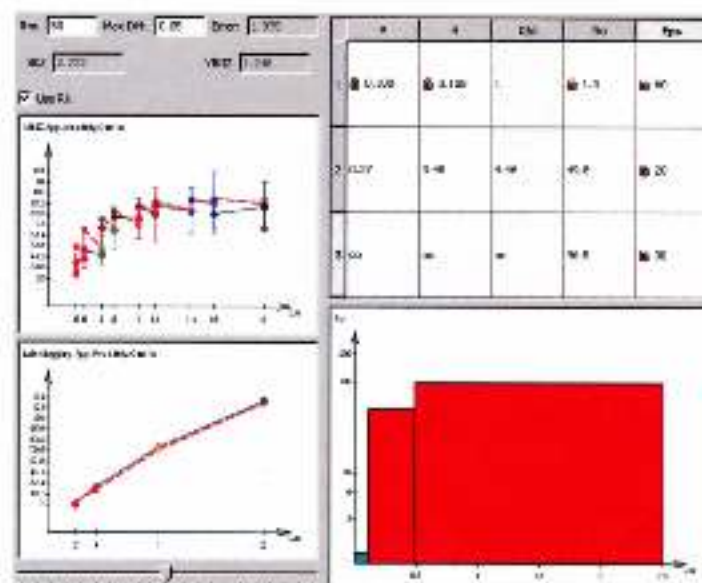


Рис. 6. Результаты совместной инверсии кривых БКЗ и ВЭМКЗ

Впервые получены по практическим данным ВЭМКЗ диаграммы ϵ_s . Высокие значения ϵ_s (для длинных зондов – 80–100) в глинистых пластах (рис. 2) обусловлены их высокой поляризуемостью. Тот же порядок величины ϵ_s для глин и суглинков в диапазоне частот ВЭМКЗ приводится в других работах [6–7]. В проницаемых пластах ϵ_s по сигналам длинных зондов не определяется с достаточной точностью.

В мощных пластах преимущественно глинистого состава иногда отмечается сильное несовпадение кажущихся УЭС, определенных по БКЗ и по ВЭМКЗ. Одной из возможных причин этого может быть частотная дисперсия ОДП в диапазоне рабочих частот ВЭМКЗ. Возрастание значений ОДП с уменьшением частоты хорошо заметно на диаграммах ϵ_s в пластах глинистого и аргиллитового состава. Более точно частотную дисперсию ОДП можно оценить по комплексу БКЗ+ВЭМКЗ. Сначала по данным БКЗ строится омическая модель пласта. Затем в рамках построенной модели подбираются значения ОДП $\epsilon_{\text{эфф}}$ для каждой частоты. Полученные по практическим данным СКЛ частотные зависимости $\epsilon_{\text{эфф}}$ (рис. 8 слева) соответствуют данным [6], измеренным в лабораторной установке на образцах с разным содержанием глины (рис. 8, справа, черным цветом).

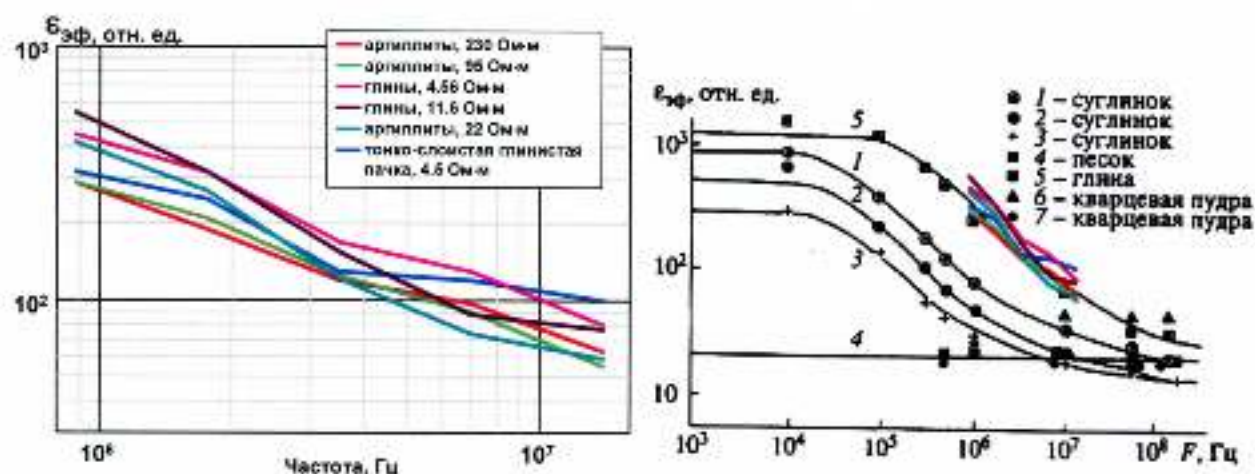


Рис. 8. Зависимость эффективной ОДП от частоты

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По комплексу измеряемых новым аппаратным комплексом СКЛ величин решаются как традиционные задачи разделения разреза на пласты, установление литологии и оценка насыщения, так и новые – уточнение строения измененной зоны по комплексу БК+БКЗ+ВЭМКЗ, оценка значения эффективной диэлектрической проницаемости и ее частотной дисперсии в диапазоне частот ВЭМКЗ.

Создана эффективная интерпретационная система EMF Pro для комплексной интерпретации сигналов электрического и высокочастотного электромагнитного методов каротажа, включенных в СКЛ.

Список использованных источников

1. Петров А.Н., Киселев В.В. [2004] Устройство для электромагнитного каротажа скважин. Патент РФ № 2230344. 10 с.: 2 ил. Бюлл. № 16.
2. Глинских В.Н., Эпов М.И. [2005] Анализ пространственной чувствительности относительных характеристик в задачах высокочастотного электромагнитного каротажа. *Геология и геофизика*. Т.46. № 11. С. 1168–1175.
3. Никитенко М.Н., Эпов М.И. [2008] Измерение относительной амплитуды магнитного поля зондами ВИКИЗ. *Каротажник*. № 9 (174). С. 21–35.
4. Ельцов И.Н., Эпов М.И., Кашеваров А.А. [2005] Новый системный подход к интерпретации данных ГИС и ГТИ на основе комплексных геофизических и гидродинамических моделей. *Технологии ТЭК*, №5. С.12–18.
5. Табаровский Л.А., Эпов М.И. [2006] Оценка разрешающей способности электромагнитных методов. *Геология и геофизика*. Т. 47, № 5. С.568–578.
6. Талалов А.Д., Даев Д.С. [1996] О структурном механизме частотной дисперсии электрических свойств гетерогенных горных пород. *Физика Земли*. № 8. С.56–66.
7. Anderson, B. I., Barber T. D., Luling, M. G., Rasmus J., Sen, P. N., Tabanou J. R., Haugland, S. M. [2007] Observations of large dielectric effects on LWD propagation-resistivity Logs. SPWLA 48th Annual Logging Symposium, June 3–6, Austin, TX. Paper BB.

SKL – A NEW SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX FOR GEOPHYSICAL LOGGING

Epov M.I., Kayurov K.N., Eremin V.N., Petrov A.N., Volkanin Y.M., Kiselev V.V., Sukhorukova K.V., Glinskikh V.N., Sobolev A.Y., Baykova M.A. (Scientific Production Enterprise of Geophysical Equipment «Looch»)

INTRODUCTION

A new joint development of the Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, and the Scientific and Production Enterprise of Geophysical Equipment "Looch" is SKL hardware-software complex in rugged housing designed to perform vertical and inclined boreholes logging. There is a set of geophysical methods in one bundle (Electrical and Electromagnetic Logging, Resistivity Logging, Spontaneous Potential (SP), Gamma-Ray and Neutron Logging, Temperature Logging, Directional Surveying). This complex is required to stratify the cross-section, to determine lithological composition, to estimate porosity and fluid saturation.

As is known, the greater the depth the more complicated the reservoir structure is. Compaction and transformations of rocks are accompanied by their argillization and pyritization, and also the type of porosity changes from intergranular to fracture one. Nowadays, highly conductive biopolymer drilling muds are used while drilling increasingly frequently. In the circumstances, the effectiveness of conventional equipment designed to perform surveying of thick uniform terrigenous reservoirs decreases.

To date, new techniques on how to evaluate the reservoir porosity and permeability properties from the resistivity distribution in the invasion zone resulting from drilling mud filtration are developed. The radial resistivity profile in the invasion zone is determined by means of the inversion of signals of High Frequency Electromagnetic Logging (VEMKZ), Lateral Electric Logging Sounding (BKZ), and Lateral Logging (BK). Experience has shown that when inversion data from these methods was obtained separately one can get not only equivalent, but sometimes thwarting one another geoelectric models. The combined inversion in many cases removes this contradiction. In practice, there is a significant time lag between the BKZ and VEMKZ measurements, and the invasion zone may change drastically. The combined inversion of the BKZ, VEMKZ and BK data measured simultaneously – that can be performed using SKL – eliminates this problem and allows to obtain coherent resistivity profile.

Increasing of the number of characteristics measured by VEMKZ (the relative and absolute amplitudes) raises the efficiency of inversion in composite cross-sections. First of all, it becomes possible to estimate Relative Dielectric Constant (RDC) of rocks. Using the whole data set eliminates the ambiguity of interpretation in areas with high electrical contrast.

Applying of SKL reduces the number of tripping operations, eliminates the need for mutual depth match of logs obtained using different techniques, opens up the possibility of direct current measurements (BKZ, BK) not only in vertical but also in directional and horizontal wells.

Test measurements were made in December 2007 in one of the wells of the Koltogorskoye field (Western Siberia). From July 2009, the measurements at industrial operating conditions were performed in 28 wells in the Ob latitude area.

SKL-HARDWARE

The SKL wireline complex (Fig. 1) consists of modules for providing electric (BKZ, BK and SP) and electromagnetic (VEMKZ-20) methods, Resistivity Logging, and also of Thermal Neutron-Neutron Logging (NNLT), Gamma-Ray Logging (Gamma) and Inclinator modules. At the suggestion of one of the customers, into the complex there was included three-coil induction logging (IL) sonde. In the borehole, there are nearly 50 physical characteristics measured. All modules have rugged housing, with the parts affixed by universal joints. The number of modules depends on current logging tool objective, concurrently taking into account their compatibility, and measuring point spacing.

VEMKZ-20 module consists of 9 high-frequency induction sondes, 0.5 m to 2 m long. The sondes are three-coil, asymmetrical, isoparametric. The measured parameters are phase difference and amplitude ratio of signals in the receiving coils, and also two amplitudes in the coils of the short sonde [1-3].

The complex consists of modules and includes the following:

- wireline telemetry applicable for the most commonly used well logging units;
- integrated general telemetry module (located at the top) with a standard connector assembly;
- communication and power supply trough circuits;
- RS-485 intermodule interface with galvanic isolation;
- modular components with flexible (within 3-5°) joints;
- mechanical backnuts for module junction;

- electrical connection per CH-47-7 connector (provides intermodule hydrostatic disjoining in the event of emergency depressurization of a module);
- electrical isolation of the common wire envelope, chassis and shield bodies;
- wire tension transducers, pressure sensors, accelerometer placed in the telemetry module.

VEMKZ module is mounted between the BK and BKZ modules. Its steel guard housing serves as shielding electrode for BK, and a fiberglass part of the sonde provides isolation for BKZ. The telemetry module performs technological functions, and also provides power supply for the BK and BKZ modules. At that, its housing is used as electrodes and insulators. As the result of such an assembling, the most common methods of measurement were combined in one tool of acceptable length (19 m). At the same time, measuring points for the most of methods appeared to be grouped at the lower tip of the complex. This provides a minimum sized dead zone downhole.

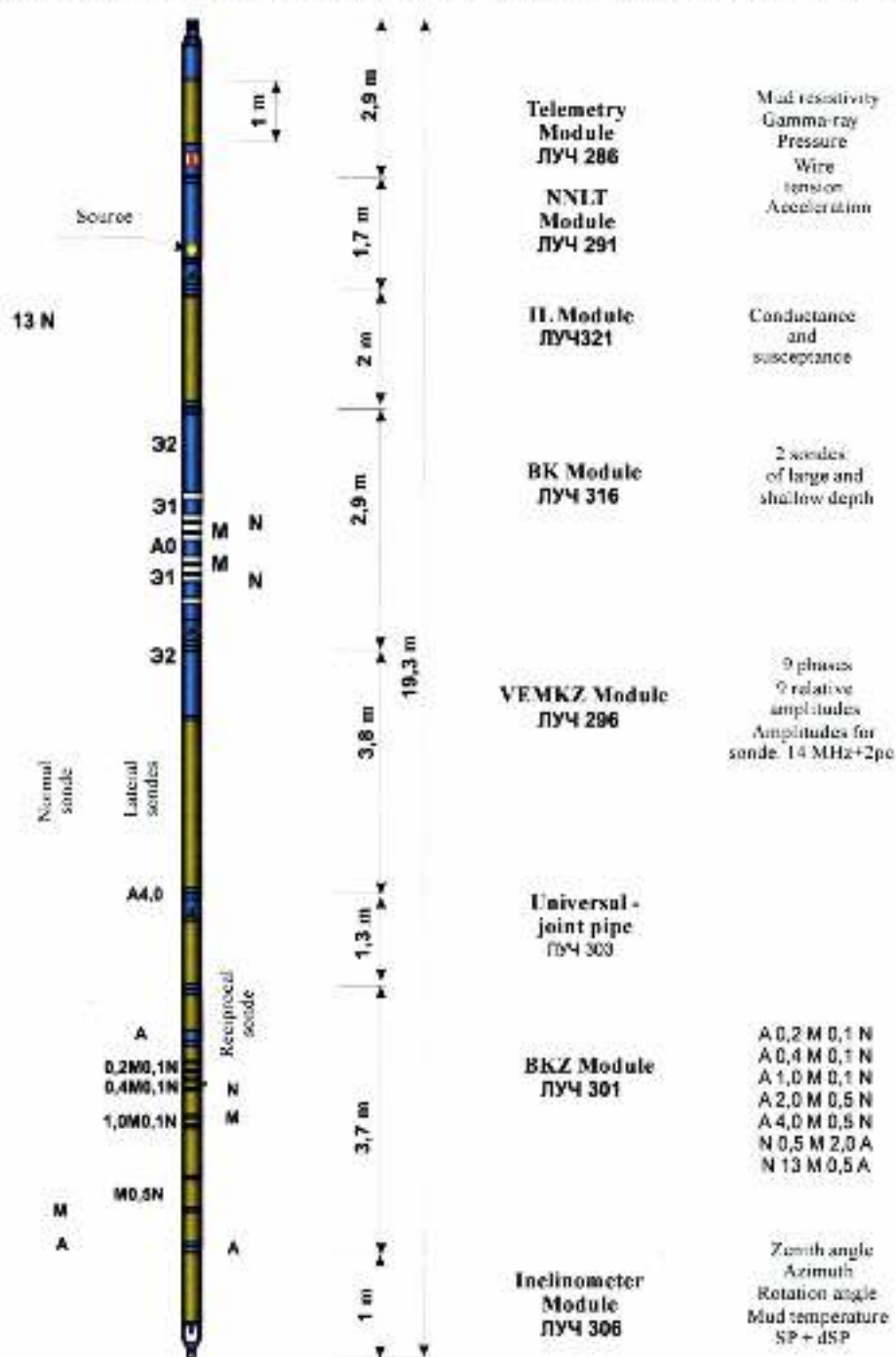


Fig. 1. The SKL Complex

COMPUTER-AIDED SYSTEM OF NUMERIC INVERSION

EMF PRO is a new software system designed to interpret data obtained by the electrical and electromagnetic surveying in the boreholes. At the output, there are geoelectric model and focused curves. The application is based on joint inversion algorithm.

There are three levels of inversion implemented. The first one is the calculation of apparent resistivity and the RDC for the homogeneous environment model adjusted for the borehole and the eccentricity of the sonde. The second level is deconvolution, division into layers, and inversion under cylindrical-layered model. The third one is instantaneous two-dimensional inversion in the class of the models with a set of cylindrical and plane boundaries, with the development of patch-homogeneous model and tracing of the focused curves at a given distance from the borehole wall.

In the application, it is available LAS-format data import. Visualization of all the signals and their transformations being input into the system is also implemented. Visualization is based on the pictorial presentation of data accepted for PRIME, GeoPolsk, SIAL-GIS, Geo Office solver interpretation systems, etc.

All time-consuming calculations are performed in a separate system thread. This allows to work with a user interface while processing. Algorithms for group operations suit for computing by means of multiple-processor and multi-core architectures. The system is implemented in C++ language using the cross-platform graphics library Qt. It works under MS Windows NT and above.

The modules communicate via interfaces. Each module is independent and consists of an application, necessary additional files, allocation data, and user assistance. General-purpose interfaces are combined into libraries. The work with data of each geophysical method is provided by a particular module. This allows to add modules of numeric inversion for both the new geophysical methods and the new tools and devices. Similarly, some new algorithms can be integrated such as filtering, pseudoinverse, model reparametrization algorithms, primal-inverse algorithms.

DIGITAL BKZ AND VEMKZ SIGNAL PROCESSING

Sharing of amplitude ratio ΔA and the phase difference $\Delta \varphi$ increases the reliability of resistivity and its radial profile estimations and also allows to assess the value of the RDC.

Fig. 2 shows a fragment of practice logs in the sandstone cross-section (borehole diameter 0.216 m, drilling mud resistivity 1.8-1.9 Ohm-m). It also shows the logs of the VEMKZ signal transformations in apparent resistivity (ρ_a) and RDC (ϵ_r), as well as focused curves for the radial depths of 0.2, 0.35, 0.55, 0.85, and 1.35 m.

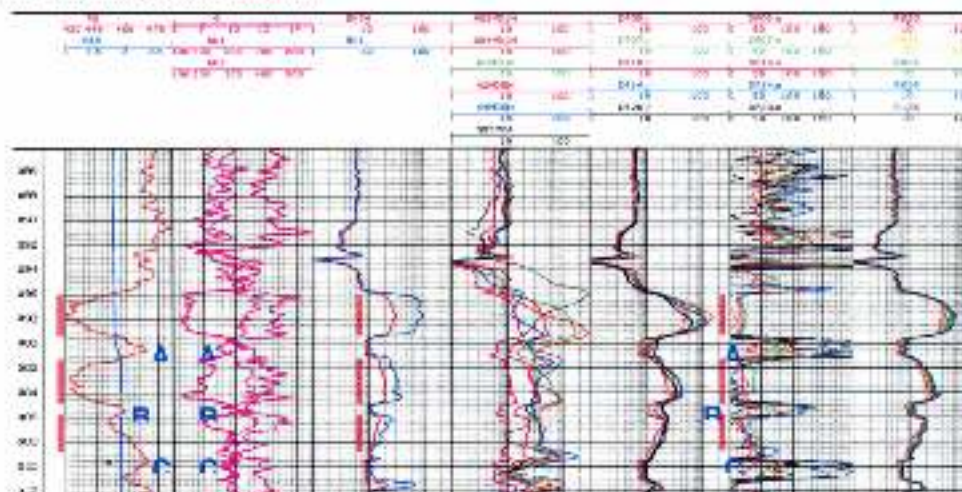


Fig. 2. Logs (from left to right): SP and resistivity; Gamma and NNLT, BK; BKZ; VEMKZ; ρ_a and ϵ_r logs (sondes DF05, DF07, DF10, DF14, and DF20), and focused curves

Reservoir intervals can be clearly determined from the SP, Gamma, Laterolog, and the VEMKZ values ($\times 96$ – $\times 99.5$, $\times 01$ – $\times 05$, $\times 06$ – $\times 09$ m). They are all characterized by low values of ϵ_r . At the same time, the lowest values of ϵ_r correspond to SP log lows and distinctly mark intervals of sandstone. Note that the clayiness increase (seen from SP and Gamma data) leads to an increase of ϵ_r values that is especially noticeable on the $\times 06$ – $\times 10$ -m interval. In clay intervals (above $\times 90$ m), ϵ_r values increase with the decrease of operating frequency from 50 units at 14 MHz to 100-150 at 0.875 MHz. The highest values of the RDC (over 200) are in the intervals of pyritization ($\times 90.5$ – $\times 94$ m) that usually can't be seen at the logs of other methods.

The best reservoir boundaries can be determined from ρ_b (BK), ρ_a and ϵ_a (VEMKZ) logs. Note that there is the high resolution in clays of ϵ_a logs. Gamma values of clay layers on the A ($\times 99.5$ – $\times 01$ m), and B ($\times 04.5$ – $\times 06$ m) intervals increase from 5 $\mu R/hr$ to 8 $\mu R/hr$ (A) and from 8 $\mu R/hr$ to 12 $\mu R/hr$ (B), on C interval such an increase is not observed. The SP signals also increase: in the A interval – from 450 mV to 470 mV, in the B interval – from 450 mV to 460 mV, in the C interval – from 460 mV to 470 mV. At the same time, the exact delimitation of clay layers can not be done because of the flatness of the logs. The boundaries of these intervals are very clearly distinguished by a sharp increase of the ϵ_a values.

Even using the entire set of alternating-current measurements, it is not always possible to determine enough accurately the resistivity of the borehole environment. It is so also for RDC estimation in the formations with low resistivity. In these cases, joint direct-current inversion of data (BKZ, BK) and alternating-current inversion of data (VEMKZ, IL, and drilling fluid resistivity logging) are applied. Such inversions are applied generally under a cylindrical-layered model, with preliminary division into layers. The obtained geoelectric (resistivity, RDC) model is used as an initial one to be improved by means of two-dimensional inversion.

As one knows, near wellbore region is formed in the reservoir while drilling resulting from the drilling mud filtrate invasion. The reservoir parameters can be estimated from the resistivity profile of this region [4]. Therefore, it is important to define this radial profile as accurately as possible. The inverted data values under one of the methods usually lie in the wide range of equivalence [5]. Different sensitivity in relation to the resistivity and RDC, different spatial resolution and depth of the BKZ, BK and VEMKZ methods significantly reduce this region in the scope of geoelectrical parameters.

Fig. 3 shows the SKL logs in the oil-saturated reservoir ($\times 75.5$ – $\times 79.5$ m).

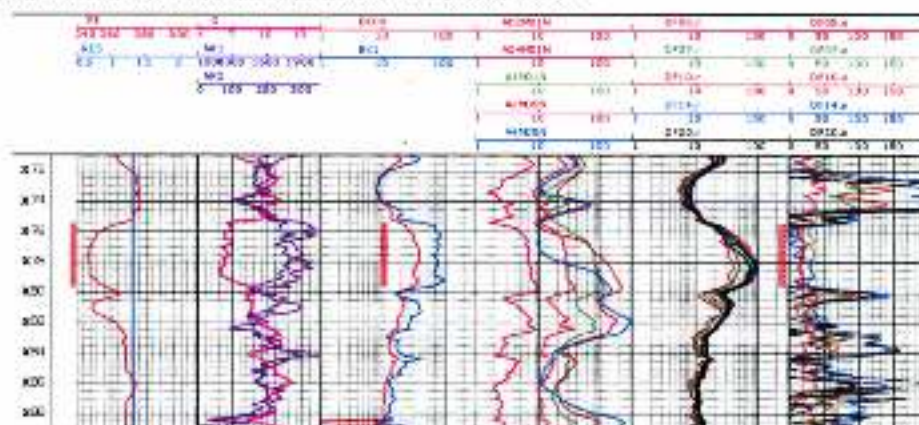


Fig. 3. SP; Gamma and NNLT; BK (ρ_b); BKZ (ρ_a); VEMKZ (ρ_a , ϵ_a) practice logs

In Figures 4–6 there are examples of the BKZ data inversion, the VEMKZ data inversion and joint BKZ + VEMKZ data inversion on the reservoir interval. The left part of Fig. 4 shows the BKZ (ρ_a) curves. In the right part, there is the best-fit geoelectric model. Parameter values are introduced in a tabulated form and in the form of the radial resistivity distribution (below). Synthetic signals are shown by dashed lines on the sounding curves. As a result of the inversion, the model for hardly permeable layer of 93 Ohm-m resistivity and a slight lowering invasion (thickness – 0.23 m, resistivity – 47.3 Ohm-m) was obtained.

The left part of Fig. 5 shows the VEMKZ curves (at the top – $\Delta\rho_a$ and at the bottom – ΔA , at the apparent resistivity) with the errors of measurement (vertical segments). At the right, there is the best-fit geoelectrical model with lowering invasion zone (thickness – 0.29 m, and resistivity – 27.7 Ohm-m). Layer resistivity is 95 Ohm-m.

The left part of Fig. 6 shows the VEMKZ curves at the apparent resistivity ($\Delta\rho_a$ and ΔA – at the top, vertical segments – the measurement error), and the BKZ curves at the apparent resistivity (at the bottom). In the best-fit geoelectrical model, parameters of the lowering invasion zone change – the thickness increases (0.37 m), and the resistivity improves (49.8 Ohm-m).

From the empirical VEMKZ data, ϵ_a logs were first obtained. High ϵ_a values (for long sondes of 60–100) in the clay-bearing layers (Fig. 2) are conditioned by their high polarizability. The same order of magnitude of ϵ_a for clays and loams in the VEMKZ frequency range is presented in other publication [6–7]. In permeable formations, ϵ_a can not be determined with sufficient accuracy from the signals of long sondes.

In the thick layers of mainly clay composition, sometimes one can observe a significant difference between the apparent resistivities defined by BKZ and VEMKZ. The RDC frequency dispersion in the range of the VEMKZ operating frequencies can be one of the possible reasons for this. Increasing of the RDC values during frequency decrease is clearly observable on the ϵ_a logs of clay and

argillaceous layers. More precisely, the RDC frequency dispersion can be estimated by the BKZ + VEMKZ complex. First, according to the BKZ data, ohmic formation model is developed. Then, in the context of the developed model, RDC values, c_{RDC} , are fitted for each frequency. The c_{RDC} frequency dependences obtained from the empirical SKL data (Fig. 7, at the left) correspond to the data [6] measured in the samples with different clay content using the laboratory facility (Fig. 7, at the right, in black).

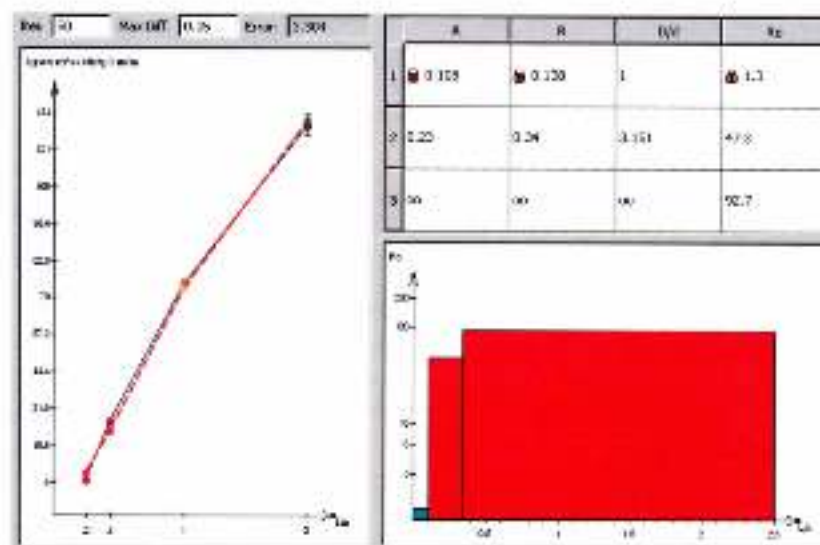


Fig. 4. The results of the BKZ curve inversion

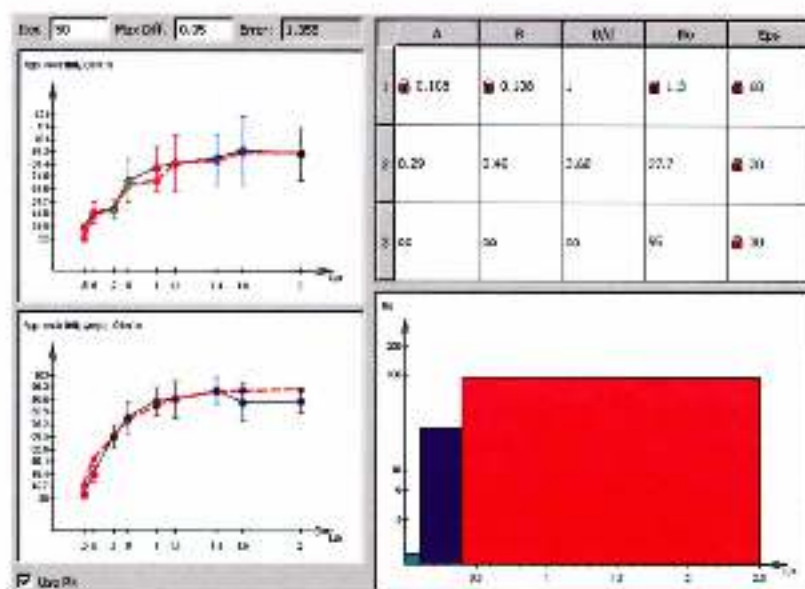


Fig. 5. The results of the VEMKZ curve inversion

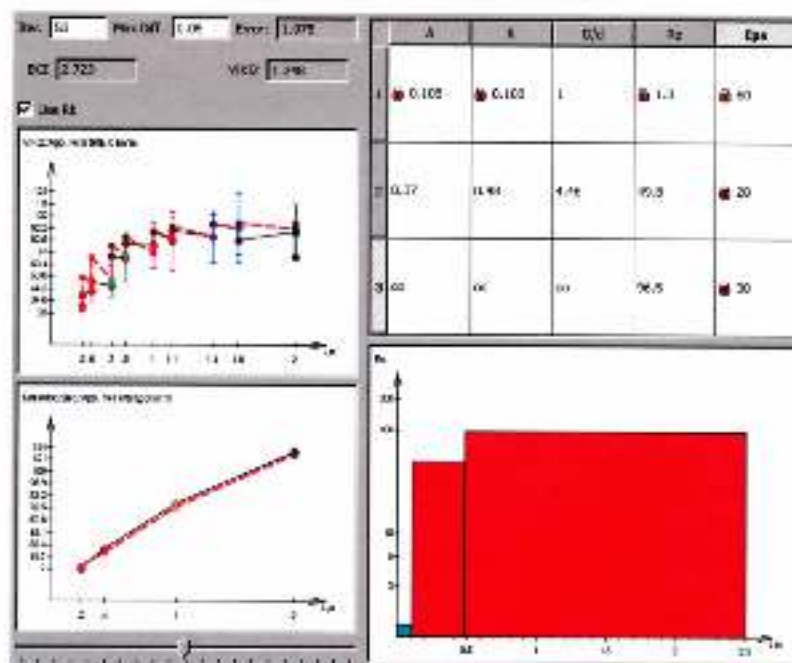


Fig. 6. The results of the joint BKZ and VEMKZ curves inversion

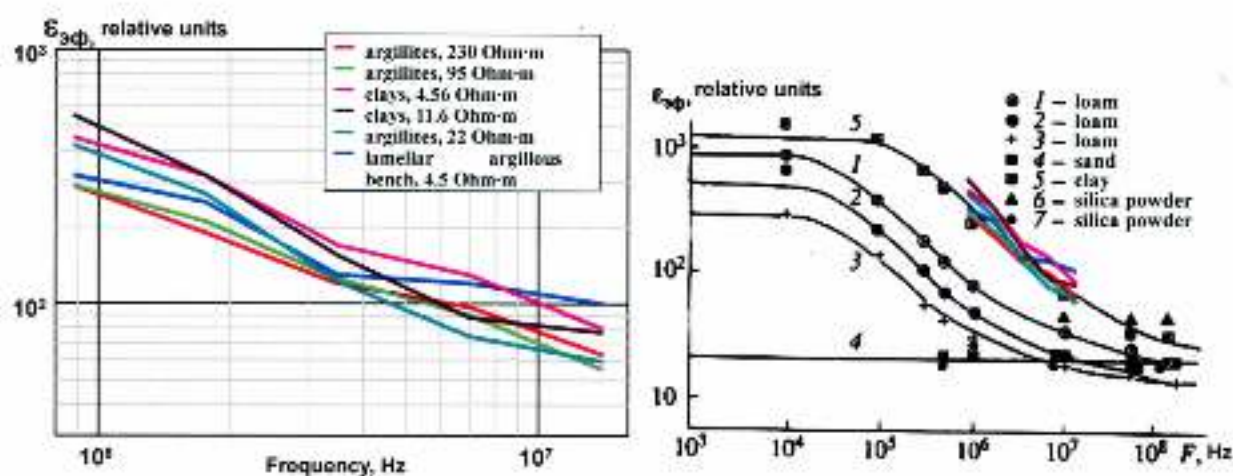


Fig. 7. Dependence of the effective RDC on frequency

CONCLUSION

Using a scope of measurements of the new SKL hardware complex, one can complete both the standard tasks such as dividing a cross-section into layers, defining a lithology, evaluating a saturation, and the new tasks such as improving data on the structure of altered zone by means of the BK + BKZ + VEMKZ complex, estimating the value of the effective dielectric constant and its frequency dispersion in the range of VEMKZ frequencies.

The effective EMF PRO system is developed for integrated interpretation of the signals obtained from electrical and high-frequency electromagnetic logging techniques combined in SKL.

REFERENCES

1. Petrov, A.N., V.V. Kiselev (2004). The device for electromagnetic borehole logging. *Russian Patent* N 2230344, 10 pp.: 2 illus. Bull. N 16.
2. Glinskikh, V.N., M.I. Epov (2005). Space sensitivity of relative parameters in high-frequency electromagnetic logging. *Geology and Geophysics*, N 11, Vol. 46, p. 1150-1157.

3. Nikitenko, M.N., M.I. Epov (2008), Measuring of relative amplitude of magnetic field with VIKIZ sounders-probes. *Karotazhnik*, N 9 (174), p. 21-35.
4. Yeltsov, I.N., M.I. Epov, A.A. Kashevarov (2005), New systemic approach to Wells' Geophysical Surveys' and Geology-Tchnological Surveys' data interpretation on basis of complex geophysical and hydro-dynamical models. *TEK Technologies*. N 5, p. 12-18.
5. Tabarovskiy, L.A., M.I. Epov (2006), Assessment of resolution capacity of electromagnetic methods. *Geology and Geophysics*, N 5, Vol. 47, p. 568-578.
6. Talalov, A.D., D.S. Daev (1996), About structural mechanism of frequency dispersion of electric properties of heterogeneous rocks. *Physics of the Earth*. N 8, p. 56-66.
7. Anderson, B.I., T.D. Barber, M.G. Luling, J. Rasmus, P.N. Sen, J.R. Tabanou, S.M. Haugland (2007), Observations of large dielectric effects on LWD propagation-resistivity logs. *SPWLA 48th Annual Logging Symposium*, June 3-6, Austin, TX. Paper BB.